

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 11 Sayı: 4 2022

Volume: 11 Issue: 4 2022



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 Dekan Vekili, Türkiye/
Niğde Ömer Halisdemir University, Acting Dean of Engineering Faculty, Turkey**

Baş Editör/Editor-in-Chief

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Yardımcı Editörler/Associate Editors

Prof. Dr. Mustafa Korkaç

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Doç. Dr./Assoc. Prof. Dr. Firdevs Uysal

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Doç. Dr./Assoc. Prof. Dr. Ahmet Şakir Dokuz,

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*



Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Adnan Görür

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Metin Yıldırım

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Murat Gökçek

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye/*Yıldırım Beyazıt University, Turkey*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

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

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Turkey*

Prof. Dr. Cengiz Duran Atış

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Okan Karahan

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Mustafa Alçı

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Kenan Danışman

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Kezban Candoğan

Ankara Üniversitesi, Türkiye/*Ankara University, Turkey*

Prof. Dr. Mustafa İlbaş

Gazi Üniversitesi, Türkiye/*Gazi University, Turkey*

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, Turkey*

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. Saffet Ayasun	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Prof. Dr. Zeliha Yıldırım	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Yonca Yüceer	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan	Endüstri Mühendisliği Industrial engineering
Prof. Dr. Murat Barut	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics 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
Doç. Dr. Yasin Kabalcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Doç. Dr. Kutalmış Gümüş	Harita Mühendisliği Geomatics Engineering
Doç. Dr. Aydın Yeşildirek	Mekatronik Mühendisliği Mechatronics 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. Arzum Büyükkeklik	Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering
Doç. Dr. Andaç Batur Çolak	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı	Üretim Mühendisliği Manufacturing Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Casen Panaitescu	Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Perolium and Natural Gas 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. Katibe Sinem Coruk	Gıda Mühendisliği <i>Food 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>
Doç. Dr. Hasan Tangüler	Gıda Mühendisliği <i>Food 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/Turkey

E-posta/E-mail: mbergisi@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

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Pırlanta fiyat tahmini için regresyon modellerinin karşılaştırmalı analizi

Comparative analysis of regression models for predicting diamond price

Merve Asil, Gülfem Işıklar Alptekin

838-845

Araştırma Makalesi/Research Article

Doğal dil işleme yöntemleriyle metinden SQL sorgusu tahmini üzerine bir çalışma

A study on text-to-SQL query prediction with natural language processing methods

Asım Sinan Yüksel, Muhammed Abdulhamid Karabyık

846-855

Araştırma Makalesi/Research Article

Sadeleştirilmiş U-Net mimarisi ile beyin tümörü segmentasyonu

Brain tumor segmentation with simplified U-Net architecture

Özlem Polat

856-861

Araştırma Makalesi/Research Article

Makine öğrenme yöntemleri ile ağ trafik analizi

Network traffic analysis with machine learning methods

Bülent Tuğrul, Adil Shihab Ahmed Ahmed

862-870

Research Article/Araştırma Makalesi

Parallel solution of Lambert's problem using modified Chebyshev-Picard iteration method

Lambert probleminin modifiye Chebyshev-Picard yineleme yöntemini kullanarak paralel çözümü

Majd Ajroudi, F. Şükrü Torun

871-878

Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering

Research Article/Araştırma Makalesi

Temporal variation of air pollution variables in different regions of Turkey during the Covid-19 restrictions

Covid-19 pandemisi kısıtlamaları sırasında Türkiye'deki farklı bölgelerdeki hava kirliliği değişkenlerinin zamansal değişimi

Zinnur Yılmaz, Mustafa Bünyamin Karagözoğlu

879-887



Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering

Research Article/Araştırma Makalesi

Array gain analyses of MIMO systems in 5G communication systems

5G iletişim sistemlerinde ÇGÇÇ sistemlerin dizin kazanç analizleri

Ural Mutlu, Yasin Kabalcı

888-897

Araştırma Makalesi/Research Article

KKG kullanılan hız algılayıcısız SMSM için AYK ve DMK'nin karşılaştırılması

Comparison of FOC and DTC for speed sensorless PMSM using

Barış Çavuş, Mustafa Aktaş

898-903

Araştırma Makalesi/Research Article

Aralık değerli tip-2 bulanık denetleyici ile negatif gerilim çıkışlı temel seri luo çeviricinin denetimi

Control of negative voltage output elementary series luo converter via interval type-2 fuzzy controller

Ahmet Gani

904-910

Research Article/Araştırma Makalesi

FRT capability enhancement of wind turbine based on DFIG using machine learning

Makine öğrenimi kullanarak ÇBAG'a dayalı rüzgâr türbininin FRT yeteneğinin iyileştirilmesi

Altan Gencer

911-918

Araştırma Makalesi/Research Article

Endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilir alan tabanlı çap ölçüm algoritması

Area based diameter measurement algorithm for industrial machine vision applications

Ahmet Gökhan Poyraz, Hasan Melih Kınagu, Semih Alan, Mehmet Atak

919-929

Research Article/Araştırma Makalesi

ABER analysis of RIS-aided SSK schemes over Ricean fading channels

RIS-destekli SSK şemalarının Ricean sönmülmeli kanallardaki ABER analizi

Ayşe Elif Canbilen, Alper Ateş

930-936

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Bir lojistik işletmesinde tesis depo performansının Copras ve Topsis yöntemleriyle değerlendirilmesi

Evaluation of facility warehouse performance in a logistics company with Copras and Topsis methods

Merve Er, Selen Avcı Azkeskin, Zerrin Aladağ

937-944



Gıda Mühendisliği / Food Engineering

Research Article/Araştırma Makalesi

Bioactive component extraction from broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) and optimization by Taguchi method
Brokoliden (Brassica oleracea L. var. italica) biyoaktif bileşen ekstraksiyonu ve Taguchi yöntemi ile optimizasyonu

Cem Baltacıoğlu, Rabia Tartıcı

945-951

Harita Mühendisliği / Geomatic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Yüksek zamansal çözünürlüklü çoklu-GNSS PPP-AR yönteminin yatay yönlü dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğinin değerlendirilmesi
Evaluation of the ability of the high-rate multi-GNSS PPP-AR method to detect dynamic behaviors in horizontal direction

Mert Bezcioglu, Cemal Özer Yiğit, Ahmet Anıl Dindar, Özgür Avcı

952-960

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Periyodik yığılı kütleli kirişlerde eğilme dalgalarının yayılımı
Propagation of flexural waves in beams with periodic lumped mass

Aydın Özmutlu

961-973

Araştırma Makalesi/Research Article

Manisa-Gürle köyü yöresinde bulunan kayaların sınıflandırılarak beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması
Classification of rocks in Manisa-Gürle village region and investigation of their usability as concrete aggregate

Classification of rocks in Manisa-Gürle village region and investigation of their usability as concrete aggregate

Adem Solak

974-981

Araştırma Makalesi/Research Article

Donma-çözülme etkisi altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin Duncan-Chang modeli ile deneysel karşılaştırması
Experimental comparison of stress-strain relationships of clay soils under freeze-thaw effect with Duncan-Chang model

Experimental comparison of stress-strain relationships of clay soils under freeze-thaw effect with Duncan-Chang model

Veysel Özlü, Müge Elif Orakoğlu Fırat

982-989

Araştırma Makalesi/Research Article

İstatistiklerle ülkemizdeki açık hat demiryolu ulaşımındaki gelişmeler
Developments in open line rail transportation in our country with statistics

Developments in open line rail transportation in our country with statistics

Recep Koray Kıyıldı

990-998



Research Article/Araştırma Makalesi

Effect of column cross section and concrete compressive strength on the resistance of RC columns subjected to axial loads and loads created by creep

Kolon enkesitinin ve beton basınç dayanımının eksenel yüklerle ve sünmeden dolayı oluşan yüklerle maruz kalan betonarme kolonlarda dayanıma etkisi

Abdulhamit Nakipoglu, Mohammed Gamal Al-Hagri, Mahmud Sami Döndüren

999-1005

Araştırma Makalesi/Research Article

Derin sinir ağları modeli ile standardize yağış indeksi tahmini

Standard precipitation index estimation with deep neural network model

Levent Latifoğlu

1006-1024

Araştırma Makalesi/Research Article

Kohezyonlu zeminlerde net limit basınç ve deformasyon modülünün makine öğrenimi temelli modeller kullanılarak tahmin edilmesi

Predicting net limit pressure and deformation modulus of cohesive soils using machine learning-based methods

Nurgül Yeşiloğlu Gültekin, Ayhan Doğan

1025-1033

Araştırma Makalesi/Research Article

Zeminlerin dispersibilite sınıfının XRF analiz sonuçlarına dayalı olarak Genetik Programlama (GP) ile tahmini

Prediction of dispersibility class of soils with Genetic Programming (GP) based on XRF analysis results

Sadettin Topçu, Evren Seyrek

1034-1041

Research Article/Araştırma Makalesi

Investigation of material deterioration and seismic behavior of Fertek and Hançerli Churches in Cappadocia Region

Kapadokya bölgesindeki Fertek ve Hançerli Kiliselerinin malzeme bozulmalarının ve sismik davranışlarının incelenmesi

Metin Hakan Severcan, Emel Efe Yavaşcan, Semiha Akçaözöglü, Kubilay Akçaözöglü

1042-1052

Araştırma Makalesi/Research Article

Kutu ve dairesel kesitli menfez akımlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi

Experimental and numerical investigation of flow through culverts in box and circular shapes

Kutsi S. Erduran, Uğur Ünal, Ahmet Ş. Dokuz, Büşra Nas

1053-1062

Jeoloji Mühendisliği / Geological Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Akdağmadeni (Yozgat) kurşun-çinko yataklarının otomatik çizgisellik analizi ile değerlendirilmesi

Evaluation of Akdağmadeni (Yozgat) lead-zinc deposits with automatic lineament analysis

Oktay Canbaz

1063-1073



Araştırma Makalesi/Research Article

Kozaklı (Nevşehir) jeotermal alanındaki obrukların jeofizik yöntemler kullanılarak belirlenmesi

Investigation of sinkholes in Kozaklı (Nevşehir) geothermal field using geophysical methods

Halil Bölük, Mustafa Afşin, Murat Kavurmacı, Mutluhan Akın

1074-1084

Kimya Mühendisliği / Chemical Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Kimyasal olarak işlenmemiş Midyat taşı kullanılarak sulu çözeltilerden Pb(II) iyonlarının etkin bir şekilde uzaklaştırılması: İzoterm, kinetik ve termodinamik çalışmalar

Effective removal of Pb(II) ions from aqueous solutions using chemically untreated Midyat stone: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies

Mutlu Canpolat, Yalçın Altunkaynak, Ömer Yavuz

1085-1096

Araştırma Makalesi/Research Article

KBH₄ hidrolizinde ince film nikel katalizörünü kullanarak hidrojen üretimi ve proses optimizasyonu

Hydrogen production and process optimization using thin film nickel catalyst in KBH₄ hydrolysis

Meryem Sena Akkuş

1097-1102

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

Review Article / Derleme Makalesi

The current status of gold mining in Turkey: An overview

Türkiye'de altın madenciliğinin güncel durumu: Genel bir bakış

Adem Ersoy

1103-1114

Araştırma Makalesi/Research Article

Soda ve MgO ile aktive edilmiş Kalecik bentonit örneğinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi

Investigation of some physical properties of Kalecik bentonite sample activated with soda and MgO

Turan Kılınç, Yakup Cebeci, Mehmet Sabri Çelik

1115-1120

Derleme Makalesi/Review Article

Türkiye madencilik sektöründe dögüsel ekonomi ve dijitalleşme uygulamaları

Circular economy and digitalization practices in the mining sector of Turkey

Mahmut Suat Delibalta

1121-1126



Research Article/Araştırma Makalesi

Predicting compressive strength using the texture coefficient with soft computing techniques for rocks

Kayalar için yapay zekâ hesaplama teknikleri ile doku katsayını kullanarak basınç dayanımını tahmin etme

Ramazan Çomaklı, Ümit Atıcı

1127-1137

Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Çatlaklı ankastre sandviç kirişlerin serbest titreşim analizi

Free vibration analysis of cracked cantilever sandwich beams

Yusuf Cunedioğlu, Burak Devenciöglü

1138-1145

Research Article/Araştırma Makalesi

Investigation on post heat treatment parameters of additively manufactured AlSi10Mg parts in terms of time and build direction

Eklemlerle imalat ile üretilmiş AlSi10Mg parçalara ardıl ısıtma süreleri ve üretim yönü parametrelerinin etkisinin incelenmesi

Remzi Ecmel Ece, Ömer Keleş, Bekir Sami Yılbaş

1146-1153

Araştırma Makalesi/Research Article

Endüstriyel sünger ezme makinasının güç ünitesi tasarımı ve sonlu elemanlar metodu ile titreşim analizi

Power unit design of industrial sponge crushing machine and vibration analysis by finite element method

Emir Esim, Emre Benzer

1154-1162

Araştırma Makalesi/Research Article

Yan rüzgar koşullarında ön kısmı düz plakalı bir otobüs modeli üzerindeki aerodinamik direncin düşürülmesi

Aerodynamic drag reduction on a bus model with upstream flat plate under crosswind conditions

Mehmet Seyhan, Erhan Fırat

1163-1171

Malzeme ve Metalürji Mühendisliği / Materials and Metallurgical Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Karbon nanotüp örüntülü polimer silindirik kabukların aksenal yük etkisi altında burkulması

Buckling of carbon nanotube patterned polymer cylindrical shells under the axial load

Mahmure Avey, Fethi Kadioğlu, Semra Ahmetolan

1172-1178



Araştırma Makalesi/Research Article

Al 6061/B₄C/GNP hibrit kompozitlerde B₄C ve GNP takviye miktarlarının abrasif aşınma davranışına etkisi

The effect of B₄C and GNP reinforcement amounts on abrasive wear behavior in Al 6061/B₄C/GNP hybrid composites

Muharrem Pul

1179-1187

Araştırma Makalesi/Research Article

Süperkapasitör performansını artırmak için grafitik karbon nitrür / grafen hibrit yapılarının kullanılması

Using graphitic carbon nitride/graphene hybrid structures to improve supercapacitor performance

Buse Sert, Ersan Harputlu

1188-1195

Diğer / Other

Araştırma Makalesi/Research Article

Tek ve çift katmanlı yapay damar konfigürasyonlarının Holzapfel-Gasser-Ogden hiperelastik modeli ile mekanik uyumluluk analizi

Mechanical compatibility analysis of single and double-layer artificial vessel configurations based on the Holzapfel-Gasser-Ogden hyperelastic model

Galip Yılmaz, Emin Uslu

1196-1205



Pırlanta fiyat tahmini için regresyon modellerinin karşılaştırmalı analizi

Comparative analysis of regression models for predicting diamond price

Merve Asil¹ , Gülfem Işıklar Alptekin^{2,*} 

¹ Galatasaray University, Graduate School of Science and Engineering, 34349, İstanbul Turkey

² Galatasaray University, Computer Engineering Department, 34349, İstanbul, Turkey

Öz

Bilişim dünyasındaki gelişmeler ile artan veri hacmi ve çeşitliliği ile birlikte, hayatımıza büyük veri kavramı girmiş ve beraberinde birçok zorluğu da peşinde getirmiştir. Verinin işlenebilirliği büyük bir önem kazanmış ve güncel kullanılan bazı veri işleme yöntemlerinin performansı yetersiz gelmeye başlamıştır. Büyük veri analizinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak bu sorunlar çözülmeye çalışılmakta ve gün geçtikçe daha etkin çözümler bulan algoritmalar önerilmeye devam edilmektedir. Bu çalışmanın amacı, iyi bilinen ve sıklıkla kullanılan regresyon algoritmalarını bir veri kümesi üzerinde çalıştırmak, performans sonuçlarını karşılaştırarak en iyi sonuç verenleri sunmaktır. Makalede pırlantaların kesimi, rengi, berraklığı ve fiyatı gibi özellikleri barındıran açık bir veri kümesi kullanılmıştır. Verilerin ön işleme yapılmış, tanımlayıcı analiz gerçekleştirilmiş ve fiyatlarının tahmini için farklı regresyon modelleri hem ilkel hem de optimize edilmiş halleriyle çalıştırılmıştır. Regresyon modelleri içinden diğerlerine kıyasla daha düşük RMSE ve daha yüksek r^2 değerleri GBM modelleri (özellikle Light GBM) ve rassal orman algoritmasında alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Regresyon modelleri, Makine öğrenmesi, Fiyat tahmini, Doğrusal regresyon, Doğrusal olmayan regresyon.

1 Giriş

Bir regresyon modeli, bir veya daha fazla bağımsız değişken ile bir bağımlı/hedef değişken arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir fonksiyon ortaya koyar. Regresyon fonksiyonu birçok tahmin tipinin esasını oluşturur ve hedef değişken üzerindeki etkilerin görülmesini sağlar. Bu sayede, sektör göstergelerine dayalı olarak önemli iş kararları alınabilir. Verilen iş kararları ve sonuçları arasındaki ilişkiler uzun vadeli olarak belirlenebilirse, ileride alınan kararların çok daha yerinde olması sağlanabilir. Eğer fonksiyondaki girdiler ve çıktılar arasındaki ilişki düz bir çizgi ile ifade edilebiliyorsa, doğrusal bir regresyon olduğu söylenir. Gerçek dünyada gözlemlenmesi en basit olan regresyon tipi budur. Eğer girdiler ve çıktılar arasında doğrusal bir ilişki kurulamıyorsa, doğrusal olmayan bir regresyon modeli olduğu varsayılır. Doğrusal olmayan fonksiyonlar, çok çeşitli eğrilere uyabilir. Bu yüksek sayıda eğri adayları arasından, veriler için en uygun formun seçilmesi gerekir. Bu

Abstract

With the developments in informatics and the increasing volume and diversity of data, the concept of big data has entered our lives and brought many challenges with it. The usefulness of data has gained great importance and the performance of some commonly used data processing methods have begun to be insufficient. These problems have been tried to be solved by using artificial intelligence and machine learning techniques that find more effective solutions. The aim of this study is to run well-known and frequently used machine learning algorithms on a public dataset, to compare their performance results comparatively, and present the best performant ones. A public data on diamonds is preprocessed, descriptive analysis is performed, and various regression models to predict the corresponding prices are run, both in their primitive and optimized forms, GBM models (especially Light GBM) and random forest algorithm have the lowest RMSE values and highest r^2 values compared to other models.

Keywords: Regression models, Machine learning, Price prediction, Linear regression, Non-linear regression.

makalede, bu seçim süreci ele alınmış ve veri kümesi olarak Kaggle'da yer alan 'Diamonds' veri kümesi seçilmiştir [1]. Fiyat tahmini, birçok farklı ürün ve servis için en sık gereksinim duyulan iş problemlerinin başında yer alır. Dolayısıyla, pırlanta gibi nispeten çok özelliği barındıran ve bu özelliklere göre fiyatı değişen bir ürünün fiyatını tahmin edecek regresyon fonksiyonu üzerinde çalışmanın, regresyon modellerinin karşılaştırması için uygun olacağı düşünülmüştür.

Akademik yazında, bu makalede gerçekleştirilen çalışmaya en yakın özellikteki çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir. İlk grup olarak, Kaggle'da açık olarak bulunan pırlantalarla ilgili özellikler ve fiyatları içeren 'Diamonds' veri kümesini kullanan çalışmalar verilmiştir. Bunlardan biri, birbiriyle kıyaslamak için sekiz farklı gözetimli öğrenme algoritması kullanmıştır [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gisiklar@gsu.edu.tr (G. I. Alptekin)

Geliş / Received: 16.03.2022 Kabul / Accepted: 18.07.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1088916

Tablo 1. Akademik yazındaki benzer çalışmalar

Çalışma	Kullanılan veri kümesi	Performans ölçütleri	En performanslı algoritma
[2]	Diamonds (Kaggle)	Doğruluk, RMSE	Rassal orman
[3]	Diamonds (Kaggle)	RMSE	Rassal orman ve kolektif modeller
[4]	Diamonds (Kaggle)	Doğruluk	Önerilen kolektif model
[5]	Diamonds (Kaggle)	r^2 , MAE, RMSE	CatBoost, rassal orman, XGB
[6]	2. el araç fiyatları (Kaggle)	MSE	Rassal orman
[7]	Konut fiyatları	RMSE, MSE	GBM
[8]	Türkiye 2. el araç fiyatları	RMSE, MAE	Doğrusal regresyon
[9]	Sinema bilet fiyatları (bookmyshow.com)	RMSE	Rassal orman
[10]	ABD ev fiyatları (Kaggle)	RMSE	CatBoost
Kendi çalışmamız	Diamonds (Kaggle)	r^2 , RMSE	Light GBM, rassal orman

Tablo 2. Veri kümesinden örnek olarak verilen beş kayıt

	Carat	Cut	Color	Clarity	Depth	Table	Price	x	y	z
0	0.23	İdeal	E	SI2	61.5	55.0	326	3.95	3.98	2.43
1	0.21	Premium	E	SI1	59.8	61.0	326	3.89	3.84	2.31
2	0.23	Good	E	VS1	56.9	65.0	327	4.05	4.07	2.31
3	0.29	Premium	I	VS2	62.4	58.0	334	4.20	4.23	2.63
4	0.31	Good	J	SI2	63.3	58.0	335	4.34	4.35	2.75

Bu çalışmada, modeller optimize edilmemiş ve doğruluk değerleri ve RMSE hata oranına göre yaptıkları sıralamada en yüksek performanslı algoritma olarak rassal orman algoritmasını seçmişlerdir. Aynı veri kümesini kullanan diğer bir çalışmada [3], algoritmalar veriler temizlenmeden uygulanmıştır ve rassal orman veya kolektif modellerinin kullanımı önerilmiştir. Aynı veri kümesi üzerinde çalışılırken elde edilen bu sonuç farkları, veri kümesinin temizlenmesinin yarattığı fark olarak değerlendirilebilir. Diğer bir çalışma [4], daha az sayıda algoritmayı kendi önerdikleri kolektif bir modelle karşılaştırmışlardır. Kısa bir ön çalışma şeklinde yazılan bu makalede, kendi önerdikleri modelin diğerlerinden daha iyi doğruluk oranı verdiğini söylemişlerdir. Pırlanta veri kümesi üzerinde yapılan kapsamlı çalışmada [5], uygulama biçimleri verilirse de, en yüksek doğruluk oranı ve düşük RMSE değeri veren CatBoost regresyon modeli olmuştur. Onu takip eden algoritmalar, bizim çalışmamızda da olduğu gibi rassal orman ve XGBoost regresyondur. Algoritmaları r^2 (r-kare), RMSE (*Root Mean Squared Error*) ve MAE (*Mean Absolute Error*) değerlerine göre değerlendirmişlerdir. Aynı veri kümesi üzerinde yapılan çalışmaların sonuçları arasındaki bu farklar, modelin optimize edilmesinin ve verinin temizlenmesinin, yapılan hata oranını düşüreceğini ve en performanslı algoritma seçimini etkileyeceğini göstermiştir. Fiyat tahmini yaparken regresyon modelleri, çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. İkinci el araçların fiyatlarını belirlemek için gerçekleştirilen bir çalışmada [6],

performans ölçütü olarak MSE hata değeri alınmış ve en az hatayı veren rassal orman algoritması olmuştur. Diğer bir çalışmada [7], tüketicilerin finansal beklentileri uyarınca konut fiyatlarının tahmininde regresyon modelleri kullanılmıştır. Farklı algoritmaları RMSE ve MSE (*Mean Squared Error*) ölçütlerine göre karşılaştırmışlar ve GBM algoritmasının en yüksek doğruluk ve en az hata oranı verdiğini saptamışlardır. Türkiye'deki ikinci el araç fiyatlarını tahmin etmek için yapılan diğer bir çalışmada, Türkiye içinde toplanılan bir veri kümesinden faydalanılmış e doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır [8]. Modelin performansı RMSE ve MAE hata değerleri ile değerlendirilmiş ve modelin tatmin edici sonuçlar verdiği söylenmiştir. Sinema biletlerinin fiyatlarını dinamik olarak belirleyebilmek amacıyla, veri kümeleme ve regresyon yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir yaklaşım önerilmiştir [9]. Önerilen hibrit modelin performansını ölçmek için RMSE değeri kullanılmış ve rassal orman modelinin en az hatalı sonuçları verdiğini gösterilmiştir. Konutların birçok farklı özelliğini kullanarak fiyatlarını düzgün belirleme problemi için gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, CatBoost regresyon algoritması en düşük RMSE değerini vermiştir [10]. Bu çalışmada, ABD'deki ev fiyatlarını içeren açık bir veri kümesi kullanılmıştır.

Akademik yazındaki çalışmalarla kıyaslandığında, bu çalışmanın katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Seçilen veri kümesi üzerinde modelleri çalıştırmadan önce, veri ön işleme adımları, aykırı gözlem analizi ve tanımlayıcı analiz uygulanmıştır.
- Veri kümesinin ön işlenmesinden algoritma sonuçlarının elde edilmesine kadar olan süreç ayrıntılı şekilde sunulduğundan, bu konuda çalışacak araştırmacılar için uygulanabilir bir örnek olmuştur.
- Kullanılan modeller hem ilkel hem de optimize edilmiş şekilde uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.
- Aynı veri kümesiyle çalışırken kullanılan verinin temizlenmesi ve kullanılan modelin optimize edilmesinin alınan performans ölçütlerini olumlu yönde değiştirebileceği gösterilmiştir.

Tablo 1’de anlatılan benzer çalışmaların hiçbirinde veri ön işleme adımları, aykırı gözlem analizi, tanımlayıcı analiz gibi adımlar sunulmamıştır. Algoritmalar doğrudan uygulanmış ve seçilen performans ölçütlerine göre en iyi sonuç verenler saptanmıştır. Kendi çalışmamızdaki sonuçlara bakıldığında (Tablo 4), akademik yazıdakilerin bir kısmına benzer şekilde, en düşük RMSE ve en yüksek r^2 değerlerinden biri rassal orman ve Light GBM için bulunmuştur.

Aynı veri kümesi üzerinde çalışılırken elde edilen bu sonuç farkları, veri kümesinin temizlenmesinin ve modelin optimize edilmesinin yarattığı fark olarak değerlendirilebilir. Makalenin 2. bölümünde veri kümesi ve özelliklerinden bahsedildikten sonra, tüm kullanılan yöntemler ve alınan sayısal sonuçlar özetlenmiştir. 3. bölümde karşılaştırma sonuçları verilmiş, yorumlanmış ve makale sonuçlandırılmıştır.

2 Veri kümesi ve yöntem

Bu bölümde kullanılan veri kümesi, içindeki bağımlı ve bağımsız değişkenler, veri ön işleme adımında kullanılan yöntemler ve sonuçları, tanımlayıcı analiz çalışmaları ve karşılaştırılan regresyon modellerinden en iyi sonuç veren iki yöntem ve sonuçları sunulmuştur. Kullanılan veri kümesi açık bir veri kümesi olduğu için [1], yapılan çalışmaların tekrar edilebilmesi ve öğrenme/ karşılaştırma için kullanılabilmesi amacıyla, adımlar ayrıntılı şekilde verilmiştir.

2.1 Veri kümesi ve değişkenleri

Mücevherat sektöründe kullanılan bir pahalı taş olan pırlantanın fiyatı, renginden, berraklığına kadar birçok özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, internet üzerinden ulaşılabilecek [1] bir pırlanta veri kümesi kullanılmıştır. Veri kümesi toplam 10 değişkenden oluşmaktadır. Bunlar arasında, pırlanta fiyatlarını gösteren ‘price’ sürekli nicel bir değişken ve ‘cut’, ‘color’, ‘clarity’ gibi nitel, ‘carat’, ‘depth’, ‘table’, ‘x’, ‘y’ ve ‘z’ gibi nicel değişkenler bulunmaktadır. ‘Carat’ pırlantanın karat ağırlığı, ‘cut’ pırlantanın kesim kalitesi (Fair-Good-Very Good-Premium-Ideal değerlerini alır.), ‘color’ pırlantanın rengi (En kötüden en iyiye doğru J, I, H, G, F, E, D değerlerini alır.), ‘clarity’ pırlantanın berraklığı (En kötüden en iyiye doğru I1, SI2, SI1, VS2, VS1, VVS2, VVS1, IF değerlerini alır.), ‘depth’ pırlantanın yüksekliğinin ortalama kuşak çapına bölünmesi, ‘table’ pırlantanın genişliğinin

ortalama çapının yüzdesi, ‘x’ pırlantanın uzunluğu (mm), ‘y’ pırlantanın genişliği (mm) ve ‘z’ pırlantanın yüksekliği (mm) şeklinde tanımlanmıştır. Veri kümesinden örnek olarak ilk beş kayıt, Tablo 2’de verilmiştir. Veri kümesi 3 MB büyüklüğünde olup, toplamda 53940 kayıt içermektedir.

2.2 Veri ön işleme adımları

Çalışmaya başlarken, verinin ön işleme adımının bir parçası olan, nicel değişkenlere ait ortalama ve medyan değerlerine bakılarak, aykırı gözlem analizi yapılmıştır (Tablo 3). Tablo 3’te en fazla farklılık ‘price’ değişkeninde saptanmıştır. Şekil 1’de, bu değişkene ait keman grafiği çizilmiş ve fiyatlar yükseldikçe, aykırılıkların arttığı görülmüştür.

Fiyat değişkeni için aykırı gözlemleri düzenlemek için kullanılacak üç farklı yöntem uygulanmış ve her üç durum için de ilkel (parametreler üzerinde işlem yapılmamış) RMSE ve r^2 değerleri hesaplanarak, en iyi sonuç verenler seçilmiştir. r^2 değeri 0-1 arasında belirlenmekte olup, iki değişken arasındaki korelasyonu açıklar. r^2 değeri 1’e ne kadar yakınsa, seçilen regresyon eğrisi veri ile o derece uyumludur. RMSE, bir model veya bir tahminci tarafından tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerleri karşılaştırır ve iki veri kümesi arasındaki farka bakarak ne kadar hata olduğunu ölçer.

Tablo 3. Nicel değişkenlere ait ortalama ve medyan değerleri

Değişken	Ortalama	Medyan
carat	0.80	0.70
depth	61.75	61.80
table	57.46	57.00
price	3932.80	2401.00
x	5.73	5.70
y	5.73	5.71
z	3.54	3.53

Hesaplanan RMSE değeri ne kadar küçükse, gözlemlenen ve tahmin edilen değerler birbirine o kadar yakın demektir. Aykırı gözlemleri düzenlemek için kullanılacak yöntemler aşağıda özetlenmiştir:

i. *Aykıruları silmek:* Bağımlı değişken olan ‘price’ için yapılan incelemede, 53940 gözlem arasından 3540 tanesinin aykırı olduğu tespit edilmiştir. Bunlar silinerek, veri kümesi 50400 gözleme düşürülmüştür.

ii. *Medyan ile doldurmak:* Bu işlemin yapılma amacı, aykırı ‘price’ değerlerini kendi medyan değeri ile doldurarak veri kaybı yaşamamaktır. Bağımlı değişkenin medyan değeri 2401 olarak hesaplanmıştır ve bütün aykırı değişken değerleri yerine bu değer konmuştur.

iii. *Baskılama yöntemi:* Bu yöntemde, ‘price’ değişkeninin aykırı değerleri için tespit edilen alt (Denklem (1)) ve üst sınırlara (Denklem (2)) göre işlem yapılmaktadır. Bağımlı değişken finansal bir değer olduğundan, keman grafiğinde (Şekil 1) de görüldüğü gibi aykırı gözlemler üst sınırdadır. Inter Quartile Range (IQR) hesaplamak için,

veri kümesinde birinci çeyreklik (Q1) ve üçüncü çeyreklik (Q3) hesaplanarak, aradaki fark bulunmuştur.

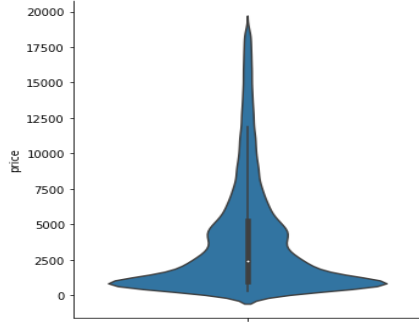
$$alt_sinir = Q1 - 1.5 * IQR \quad (1)$$

$$ust_sinir = Q3 + 1.5 * IQR \quad (2)$$

Baskılama yönteminde, aykırı 'price' değişkenlerini doldurmak için hesaplanan üst sınır değeri olan 8192.5 kullanılmıştır.

2.3 Veri kümesi üzerinde tanımlayıcı analizi

'Diamonds' isimli veri kümesi eksiği olmayan ve nispeten temiz veri içerdiği için, araştırmamızın ilk aşaması veri içindeki kalıpları, ilişkileri ve anormallikleri bulmayı içeren tanımlayıcı veri analizine ayrılmıştır. Tablo 3'te listelenen değişkenlerin veri kümesi içindeki frekansları incelenmiştir. Örneğin, veri kümesindeki kayıtlara 'cut' değişkenine göre bakıldığında, en fazla 'ideal' kesimde pırlanta olduğu, 'color' değişkenine göre bakıldığında ise en fazla 'G' renginde pırlanta olduğu görülmüştür. Her bir değişkene ait frekanslar birer histogram şeklinde çizilmiş ve ardından, bu değişkenlerin ikili ve üçlü kombinasyonları uyarınca fiyat değişikliklerine bakılmıştır. 'cut' ve 'color' değişkenleri uyarınca 'price' değişkeninin değişimini gösteren örnek bir grafik, Şekil 2'de verilmiştir.



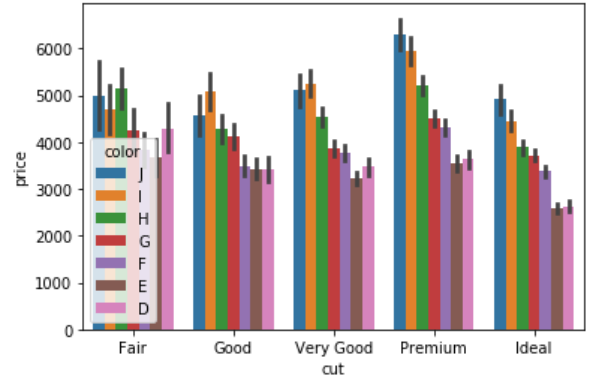
Şekil 1. 'price' değişkenine ait keman grafiği

Bu grafiklerden şuna benzer sonuçlar çıkarmak mümkündür: Hemen hemen tüm kesimler ('cut') için, 'J' rengine sahip bir pırlanta en yüksek fiyata sahiptir; ardından 'I' rengi gelmektedir. Yine bu incelemelere ek olarak, değişkenler için olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri de çizilmiştir (Şekil 3). Şekil 3'te de, 'ideal' kesime sahip olan pırlantaların ağırlığı gözlemlenebilmektedir.

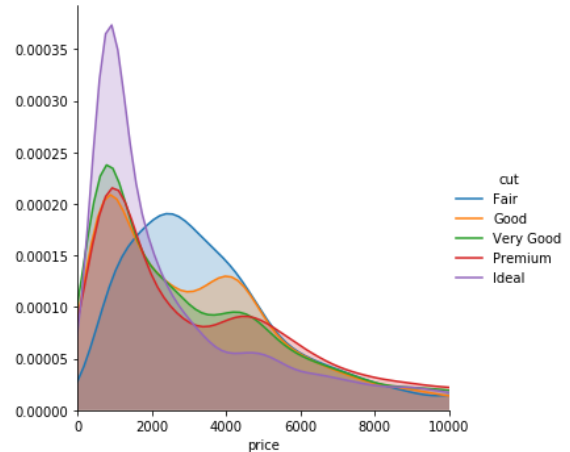
Bu değişimlere veya frekanslara bakmanın sebebi, algoritmaları çalıştırmadan önce eldeki veriyi daha iyi tanımaktır. Tüm bu grafikleri çizmek için Python programlama dili kullanılmıştır. Tanımlayıcı analizde işe yarayan araçlardan bir diğeri de çift grafiklerdir. Çift grafikler hem tek değişkenin dağılımını hem de iki nicel değişken arasındaki ilişkileri görmek için kullanılır. Çift grafik oluşturulurken histogram ve serpmme grafiklerinden yararlanılır. Şekil 4'te, değişkenlerin bazıları arasında (örneğin 'price' ve 'carat') yüksek korelasyon olduğu görülmektedir. Gerçekten de bir pırlantanın karat ağırlığının artması ile pırlanta fiyatında da belirli bir miktar artış olması

beklenir. Diğer bir yüksek korelasyon, 'price' değişkeni ile 'x', 'y', 'z' değişkenleri arasında görülen pozitif yönlü korelasyondur.

Şekil 4'teki çift grafiği, en fazla ilişkili olduğu sağlanan değişkenlerle çizilen Şekil 5'teki ısı haritasıyla birleştirildiğinde, değişkenler arasındaki korelasyonlar daha ayrıntılı şekilde saptanmıştır. Şekil 5'e göre, örneğin pırlantanın fiyatı ile karat değeri arasında 0.92 değerinde pozitif yönlü yüksek bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Yine benzer şekilde, karat değerinin 'x', 'y', 'z' değerlerini pozitif yönlü 0.95 ve daha yüksek seviyede etkilediği görülmektedir. 'x', 'y', 'z' değişkenlerinin hem kendi arasındaki korelasyonlar yüksektir; hem de bağımlı değişken olan 'price' ile de pozitif yönlü yüksek bir korelasyon saptanmıştır. Bu ilk incelemeler ışığında, fiyata etkisi yüksek olan değişkenler ayrı ayrı incelenmiştir. Örnek olarak, Şekil 6'da 'carat' ve 'price' değişkenlerinin bir arada değerlendirildiği ve boyut olarak 'clarity' değişkeninin eklendiği saçılım (scatter plot) grafiği verilmiştir. Şekil 6'da 'I1' berraklığına sahip pırlantaların karat değerinin, fiyata karşı daha duyarlı olduğu dikkat çekmektedir. Yer kısıtı sebebiyle hepsi makalede verilemese de çizilen farklı bir saçılım grafiğinde, 'Fair' kesimine sahip 'I1' berraklığında pırlantanın da, fiyata karşı oldukça duyarlı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2. 'cut' ve 'color' değişkenleri uyarınca 'price' değişkeninin değişimi



Şekil 3. 'cut' ve 'price' değişkenlerinin bir arada değerlendirildiği olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği

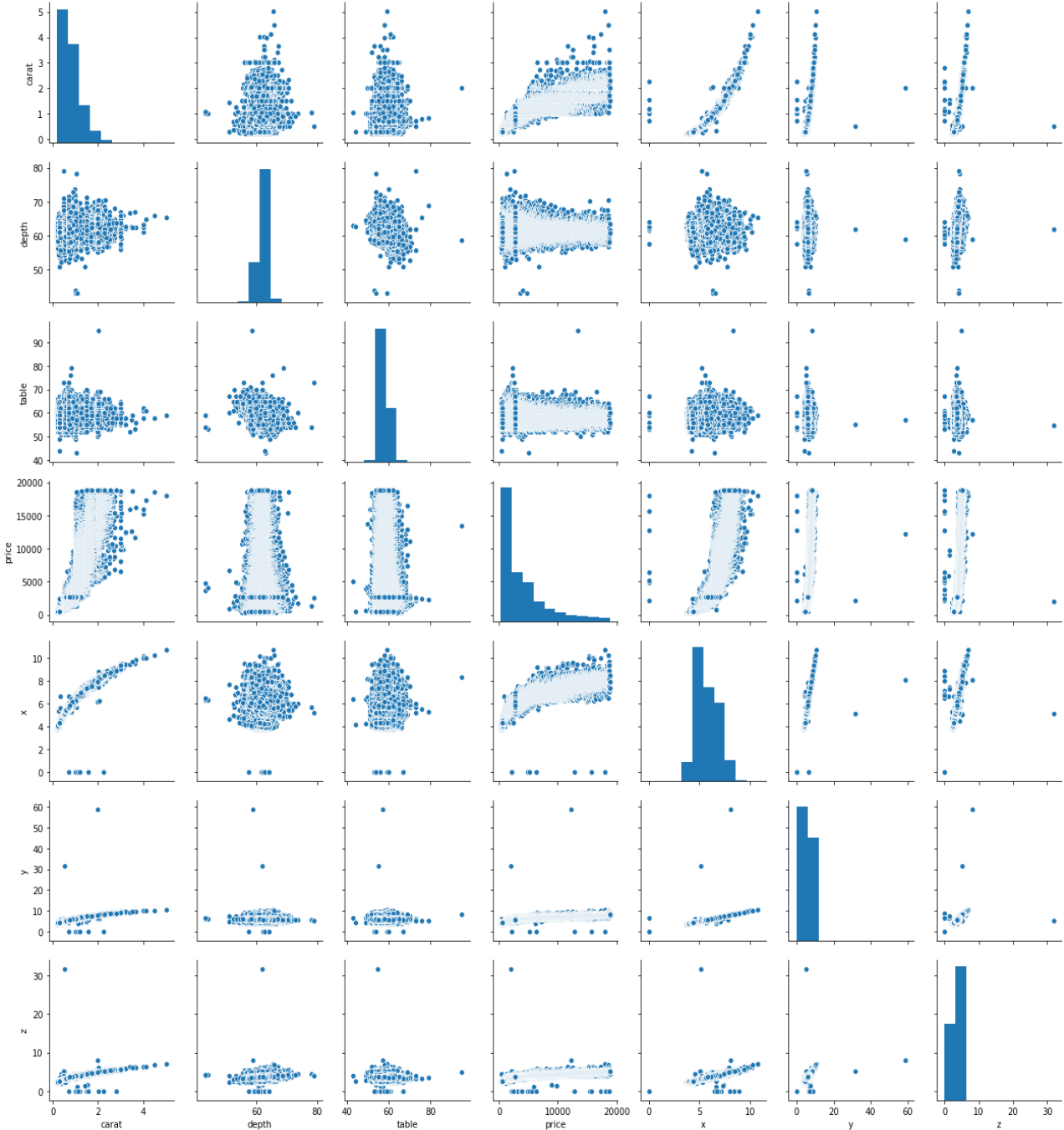
2.4 Veri kümesi üzerinde regresyon modelleri

Regresyon modelleri, iki ya da daha fazla nicel değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz yöntemidir. Bir regresyon modeli kurulduğunda, modelin veriye ne kadar 'iyi' uyduğunu bilmek gereklidir. Diğer bir deyişle, modelin bağımlı değişkenin değerini tahmin etmek için, bağımsız değişkenleri ne derece etkin kullanabildiğini anlamak gereklidir. İstatistikte bunu ölçmek için sıklıkla kullanılan iki ölçüt RMSE ve r^2 değerleridir.

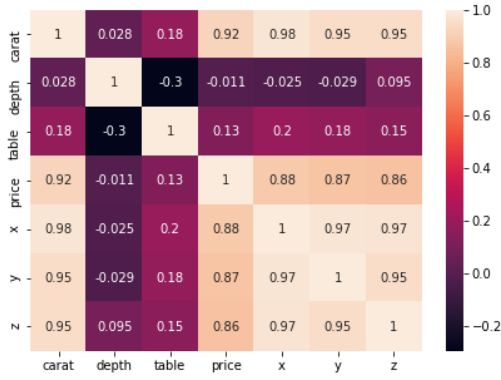
RMSE, bir model tarafından tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerleri karşılaştırır ve iki veri kümesi arasındaki farka bakarak ne kadar hata olduğunu ölçer. r^2 ,

bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni etkilediği durumların yüzdesel hacmini vererek, aralarındaki ilişkinin gücünü 0-1 aralığında gösterir. Dolayısıyla, RMSE'in mümkün olduğunca küçük, r^2 değerinin ise mümkün olduğunca büyük olması beklenmektedir. Bu çalışmada, 'Diamonds' veri kümesi için en uygun regresyon modelini belirlerken, RMSE ve r^2 ölçütlerinin ikisini bir arada değerlendirmek tercih edilmiştir [11].

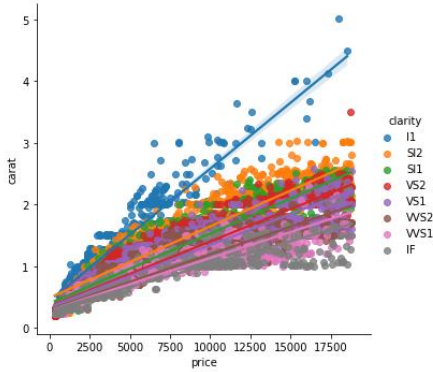
Eldeki veriye en uygun regresyon modelini belirlemek için, doğrusal ve doğrusal olmayan 12 regresyon modelleri denenmiştir.



Şekil 4. Değişkenlerin birbirleri arasındaki ilişkiyi gösteren çift grafiği



Şekil 5. Değişkenlerin birbirleri arasındaki ilişkiyi gösteren ısı grafiği



Şekil 6. 'carat' ve 'price' değişkenlerinin bir arada değerlendirildiği ve boyut olarak 'clarity' değişkeninin eklendiği saçılım grafiği

Veri ön işleme bölümünde elde edilen üç farklı veri kümesine (df_{sil} , df_{median} ve df_{baski}) ek olarak, herhangi bir veri ön işleme sürecinden geçirilmeden, sadece üzerinde kategorik değişkenlerin kukla değişkenlere dönüştürülme işlemi uygulanan ham veri kümesi (df_{ilk}) kullanılarak, ilkel RMSE ve r^2 değerleri hesaplanmıştır. Bunu yaparken, RMSE değeri hesaplanmadan önce her bir veri kümesi *hold-out* yöntemi uygulanarak, %75 eğitim, %25 test olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Modeller eğitim veri kümesinde parametrelerinde değişim yapılmaksızın (ilkel) kurulmuş ve test veri kümesi ile kurulan modellere ait RMSE ve r^2 değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen dört veri kümesi kullanılarak ayrı ayrı tüm regresyon modellerine ait RMSE değerleri hesaplanmış, bu veri kümelerinden en düşük RMSE değerinin df_{sil} (aykırı değerlerin veri kümesinden silindiği)'e ait olduğu görülmüştür. Bu işlemle, aykırı gözlemlerin makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak yapılan tahminlerinde yanlılığa ve tahminler üzerinde sapmalara neden olduğu, anomali yaratan değerlerin veri kümesinden silindiğinde daha düşük hata değerleri elde edilmesiyle bir kez daha doğrulanmıştır. Bir sonraki adımda, hiperparametreler üzerinde optimizasyon işlemleri bu veri kümesi (df_{sil}) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aykırı değerlerin silindiği veri kümesinin tüm modeller için RMSE ve r^2 değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Modelleri optimize etme işleminde k-katlı çapraz doğrulama (*k-fold cross validation*) yönteminden yararlanılmıştır. Algoritmaların hiperparametrelerine rassal bazı değerler verilip ('k' kez), farklı parametre değerleri ile çaprazlama işlemi yapılarak test edilmiştir. İşlemin sonunda en iyi (yani en düşük) RMSE değerini veren parametre seçilip, model tekrar kurulmuştur. Bu yeni kurulan modele de ayarlanmış model denilmiştir. Kullanılan tüm algoritmalar için, veri kümesinde bulunan gözlem sayıları da göz önünde bulundurularak kat (*k*) 10 olarak seçilmiştir. Her bir regresyon algoritması için optimum hiperparametre değerini bulmakta, *scikit-learn* kütüphanesinde yer alan *GridSearchCV* fonksiyonundan yararlanılmıştır. 'Diamonds' veri kümesi üzerinde farklı regresyon modelleri denenmiş ve en başarılı iki tanesi RMSE ve r^2 değerleri ile Tablo 4'te gösterilmiştir. Light GBM modeli, diğer *boosting* modelleri ile karşılaştırıldığında, işlem hızının ve tahmin oranının yüksek olması ve bununla beraber RAM kullanımının düşük olması ile ayrılmaktadır. Aralarında en iyi performans, Light GBM modelinden elde edilmiştir. Light GBM'den sonra performansı yüksek olan algoritma rassal orman olmuştur. Bu sonuç, Tablo 1'de verilen benzer çalışmalar ile de uyumlu çıkmıştır. Bu iki modele ait uygulama ayrıntıları aşağıda verilmiştir

2.4.1 Rassal ormanlar (random forest - RF)

Kurulan ilkel *rf_model*'in hazır hiperparametre değerleri aşağıda verilmiştir:

```
RandomForestRegressor(bootstrap = True, ccp_alpha = 0.0, criterion = 'mse', max_depth = None, max_features = 'auto', max_leaf_nodes = None, max_samples = None, min_impurity_decrease = 0.0, min_impurity_split = None, min_samples_leaf = 1, min_samples_split = 2, min_weight_fraction_leaf = 0.0, n_estimators = 100, n_jobs = None, oob_score = False, random_state = 42, verbose = 0, warm_start = False)
```

Kurulan ilkel model üzerinden hesaplanan ilkel hata değerini optimum hale getirmek için çapraz doğrulama kullanıldığında, optimum değerler olarak, *max_depth* 500, *max_features* 20, *min_samples_split* 40, *n_estimators* 1000 olarak bulunmuştur. Bu değerler kullanılıp, eğitim veri kümesiyle rassal ormanlar algoritmasıyla model tekrar kurulduğunda (*rf_tuned_model*), test veri kümesi için modelin hesapladığı RMSE değeri 374.797 olmuştur. Bu modelin optimizasyonunun hata oranını düşürmediği, ama az da olsa r^2 değerinde bir artış yarattığı görülmüştür. Karar ağaçlarında olduğu gibi, bağımsız değişken önem seviyeleri rassal ormanlar modelinde de mevcuttur. Önem seviyelerine bakıldığında, yine 'y' değişkeninin üstünlüğü göze çarpmıştır.

2.4.2 Light GBM

XGB algoritmasının eğitim ve tahmin performansını arttırabilmesi için 2017 yılında Microsoft tarafından LightGBM algoritması geliştirilmiştir [12]. Kurulan ilkel modelin (*lgb_model*) hazır hiperparametre değerleri aşağıda verilmiştir:

LGBMRegressor(boosting_type = 'gbdt', class_weight = None, colsample_bytree = 1.0, importance_type = 'split', learning_rate = 0.1, max_depth = -1, min_child_samples = 20, min_child_weight = 0.001, min_split_gain = 0.0, n_estimators = 100, n_jobs=-1, num_leaves = 31, objective = None, random_state = None, reg_alpha = 0.0, reg_lambda = 0.0, silent = True, subsample = 1.0, subsample_for_bin = 200000, subsample_freq = 0)

Tüm ağaç modellerinde olduğu gibi LightGBM modeli için de model öğrenme süresine etki eden bağımsız değişkenlerin sayısı, bağımlı değişkeni etkileme oranına değerleri üzerinden yapılmıştır. Kurulan modelin optimizasyonu için GBM ve XGB algoritmalarındaki parametrelerle benzerlik gösteren hiperparametreler seçilmiştir. Bu doğrultuda, *colsample_bytree* ve *subsample* gibi örnek alt ağaç kümeleri için kullanılan parametreler hazır değerleriyle kullanılmış olup, üzerinde çapraz doğrulama yapılarak optimumu bulunan hiperparametreler ve değerleri şöyle olmuştur: *learning_rate* 0.1, *max_depth* 500 ve *n_estimators* 500. Bu optimum değerlerle, LightGBM algoritmasıyla model tekrar kurulduğunda oluşan *lgb_tuned_model*in test veri kümesi için hesapladığı RMSE değeri, %5.7 oranında bir azalma göstererek 352.187 olmuştur (Tablo 4).

Algoritmaların performanslarını daha yakından incelemek amacıyla, Light GBM ile rassal orman algoritması, her bir *k* değerinde verdiği RMSE ve r^2 değeri ile birlikte Tablo 5'te sunulmuştur.

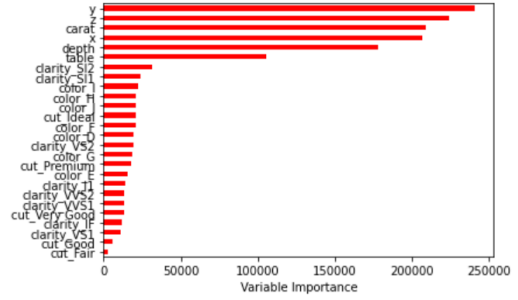
3 Tartışma ve sonuç

Kullanılan doğrusal modeller için, optimizasyon yapılmamıştır. Tüm optimize edilmiş algoritmalar arasında en düşük hata oranı Light GBM'de görülmüştür. Light GBM'in aynı zamanda en yüksek r^2 değerlerinden birini verdiği de gözlemlenmiştir. Light GBM için önem sırasındaki ilk beş değişken şu şekilde çıkmıştır: *y*, *z*, *carat*, *x*, *depth* (Şekil 7). Akademik yazında, 'Diamonds' veri kümesi üzerinde çeşitli algoritmalar kullanmış çalışmalar, Tablo 1'de verilmiştir. Bu çalışmaların hiçbirinde

yöntemlerin uygulama ayrıntıları verilmemiştir; dolayısıyla bu çalışmaların tekrar edilmesi mümkün değildir.

Bu makaledeki çalışma, verinin ön işlemeden geçirilmesi, tanımlayıcı analizin yapılması, modellerin hem ilkel, hem optimize edilmiş halleriyle hata oranlarının ölçülmesi ve uygulama ayrıntıları verilerek tekrar edilebilirliği sağlaması bakımlarından diğerlerinden ayrılmaktadır. Aynı veri kümesi üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuç farklılıkları ise, modelin optimize edilmesinin ve verinin temizlenmesinin, elde edilen hata oranını düşüreceğini ve en performanslı algoritmanın seçimini doğrudan değiştirebileceğini ispatlamaktadır.

İleriki çalışmalarda, kullanılan veri çoğaltılarak, genişletilmiş veri kümesinin sonuçlara etkisine bakılabilir. Veri çoğaltmak için öğrenme veri kümesinde yer alan gözlemlerin şansa bağlı olarak seçilerek minör ve majör sınıfsal denge kurulana kadar çoğaltılması yöntemi seçilebilir. Bu şekilde veri kümesinin yetersizliği problemi bertaraf edilebilir. Bunun dışında, kullanılan özelliklerin sayısını azaltmak ve en etkin özellik alt kümesini bulabilmek için, Temel Bileşenler Analizi veya Ortak Faktör Analizi yöntemlerinden faydalanılabilir.



Şekil 7. *lgb_model*indeki bağımsız değişkenlerin önem sırası

Tablo 4. En başarılı regresyon modellerinin ilkel ve optimize edilmiş RMSE ve r^2 değerleri ile karşılaştırılması

Regresyon modeli	İlkel modelin RMSE değeri	İlkel modelin r^2 değeri	Optimize edilmiş modelin RMSE değeri	Optimize edilmiş modelin r^2 değeri	RMSE değişimi (%)	r^2 değişimi (%)
Rassal Orman	370.480	0.981	374.797	0.980	1.2	-0.1
Light GBM	373.616	0.983	352.187	0.984	-5.7	0.1

Tablo 5. Seçilen iki algoritmaya ait k-kat değeri değişimine göre RMSE ve r^2 değerleri

	k=1		k=2		k=3		k=4		k=5		k=6	
	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2
Rassal Orman	363.271	0.982	374.189	0.981	366.297	0.982	407.796	0.978	392.53	0.979	364.670	0.982
Light GBM	367.612	0.981	376.857	0.980	366.862	0.982	403.239	0.978	388.805	0.980	365.469	0.982
	k=7		k=8		k=9		k=10		Ortalama			
	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2	RMSE	r^2		
Rassal Orman	377.991	0.981	368.635	0.982	373.723	0.981	358.873	0.983	374.797	0.981		
Light GBM	371.041	0.982	370.386	0.982	364.896	0.982	360.992	0.983	373.616	0.981		

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] Kaggle Diamonds Dataset. <https://www.kaggle.com/shivam2503/diamonds>, Accessed 02 March 2022.
- [2] G. Sharma, V. Tripathi, M. Mahajan and A. K. Srivastava, Comparative analysis of supervised models for diamond price prediction. Proceedings of 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), pp. 1019-1022, Uttar Prades, India, 2021.
- [3] W. Alsuraihi, E. Al-hazmi, K. Bawazeer and H. Alghamdi, Machine learning algorithms for diamond price prediction. Proceedings of 2nd ACM International Conference on Image, Video and Signal Processing (IVSP '20), pp. 150–154, Singapur, 2020.
- [4] A. C. Pandey, S. Misra and M. Saxena, Gold and diamond price prediction using enhanced ensemble learning. Proceedings of 12th International Conference on Contemporary Computing (IC3), pp. 1-4, Noida, India, 2019.
- [5] H. Mihir, M. I. Patel, S. Jani and R. Gajjar, Diamond price prediction using machine learning. Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Communication, Computing and Industry 4.0 (C2I4), pp. 1-5, Bangalore, India, 2021.
- [6] N. Monburinon, P. Chertchom, T. Kaewkiriya, S. Rungpheung, S. Buya and P. Boonpou, Prediction of prices for used car by using regression models. Proceedings of 5th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR), pp. 115-119, Thailand, 2018.
- [7] C. R. Madhuri, G. Anuradha and M. V. Pujitha, House price prediction using regression techniques: A comparative study. Proceedings of International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS), pp. 1-5, Madras, India, 2019.
- [8] M. C. Satioğlu, Y. Ar ve B. Tuğrul, Automobile price prediction in Turkey marketplace with linear regression. Proceedings of 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), pp. 329-333, Turkey, 2021.
- [9] V. Gupta, K. Singh, S. K. Arjaria and B. Biswas, Dynamic pricing in movie tickets using regression techniques. Proceedings of International Conference on Advanced Computation and Telecommunication (ICACAT), pp. 1-4, India, 2018.
- [10] G. K. Kumar, D. M. Rani, N. Koppula and S. Ashraf, Prediction of house price using machine learning algorithms. Proceedings of 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), pp. 1268-1271, India, 2021.
- [11] G. Yin, F. J. I. Alazzawi, S. Mironov, F. Reegu, A. S. El-Shafay, M. L. Rahman, C. H. Su, Y. Z. Lu and H. C. Nguyen, Machine learning method for simulation of adsorption separation: Comparisons of model's performance in predicting equilibrium concentrations, Arabian Journal of Chemistry. 15 (3), 103612, 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103612>.
- [12] LightGBM, <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/lightgbm/>, Accessed 03 March 2022.





Doğal dil işleme yöntemleriyle metinden SQL sorgusu tahmini üzerine bir çalışma

A study on text-to-SQL query prediction with natural language processing methods

Asım Sinan Yüksel¹ , Muhammed Abdulhamid Karabiyik^{2,*} 

^{1,2} Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta Türkiye

Öz

Bilgisayar bilimlerinde, kalıcı bilgiler sistematik bir şekilde veri tabanlarında tutulmaktadır. Veri tabanlarındaki bilgilere ulaşılabilmesi için belirli teknik birikimlere sahip olunması gerekmektedir. Çalışmamızda, doğal dille yapılmış sorgulardan SQL sorgusu tahmini yapılmıştır. Bu sayede teknik bir bilgi birikimi olmadan veri tabanları üzerinde sorgulamalar yapılabilmesi hedeflenmektedir. Çalışmamızda doğal dil işleme tekniklerinden faydalanmıştır. Doğal dil işlemenin ana konularından biri olan çoklu dil desteği, uygulamaya entegre edilmiştir. Doğal dilden SQL tahmini için uygulanan model, LSTM ağı kullanılarak spider veri setiyle eğitilmiştir. Yapılan SQL sorgusu tahminlerinde, %75 başarı oranına ulaşmıştır. Çoklu dil desteğiyle yapılan genel sistem değerlendirmesinde, başarı oranı %69.4' e ulaşmıştır.

Anahtar kelimeler: Doğal dil işleme, Yapay zekâ, Metinden SQL dönüşümü

1 Giriş

Yeni bir teknolojinin gelişimi, belirli adımları izlemektedir. Yeni bir teknoloji ilk oluşturulduğunda, sadece geliştiricileri tarafından etkili bir şekilde kullanılabilir. Zamanla teknik yeterlilikleri olan kişiler tarafından kullanılabilir. Gelişimini tamamlayan teknolojiye toplumun geneli tarafından kullanılmaktadır. Bilgisayar bilimlerinde üretilen birçok teknolojinin kullanımında, teknik yeterliliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Doğal dil işlemenin (DDİ) gelişmesiyle beraber, önümüzdeki zamanlarda birçok teknoloji kullanımı için teknik yeterlilikler gerekmeceği açıktır.

Doğal dil işleme, insan bilgisayar etkileşiminde kullanılan en önemli alanlardan biridir. Bu sebeple çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu alanlara şu örnekleri verebiliriz; yazım düzeltme, metin okuma, yazar tahmini, metin özetleme, bilgi çıkarımı, metin ses dönüşümü, ses metin dönüşümü, sesli komutlar, diller arası çeviri vb. birçok alan örnek olarak verilebilir [2].

Bu çalışmada, doğal dil işleme tekniklerinden yararlanılarak çoklu dil desteği sağlayan, bir metinden SQL dönüşümü sistemi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistemin çoklu dil desteği Google Translate API'si kullanılarak uygulanmıştır. Metinden SQL dönüşümünde kullanılan modelin geliştirilmesinde yapay sinir ağı temelli LSTM

Abstract

In computer science, permanent information is kept in databases in a systematic way. In order to access the information in the databases, it is necessary to have certain technical knowledge. In our study, SQL query estimation was made from natural language queries. In this way, it is aimed to make queries on databases without any technical knowledge. In our study, natural language processing techniques were used. Multi-language support, which is one of the main subjects of natural language processing, is integrated into the application. The model applied for natural language SQL prediction is trained with the spider dataset using the LSTM network. In the SQL query estimations, it has reached 75% success rate. In the overall system evaluation with multilingual support, the success rate has reached 69.4%.

Keywords: Natural language processing, Artificial intelligent, Text to SQL

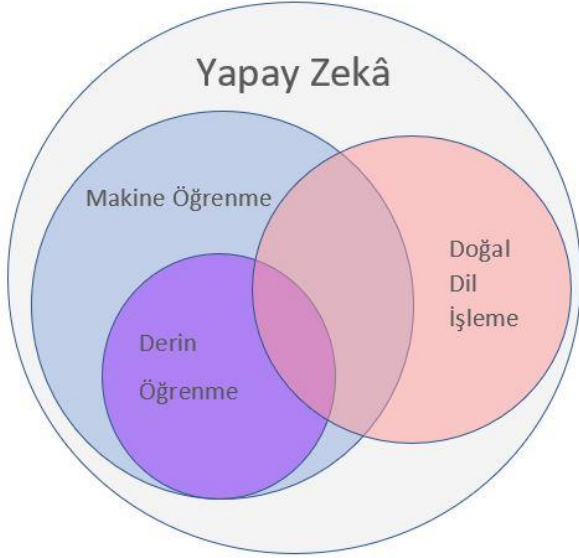
(Long Short Term Memory) modeli kullanılmıştır [3]. Modelin eğitiminde spider veri setinden faydalanılmıştır [4]. Anlamsal ayrıştırma tabanlı olarak geliştirilen, metinden SQL dönüşümü sistemlerinde farklı yaklaşımlar mevcuttur. Çalışmamızdaysa, yarı otoregresif bir model olan SmBoP (Semi-autoregressive Bottom-up Semantic Parsing)'dan yararlanılmıştır [5]. SmBoP, Lily (Language, Information, and Learning at Yale) laboratuvarı tarafından yapılan kıyaslamalarda %71.1 doğruluk oranıyla 3. Sırada yer almaktadır. Çalışmamızda SmBop python programlama dilini desteklemesi, karmaşık yapıda olmayan veri tabanlarındaki başarılı sonuçları ve çoklu dil desteğinin entegre edilebilmesinden dolayı tercih edilmiştir [6].

Çalışmamız genel olarak doğal dil işleme problemlerinden makine çevirisine odaklanmıştır. Makine çevirisi olarak çalışmamızda çoklu dil desteği ve metinden SQL'e dönüşüm vardır. Çoklu dil desteğinde 33 adet doğal dilden İngilizceye çeviri mevcuttur. Yapılan deneyde, Türkçeden İngilizceye yapılan çeviri işlemlerinden %83.3'lik bir başarıya ulaşılmıştır. Bir diğer Makine Çeviri konusu olan metinden SQL'e dönüşüm probleminde, spider veri seti içerisinde bulunan veri tabanları üzerinde yapılan metinden SQL sorgusu dönüşümünde %75'lik bir başarı sağlanmıştır. Sistemin genelinde yapılan deneyde ise Türkçe

girilen bir doğal dil sorgusunun SQL' e dönüşümünde %69.4'lik bir başarı oranına ulaşılmıştır.

2 Doğal dil işleme

Doğal dil işleme, insanların konuşma dillerini analiz eden, anlamaya çalışan bir yöntemdir [7]. Yapay zekanın alt kolu olarak görülebilecek olan DDİ, aynı zamanda makine öğrenmesi ve alt kolu olan derin öğrenme yöntemlerini de kullanmaktadır. Şekil 1'de DDİ'nin hiyerarşik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1. Doğal dil işleme hiyerarşik yapısı.

DDİ, amaç ve yöntemlere göre kendi içinde 2 grupta incelenebilir. Bunlar; doğal dil oluşturma (Natural Language Generation), doğal dil anlama (Natural Language Understanding) konularıdır. DDİ konuları giriş ve çıkış değerlerini içermektedir. Doğal dil anlama, bilgisayar sistemine gönderilen giriş değerini anlamak için çalışırken, doğal dil oluşturma bilgisayar sisteminin sonuçlarını insanların anlayacağı bir şekilde sunmaya çalışmaktadır [8].

Alan Turing tarafından 1950 yılında ortaya konan Turing testi, bir makinenin düşünüp düşünemediğini anlayabilmeyi amaçlamaktadır. Bu testte sorulan sorulara cevap veren bir insan ve bir bilgisayar sistemi vardır. Cevap verenin insan mı yoksa bilgisayar mı olduğuna karar verilemiyorsa, test başarılı kabul edilmektedir [9]. Bu testle beraber yapay zekâ ile ilgili birçok problem ortaya çıkmıştır. Bunlardan birisi de doğal dil işlemenin temel konusu olan insan bilgisayar iletişimidir.

DDİ'nin temelleri 1940 ve 1960 yılları arası atılmıştır. Bu dönemde çalışmalar makine çevirisi üzerine odaklandı. İlk olarak İngilizce-Rusça çeviri üzerine ilkel bir uygulama geliştirilmiştir. Bu dönemin sonunda, Teddington Uluslararası Dillerin Makine Çevirisi ve Uygulamalı Dil Analizi Konferansında DDİ için temel olan konular ortaya çıkmıştır. Bu konular ise; morfoloji, söz dizimi, anlam, yorumlama ve oluşturma olarak belirlenmiştir [10].

1960 ve 1970 yılları arasına geldiğinde DDİ alanında somut ilerlemeler yaşanmıştır. Bu ilerlemeler DDİ alanında

çalışanları motive etmiştir. Eş zamanlı ilerleyen yapay zekâ gelişmeleriyle beraber DDİ, yapay zekâ yöntemlerini kullanmaya başlamıştır. Dönemin önemli projelerinden birisiyse ARPA (Advanced Research Projects Agency) konuşma anlama projesidir [11]. Konuşma anlama projesinde, en başarılı sonuç Harpy sistemi tarafından alınmıştır. Harpy sisteminde 1.000 kelimelik bir sözlük yapısı kullanılmıştır. Sistem basit düzeyde kurulan konuşma cümlelerinin %90'lık bir bölümünü anlamayı başarmıştır [12].

1970 ve 1980 yılları arasında, hesaplamalı dilbilgisi teorisi çok önemli bir alan haline gelmiştir. Bu alan doğal dil üzerinde etkileri bulunan vurgu, tonlama, niyet gibi etkenlerin anlam üzerine etkilerini incelemektedir [13]. Bu dönemde Stanford Araştırma Enstitüsü (SRI) tarafından geliştirilen Çekirdek Dil Motoru ön plana çıkmaktadır. SRI Çekirdek Dil Motoru, anlamsal ve ilişkisel bir yaklaşımla oluşturulmuştur. SRI çekirdek dil motorunun geliştirilmesiyle birlikte, cümlenin öğeleri belirlenmiş, öğelerin sıralamaları tespit edilmiş ve kelimeler anlamsal olarak sınıflandırılmıştır [14].

1980' den makine öğrenmesi yönteminin gelişmesine kadar olan dönemde, DDİ gelişiminde ortaya atılan temel metodların çoğunluğu, teorik uygulamalardan pratiğe dönmeye başlamıştır. Farklı dillerde doğal dil çalışmaları yapılmıştır [15]. 2000'li yıllardan sonra makine öğrenmesinin alt kolu olan derin öğrenme yaygınlaşmaya başlamıştır. Derin öğrenme, birçok alan için yenilikçi çözümler getirmiştir. DDİ süreçlerinde derin öğrenme metodları etkili olarak kullanılmaktadır.

2.1 Doğal dil işlemenin uygulama alanları

DDİ uygulamalarını, gündelik hayatımızda sıklıkla kullanılmaktadır. Çevrimiçi bankacılık işlemlerindeki sesli yanıt sistemleri, metin düzenleme araçları, arama motorları gibi örnekler verilebilir. Büyük firmalar da DDİ konusuna büyük yatırımlar yapmaktadır. Google Assist, Siri, Alexa gibi uygulamalar günümüzde oldukça popülerdir.

Metin sınıflandırma konusu DDİ'nin önemli problemlerinden biridir. Özellikle günümüzde etiketlenilmemiş metinlerde kullanımı çok fazladır. Nigam ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Makine Öğrenmesi tekniklerinden faydalanılarak metin sınıflandırma yapılmıştır. Etiketli metinlerle eğitilen sistem Sade Bayes sınıflandırıcılarıyla kategorilere ayrılmıştır [16].

Bilgisayar kullanıcılarının çok sık rastladığı konulardan biri olan yazım denetimi, DDİ konularından biridir. Yazım denetimiyle ilgili olarak yaygın birçok metin düzenleyici program içeriğinde yazım denetimine yer vermektedir. WhiteLaw ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada dil bağımsız otomatik bir yazım düzeltme uygulaması üzerine çalışmışlardır. Çalışma, web sitelerindeki yazım kurallarını temel olarak düzeltme ve hata tespiti yapmaktadır [17].

Sesli konuşma DDİ'nin önemli bir giriş değeridir. Gündelik kullanımda olan Google Assist, Siri gibi uygulamalarda sıkça rastlanmaktadır. Bu sebeple konuşma tanıma konusu üzerine çok fazla araştırma yapılmaktadır. Xiong ve arkadaşlarının geliştirmiş oldukları Microsoft Etkileşimli Konuşma Tanıma Sistemi buna örnek

gösterilebilir. Yapılan sistem CNN (Convolutional Neural Network) ve BLSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory) modelleri kullanarak oluşturulmuştur [18]. Karşılıklı yapılan bir konuşmanın tanımlanması, konuşma tanımanın zor kısımlarından biri olarak görülmektedir [19].

Karakter tanıma, DDİ giriş değerlerinden bir tanesidir. Karakter tanıma, el yazısı tanıma, resim üzerindeki yazıları okuma gibi alanlarda kullanılmaktadır. Qadri ve Asif'in araç plakaları üzerine yapmış oldukları optik karakter tanıma çalışmaları bu alana örnek gösterilebilir [20].

Makine çevirisi DDİ'nin ilk problemlerinden biridir. Yıllar içinde kendini çok fazla geliştirmiş DDİ alanlarından biridir. Makine çevirisine örnek olarak, Google translate, yandex translate gibi çeviri uygulamalarını gösterebiliriz. Han ve arkadaşlarının yaptığı simültane çeviri uygulaması, makine çevirisi üzerine farklı bir uygulama olarak gösterilebilir. Amaç olarak yabancı bir dilde yapılan konuşma, video görüntüsü, ses kaydı gibi girdi değerlerini anlık olarak hedef dile çevirmeyi amaçlamıştır [21].

İnsan bilgisayar etkileşiminde, önemli bir konu soru cevaplama değildir. DDİ'nin ana konularından biri olan soru cevaplama konusunda IBM Watson sistemi geliştirilmiştir. IBM Watson, geniş konularda soruları cevaplayabilmektedir. IBM Watson, Jeopardy adlı bilgi yarışmasına katılmıştır. IBM Watson, bu yarışmanın daha önceki kazananlarıyla mücadele etmiş ve yarışmayı rekor kırarak kazanmıştır [22].

2.2 Doğal dil işlemede ön işlemler

DDİ için kullanılacak olan giriş değerleri belirli ön işlemlerden geçirilmektedir. Bu işlemler, dilin işlenmesi için gerekli standartları sağlamak için önemlidir. Ön işlemede kullanılan yöntemlere bu bölümde kısaca yer verilmiştir. Ön işleme yöntemleri, ana probleme göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Yazım kontrolü (Spelling Corrector), özellikle giriş değerinin doğruluğunu sağlaması için önemlidir. Giriş değerinde yapılan yazım yanlışları, dilbilgisi sıralamaları ve anlamsal çıkarımlarda hatalara sebep olabilir [23]. Yazım düzenleme, hatasız metin tabanlı iletişim ve metin işleme için çok önemli bir ön işleme adımındır [24].

Doğal dil olarak sisteme dahil edilen giriş değerinin işlenebilmesi için parçalara bölünmesi gerekmektedir [25]. Bu bölme işlemi iki aşamalı düşünülebilir. Birinci aşama, Cümle Bölme (Sentence Splitter), giriş değeri birden fazla cümleden oluşan metinleri cümlelere bölme işleminin yapılmasıdır [26]. İkinci aşama, Bölütleme (Tokenization), giriş değeri olan cümlelerde kullanılan tüm parçaları ayrıştırarak sembolleştirir [27]. Bölütleme işleminden sonra cümle içerisinde kullanılan kelime, bağlaç ve noktalama işaretleri ayrı birer parça olarak kullanılabilir.

Konuşma parçası etiketleme (Part of Speech Tagging), cümledeki sözcüklerin sıfat, zamir, fiil vb. kullanımlarının etiketlenmesi işlemidir [28]. Bu ön işlem özellikle metin oluşturma gibi problemlerdeki sözdizimi uygulamalarında kullanılmaktadır [29].

Kök Bulma (Word Stemming), kelimenin en temel haline getirilme işlemidir. Kök bulma metin özetleme, sınıflandırma ve kümeleme gibi problemlerin çözümünde

kullanılan bir ön işlemdir. Kök hale getirilmiş bir kelime, ekli bir kelimedenden daha geniş bir anlamı kapsamaktadır [30]. Geniş bir anlamı kapsayan kök, kendinden türeyen bütün alanları kapsamaktadır. Bu sebeple, genelden özele bir yönlendirme yapmaya imkân sağlamaktadır. Genelden özele bir yaklaşım, soru cevap ve metin oluşturma problemlerinde çözüm kolaylığı sağlamaktadır.

İsimlendirilmiş varlık tanıma (Named Entity Recognition), cümle içinde kullanılan sözcüklerin önceden belirlenmiş sınıflara göre etiketlenmesidir [31]. Bu etiketler her çalışmada farklılıklar gösterir, ancak genellikle özel isim, bitki, nesne vb. şekillerde karşımıza gelmektedir [32].

Matematiksel temsil, doğal dil üzerinde aritmetik işlemleri gerçekleştirebilmemiz için gerekli bir ön işlemdir. Matematiksel temsilde kelimelerin vektörlere dönüşümü gerçekleştirilir [33]. Vektör dönüşümü yapılırken çeşitli alt yöntemlerden faydalanılmaktadır. Bu alt yöntemlerden gereksiz kelimeler (Stop Words), anlamsal etkisi olmayan cümle parçalarının ön işleme aşamasında çıkarılması işlemidir [34]. Matematiksel temsil için kullanılan vektörlerin boyutlarının aşırı büyümesini önleyerek performansa olumlu etkileri olmaktadır. Doğal dil, anlamsal yönden ele alındığında tek kelime üzerinden işlem yapmak yanıltıcı olmaktadır. Doğal dilde kullanılan isim tamlamaları, sıfat tamlamaları gibi kelime gruplarına da dikkat etmek gerekmektedir. Bu tip durumlarda n-gram algoritması ve sözlükler kullanılabilir [35].

2.3 Doğal dil işlemede kullanılan kütüphaneler ve araçlar

Yaklaşık yarım asırlık DDİ çalışmalarının sonucu olarak, günümüzde kullanıma açılmış birçok yazılım kütüphanesi mevcuttur. Bu bölümde yaygın olarak DDİ sürecinde kullanılan kütüphaneler incelenmiştir. Tablo 1'de yaygın kullanılan DDİ kütüphanelerinin karşılaştırmaları gösterilmektedir.

DDİ için geliştirilen kütüphanelerin çoğunda ön eğitilmiş dil modelleri desteklenmektedir. Google tarafından yayınlanan BERT (Bidirectional Encoder Representations From Transformers) adı verilen dil modeli paydaşlarından farklılık göstermektedir. Bu dil modeli kelimeleri tek tek işlemek yerine bütün olarak ele alarak ilişkisel bir işleme yöntemi geliştirmiştir. BERT kullanılarak yapılmış çalışmalarda başarı oranlarının yüksek olduğu görülmektedir.

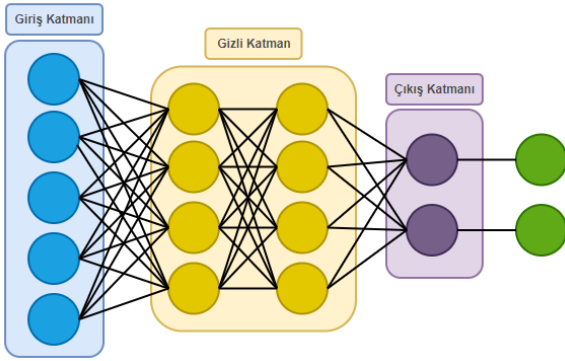
Doğal dil ifadelerinin tekrarlı yapıları göz önüne alındığında sık kullanılan yöntemlerden birisi de RNN (Recurrent Neural Network)'dir. RNN yinelemeli bir yapay sinir ağı modelidir. RNN, diğer sinir ağı modellerinden farklı olarak giriş çıkış değerleri arasındaki ilişkidir. RNN giriş çıkış değerleri arasındaki ilişkiler, tekrarlı yapıda olan doğal dil ifadeleri için performans artışı sağlamaktadır.

Geri beslemeli bir sinir ağı olan RNN, giriş ifadelerinin uzun olduğu durumlarda performans olarak yeterli gelmemektedir. Bu sebeple, LSTM (Long Short Term Memory) sinir ağı modeli geliştirilmiştir.

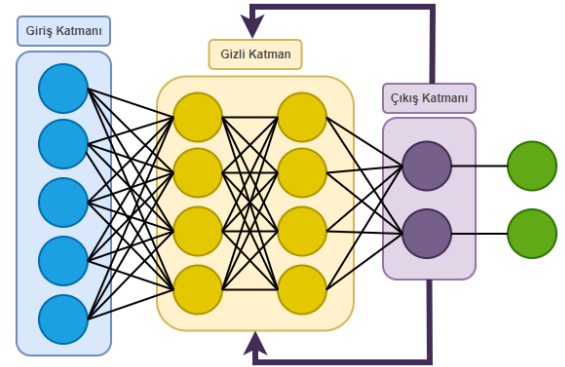
Tablo 1. Yaygın kullanılan DDİ kütüphaneleri ve işlem destekleri

	NLTK	SpaCy	Sparc NLP	OpenNLP	Stanford Core NLP	Zemberek	İTÜ NLP
Bölütme	x	x	x	x	x	x	x
Konuşma Parçası Etiketleme	x	x	x	x	x	x	x
İsimlendirilmiş Varlık Tanıma	x	x	x	x	x	x	x
Yazım Kontrolü			x				x
Kök Bulma	x	x	x	x	x	x	x
Ön Eğitimli Modeller	x	x	x	x	x		x
Programlama Dili	Python	Python	Java,Python	Java	Java	Java	Java
Türkçe Desteği						x	x

Şekil 2’de sinir ağı modeli ve Şekil 3’te yinelemeli sinir ağı modeli gösterilmektedir [36].



Şekil 2. Sinir ağı modeli

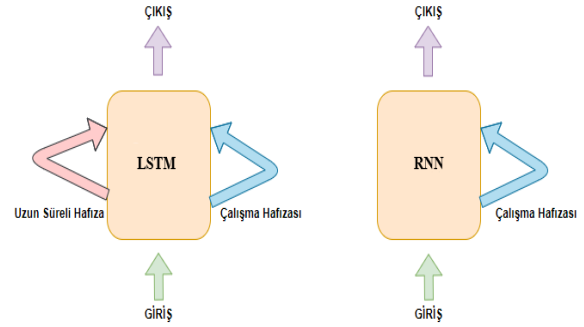


Şekil 3. Yinelemeli sinir ağı modeli.

Genel olarak LSTM, RNN modeline çok yakın bir modeldir. LSTM modelinde, hangi bilgileri gerekli hangi bilgileri diğer hücrelere taşınacağına karar veren kapılar mevcuttur. Bu kapılar uzun olan doğal dil ifadelerinin işlenmesine yardımcı olmaktadır. LSTM, DDİ işlemlerinde çok sık kullanılan bir modeldir. Şekil 4’te RNN ve LSTM modelleri gösterilmiştir [37].

Doğal dil ifadelerinin işlenmesinde, derin öğrenmeden yararlanılacak durumlar için hazırlanmış kütüphaneler mevcuttur. Bunların en çok kullanılanlarına ise; AllenNLP,

Fairseq, ParlAI ve Pattern kütüphaneleri örnek gösterilebilir [38-41].



Şekil 4. RNN ve LSTM çalışma modeli.

3 Metinden SQL sorgusu tahmini üzerine yapılan çalışmalar

Metinden SQL sorgusu tahmini üzerine yapılan çalışmalar, veri tabanında bulunan tablolar ve bu tabloların aralarındaki ilişkilerine göre ele alınmaktadır. Öncü çalışmalar tek tablo üzerinde sorgu tahmini yaparken, gelişmiş çalışmalar ilişkisel tablolar üzerinde sorgu tahmini yapmaktadır. Çalışmaların performansları ve eğitimleri için gereklilik duyulan bir araç da veri setleridir. Çalışmamızın bu bölümünde Metinden SQL tahmini konusunda kullanılan veri setleri ve uygulanan modeller açıklanmıştır.

3.1 Veri setleri

WikiSQL, doğal dil ifadesiyle yapılmış sorgulara karşılık gelen SQL cümlelerini içinde barındıran bir veri setidir. Bu veri setinde 24.241 tablo üzerinde gerçekleştirilen 80.654 etiketlenmiş sorgu bulunmaktadır. WikiSQL veri seti, SQL sorgusu tahmini için pekiştirmeli öğrenme yöntemini kullanan bir sistem için tasarlanmıştır [42].

Spider, büyük ölçekli ve karmaşık veri tabanı sistemleri üzerinde çalışan bir veri setidir. Veri seti bünyesinde 200 veri tabanı bulundurmaktadır. Bu veri tabanları ilişkili tablolar içermektedir. Veri seti 10.181 soru ve 5.693 adet benzersiz SQL sorgusuna sahiptir. Spider veri setinin bir diğer avantajı tek bir alana odaklanmamış olmasıdır. Veri setinde sinema, alışveriş, spor vb. 138 farklı alanda veri

tabanı mevcuttur. Spider veri seti özellikle anlamsal ayrıştırma yöntemiyle geliştirilmiş tahmin sistemlerinde, kıyaslama veri seti olarak kullanılmaktadır [4].

Sparc, Yale Üniversitesi öğrencisi olan 14 kişilik bir ekip tarafından geliştirilmiştir. Bu ekip aynı zamanda spider veri setinin de geliştiricileridir. Spider veri seti temel alınarak oluşturulmuştur. Veri setinde odaklanılan nokta bir doğal dil sorusuna karşılık gelen birden fazla SQL sorgusu olmasıdır. Yapılan güncel veri setinde 12 binin üzerinde soru ve SQL sorgusu karşılığı bulunmaktadır [43].

ATIS (Air Travel Information System), hava yolları alanında oluşturulmuş bir veri setidir. Üzerinde 25 adet ilişkisel tablo vardır. Doğal dil sorularına karşılık gelen sorgular, kısıtlı bir tablo havuzu ve tek bir alanda olması veri setinin tercih edilmemesine neden olmaktadır [44].

Veri setlerini farklı özellikleriyle de ele alabiliriz. Bunları veri kaynağı, soruların anlamsal kategoriye göre bağlamları, sorgu türleri ve kaynaklar arası ilişkiler olarak kısaca değerlendirebiliriz. Açıklamasını yaptığımız veri setlerinin özet özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Veri setlerinin özet özellikleri

Veri Seti	Bağlam	Kaynak	Sorgu	İlişkisel Yapı
ATIS	Var	Veri Tabanı	SQL	Hayır
WikiSQL	Yok	Tablo	SQL	Evet
Spider	Yok	Veri Tabanı	SQL	Evet
SparC	Var	Veri Tabanı	SQL	Evet

3.2 Uygulamalar

TypeSQL, şema tabanlı bir SQL sorgusu tahmin uygulamasıdır. Şema tabanlı sorgu tahminlerinde, SQL cümlelerinin sıralaması bir tablo olarak düşünülür. Tabloda uygun boşluklar doğal dil ifadesi olan giriş değerleri işlenerek doldurulur. Ön işlem olarak isimlendirilmiş varlık tanıma kullanılmaktadır. İsimlendirilmiş varlık tanımada, SQL’in fonksiyon ve anahtar kelimeleri sınıf olarak ele alınmıştır. Bu ön işlem aracılığıyla tabloda fonksiyon ve anahtar kelimeler doldurulmaya çalışılmaktadır. TypeSQL’de veri seti olarak WikiSQL kullanılmıştır [45].

RatSQL, ilişkisel veri tabanları üzerine çalışan bir uygulamadır. Çalışma, temeline ilişkili tabloların anahtar alanlarını koymaktadır. Büyük ve karmaşık veri tabanlarında, anahtar alanlar tablo sayısının azaltılması alt tablo seçiminin doğruluğunu arttırmaktadır. Sorgu tahmini, anlamsal ayrıştırma kullanılarak ağaç yapısıyla oluşturulan hiyerarşik bir model üzerinde gerçekleştirilmektedir. Sistem testleri WikiSQL ve Spider veri setleri üzerinde gerçekleştirilmiştir [46].

EditSQL, karmaşık veri tabanları üzerinde SQL sorgusu tahmini yapmaktadır. Uygulamada anlamsal ayrıştırma kullanılmıştır. Anlamsal ayrıştırma modeli, 3 adet kodlama katmanından, 3 adet kod çözücü katmanından oluşmaktadır. Kodlama katmanları doğal dil ifadesinden, veri tabanı tablo ve alanlarının çıkarımını yapmaktadır. Kod çözücü

katmanları ise kodlama katmanından aldıkları değerler ile SQL sorgusu tahmini yapmaktadır. Kod çözücü katmanlarında derin öğrenme modeli olan LSTM kullanılmaktadır. Çalışmada karmaşık yapıların örneklenmesinden dolayı Sparc veri seti kullanılmıştır [47].

IncSQL, uygulaması SQL sorgusu tahmini için anlamsal ayrıştırmayı kullanmıştır. INCSQL, bi-LSTM kullanılan kodlayıcı katmanı ve LSTM kullanılan kod çözücü katmanından oluşmaktadır. Kodlayıcı katmanı birbiriyle etkileşimli 3 adet bi-LSTM ağını üzerinde barındırmaktadır. Kodlayıcı katmanında doğal dil ifadeleri SQL sorgusu için gerekli olacak özelliklerin çıkarımını yapmaktadır. Özellik çıkarımı işleminden sonra kod çözme katmanında SQL sorgusu tahmini yapılmaktadır. ATIS veri tabanının kısıtlı olmasından dolayı sistemde WikiSQL veri seti kullanılmıştır [48].

SmBoP, RatSQL sisteminin geliştirilmiş halidir. SmBoP, anlamsal ayrıştırmada kullanılan kod çözme adımı iyileştirmeler yapmaktadır. RatSQL’de kod çözümüne kadar anlamsal yaklaşımlar dikkate alınmazken, SmBoP kodlama ve kod çözmenin her aşamasında anlamsal bir sonuç çıkarmaktadır. SmBoP, veri seti olarak Spider kullanılmaktadır [5].

4 Metinden SQL sorgusu tahmini

Çalışmamızın bu bölümünde DDİ uygulamalarına örnek olması için, metinden SQL sorgusu üzerine bir uygulama geliştirilmiş ve geliştirme süreci incelenmiştir. Uygulamamızda DDİ yöntemlerinden makine çevirisi konusu üzerinde durulmuştur. Uygulamanın temel akışı Şekil 5’te gösterilmektedir.



Şekil 5. Uygulama Akışı

4.1 Kullanılan araçlar

Uygulamamızda, metinden SQL tahmini için SmBoP yöntemi kullanılmıştır. SmBoP, küçük ölçekli tablolara sahip veri tabanlarında performansı yüksek bir yöntemdir. Uygulamamızda çoklu dil desteği sağlanmıştır.

Google BERT geliştirildikten sonra makine çevirilerinin doğruluk oranları ciddi yükselişler gözlemlenmektedir. Çalışmamızda Google API’sinden faydalanarak makine çevirisi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

4.2 Doğal dil ifadesi giriş işlemi

Metinden SQL tahmininde, model eğitimi için kullanılan veri setleri İngilizce olarak hazırlanmıştır. Sorgu tahmini

sisteminde giriş dili olarak İngilizce kullanılması gerekmektedir. Bu durumda oluşan giriş dili problemi, DDİ konusu olan makine çevirisiyle aşılmıştır. Giriş ifadelerinin ön işleme için NLTK kütüphanesinden yararlanılmıştır.

4.3 Makine çeviri işlemi

SQL sorgusu tahmin sistemimizde, dil bağımsız bir yapı oluşturmak için makine çevirisinden faydalanılmıştır. Makine çevirisinde, sektörün en önde gelen sistemlerinden olan Google Translate kullanılmıştır. Sisteme entegre edilen Google Translate API'si ile sistem 33 adet doğal dilde giriş işlemi yapılması sağlanmıştır.

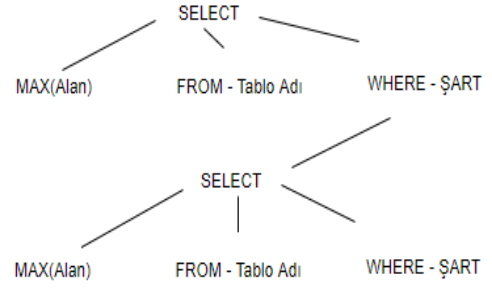
4.4 Metinden SQL sorgusu tahmini

Ön işlemde geçirilen doğal dil ifadesi, derin öğrenme modeli olan LSTM için hazırlanmaktadır. Bu aşamada doğal dil ifadesinin matematiksel temsili yapılmıştır. Bu matematiksel temsil işlemi için AllenNLP kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Uygulamada anlamsal ayrıştırma (semantic parsing) kullanılmıştır. Anlamsal ayrıştırma, son dönemlerde metin oluşturma, soru cevap gibi DDİ'nin ana konularda standart bir çözüm yolu haline gelmiştir [49]. Anlamsal ayrıştırma, giriş ifadesinin kodlanarak çıkış ifadesindeki karşılığının tespiti işlemi olarak özetlenebilir [50]. Uygulamamızda anlamsal ayrıştırma yöntemiyle, doğal dil ifadesine karşılık gelen SQL sorgusu tespit edilmiştir. Farklı kullanım türleri olan anlamsal ayrıştırmanın uygulamamızdaki aşamaları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Sonuç ifadesinin elde edilmesinden bir önceki adım, SQL dil bilgisi yapısındaki sıralamaların düzenlenmesidir. Bu aşamada ağaç yapılarından faydalanılmıştır.

SQL dil bilgisi kuralları, kendi içerisinde hiyerarşik bir yapı barındırmaktadır. Karmaşık sorgularda, bu hiyerarşik yapı kendi içinde tekrarlanmaktadır. Kod çözme aşamasından elde edilen alan, tablo eşleşmeleriyle bu ağaç yapısında ilgili yerler doldurularak SQL sorgusu elde edilmektedir. Şekil 7'de ağaç yapısı gösterilmiştir.



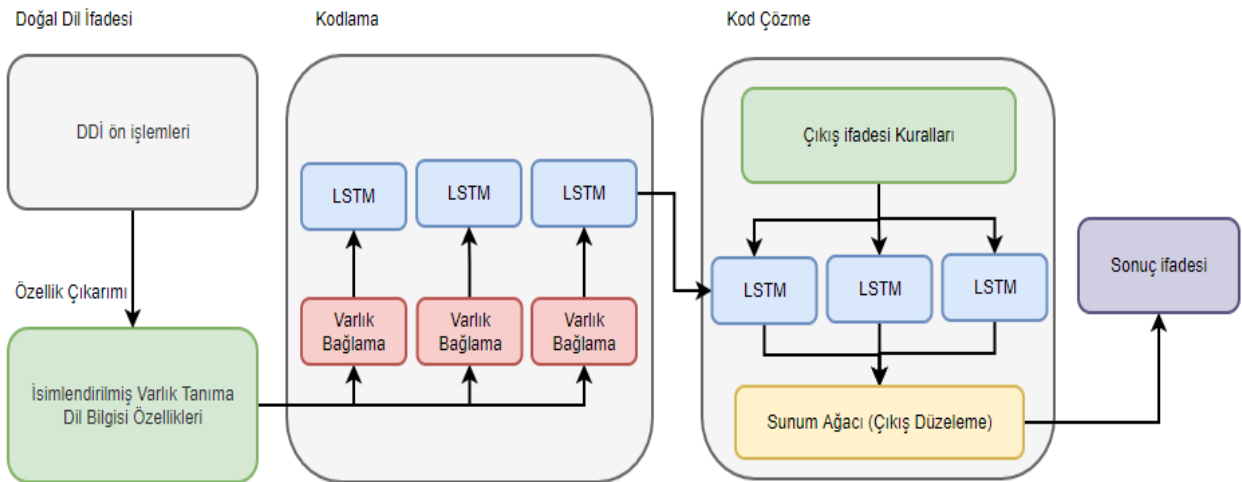
Şekil 7. SQL sorgusu için düzenlenmiş ağaç yapısı

4.5 Deneysel sonuçlar

Uygulamadaki deney sonuçları 3 aşamalı olarak değerlendirilmiştir. Birinci aşama olan makine çevirisi aşamasında, Türkçe-İngilizce çeviri sonuçları değerlendirilmiştir. İkinci aşama, İngilizce-SQL çevirisinin sonuçları değerlendirilmiştir. Üçüncü aşama ise uygulamanın tamamının sonuçları değerlendirilmiştir. Tablo 3'te spider veri setinde bulunan veri tabanlarına yönelik yapılan sorguların Türkçeden İngilizceye başarıları gösterilmiştir.

Tablo 3. Türkçeden İngilizceye çeviri sonuçları

Veri Tabanı	Sorgu Sayısı	Doğru Sayısı
Cinema	6	5
Academic	6	5
Restaurants	6	4
Soccer_1	6	5
Singer	6	6
Tvshow	6	5
Toplam	36	30



Şekil 6. Anlamsal ayrıştırma aşamaları

Makine çevirisi üzerinde 36 adet doğal dil ifadesi kullanılmıştır. Bu ifadelerin, 30 tanesine doğru çeviri elde edilmiştir. Hatalı olan ifadeler incelendiğinde ise iki doğal dilin dilbilgisi yapılarındaki uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Türkçe olarak girilen 'çizgi film' ifadesinin, İngilizce karşılığı olarak 'cartoon' ifadesi beklenmektedir. Ancak 'çizgi film' ifadesini cümle içerisinde uygulamaya giriş değeri olarak verdiğimizde, sonuç ifade 'line movie' olmaktadır. Bu hata üzerine deneylerimizi genişleterek farklı cümleler içinde aynı ifadeyi kullandığımızda çevirinin başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

İngilizce'den Türkçe'ye çeviri testlerinde %83.3 başarı oranına ulaşılmıştır. Başarısız olan çeviriler, özellikle Google BERT ve LSTM gibi modellerde kelimeler arası ilişkilerin istatistiksel oranlarına göre davranış sergilemesidir. Türkçeden İngilizceye çeviride kullanılan örnek cümleler **Tablo 4**'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Türkçeden İngilizceye çeviri örnekleri

Türkçe	İngilizce
Hangi filmin bileti en ucuz?	Which movie ticket is the cheapest?
Hangi yayın en çok atfı almıştır?	Which publication is most cited?
Londra'da olan restoranları listele.	List the restaurants in London.
Hangi oyuncular sağ ayağını kullanıyor?	Which players use their right foot?
En çok para kazanan şarkıcı kim?	Who is the most money-winning singer?
En eski çizgi filmi getir.	Bring the oldest line movie.

İngilizce ifadelerin SQL sorgularına çevrilmesi üzerine yapılan deneyler, test veri tabanları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, toplam 29 tabloya sahip 6 farklı veri tabanı kullanılmıştır. Veri tabanlarında tutulan veriler farklı konulardan oluşmaktadır. Veri tabanlarının konuları akademik, sinema, restoranlar, futbolcular, şarkıcılar ve televizyon şovlarıdır. **Tablo 5**'te İngilizce'den SQL sorgusuna yapılan dönüşüm sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5. İngilizceden SQL sorgusuna dönüşüm sonuçları

Veri Tabanı	Sorgu Sayısı	Doğru Sayısı
Cinema	6	5
Academic	6	4
Restaurants	6	4
Soccer_1	6	5
Singer	6	5
Tvshow	6	4
Toplam	36	27

Uygulamaya test amaçlı 36 adet İngilizce doğal dil ifadesi girilmiştir. Bu 36 ifadenin, yarısında karmaşık yarısında ise basit SQL sorguları beklenmektedir. Uygulama 10 adet yanlış SQL sorgusu ifade etmiştir. 9 adet yanlış SQL sorgusunun, 6 tanesi karmaşık yapıya sahipken 3 tanesi basit SQL sorgusudur. İngilizce'den SQL sorgusu dönüşümünde %75 başarı oranına ulaşılmıştır.

Deney sorguları spider veri seti üzerindeki veri tabanlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde kullanılan veri tabanları incelendiğinde, veri tabanı mimarisi ve alan tanımlamalarının belirgin olması doğruluk oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple spider veri seti dışında kalan özel veri tabanlarında, tanımlamaların ve ilişkilerin belirgin olarak tasarlanması çalışmanın başarısını arttıracaktır. İngilizcen SQL sorgusu çevirisinde kullanılan örnek cümleler **Tablo 6**'da gösterilmiştir.

Tablo 6. İngilizceden SQL sorgusu çevirisi örnekleri

İngilizce	SQL sorgusu
Which movie ticket is the cheapest?	SELECT film.title FROM schedule JOIN film ON schedule.film_id = film.film_id ORDER BY schedule.price ASC LIMIT 1
Which publication is most cited?	SELECT publication.title FROM publication GROUP BY publication.pid ORDER BY COUNT(*) DESC LIMIT 1
List the restaurants in London.	SELECT restaurant.name FROM location JOIN geographic ON location.restaurant_id = geographic.city_name JOIN restaurant ON geographic.city_name = restaurant.city_name WHERE location.city_name = 'London'
Which players use their right foot?	SELECT DISTINCT player.player_name FROM player_attributes WHERE player_attributes.preferred_foot = 'right'
Who is the most money-winning singer?	SELECT singer.name FROM singer ORDER BY singer.net_worth_millions DESC LIMIT 1
Bring the oldest cartoon.	SELECT cartoon.title FROM cartoon ORDER BY cartoon.title ASC LIMIT 1

Uygulamanın tamamını kapsayan testlerimiz Türkçe doğal dil ifadesinden SQL sorgusu tahmini üzerine yapılmıştır. Yapılan testlerde 36 adet Türkçe ifadeden 25 adet doğru SQL sorgusu elde edilmiştir. **Tablo 7**'te uygulama geneli test sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 7. Uygulama geneli test sonuçları

Veri Tabanı	Sorgu Sayısı	Doğru Sayısı
Cinema	6	5
Academic	6	4
Restaurants	6	4
Soccer_1	6	4
Singer	6	5
Tvshow	6	3
Toplam	36	25

Uygulama geneli yapılan test sonuçlarında %69.4 başarı oranına ulaşılmıştır.

5 Sonuçlar

Çalışmamız, DDİ'nin temel kavramları üzerine odaklanmıştır. DDİ'nin temel problemleri, çözüm yolları ve kullanım alanları hakkında genel literatür araştırması yapılmıştır. İnsan bilgisayar etkileşimi konusunun en önemli alanlarından biri olan DDİ, yapay zekanın birçok alanıyla yakından ilişkilidir.

Geliştirilen uygulamanın iki kısmı vardır. Bunlardan birinci aşama, çoklu dil desteğini sağlayabilmek için makine çevirisi uygulanan kısımdır. İkinci aşamaysa, SQL sorgusu tahmini kısımdır.

Birinci aşama olan makine çevirisinde, uygulama 33 adet dili desteklemektedir. Makine çevirisinde, uzun yıllardır süregelen çalışmalar ön eğitilmiş dil paketlerinin yaygın ve çeşitliliğini sağlamıştır. Ön eğitilmiş dil paketleri, doğal dillerin hem anlamsal hem dil bilgisi yapılarını üzerlerinde barındırmaktadır. Bu sebeple makine çevirisinin başarı oranları üst seviyelere ulaşmıştır. Uygulamanın genelinde kullanılan veri tabanlarına yönelik olan doğal dilde yapılan sorgu ifadeleri üzerinde yapılan test çalışmasında, makine çevirisi için doğruluk oranı %83.3 olarak tespit edilmiştir.

İkinci aşama olan doğal dil ifadesinde sorgu tahmini kısmında, anlamsal ayrıştırma uygulanmıştır. Doğal dil ifadesinin anlamsal ve dil bilimsel yapısının uygulamaya eklenmesi için Google BERT' ten yararlanılmıştır. Google BERT literatür çalışmalarında geleneksel dil modellerine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Doğal dil ifadelerinin tekrarlı yapıları ve kelimeler arası ilişkilerin daha iyi işlenebilmesi için tekrarlı sinir ağı yapısı olan LSTM' den faydalanılmıştır. Yapılan testlerde SQL sorgusu tahmininde başarı oranı %75 olarak tespit edilmiştir. Uygulamanın tamamını kapsayan sorgularda ise başarı oranı %69.4 olarak tespit edilmiştir.

Metinden SQL sorgusu tahmini üzerine yapılan literatürdeki diğer çalışmalar İngilizce olarak yapılmıştır. Bu çalışmada, geliştirdiğimiz model ise çoklu dil desteğine imkân sağlamaktadır. Çoklu dil desteği, metinden SQL sorgusu tahmini üzerine yapılan çalışmalara farklılık kazandırmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] E. Adalı, Doğal dil işleme. Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 5 (2), 2012.
- [2] R. C. Moore, Practical natural-language processing by computer. SRI International Menlo Park CA Artificial Intelligence Center, 1981.
- [3] Y. Yu, X. Si, C. Hu, and J. Zhang, A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures, Neural Computation, 31 (7), 1235–1270, 2019. https://doi.org/10.1162/neco_a_0_1199.
- [4] T. Yu et al., Spider: A Large-Scale Human-Labeled Dataset for Complex and Cross-Domain Semantic Parsing and Text-to-SQL Task. arXiv preprint arXiv:1809.08887, 2018.
- [5] O. Rubin and J. Berant, SmBoP: Semi-autoregressive Bottom-up Semantic Parsing arXiv preprint arXiv:2010.12412, 2020.
- [6] Spider: Yale Semantic Parsing and Text-to-SQL Challenge. <https://yale-lily.github.io/spider> (accessed May 11, 2022).
- [7] J. F. Allen, Natural Language Processing, Encyclopedia of Computer Science. John Wiley and Sons Ltd., Londra, 2003.
- [8] B. John and Z. Michael, Natural Language Generation. Oxford University Press, Oxford, 2012.
- [9] T. Alan M, Computing machinery and intelligence, in Parsing the turing test. Springer, Dordrecht, 2009.
- [10] M. A. Chéragai, Theoretical overview of machine translation. International Conference on Web and Information Technologies, pp. 160-169, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2012.
- [11] D. H. Klatt, Review of the ARPA speech understanding Project. The Journal of the Acoustical Society of America, 62 (6), 1345-1366, 1977.
- [12] M. Benzeghiba et al., Automatic speech recognition and speech variability: A review. Speech communication, 49(10-11), 763-786, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2007.02.006>.
- [13] K. Frank, Gradience in grammar: Experimental and computational aspects of degrees of grammaticality. Ph.D. Thesis, Rutgers University, New Jersey, USA, 2000.
- [14] C. David, Lexical acquisition in the core language engine. Fourth Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, 1989.
- [15] J. Karen Sparc, Natural language processing: a historical review. Linguistica Computazionale, Springer, Dordrecht, 1994.
- [16] K. Nigam, M. Andrew, T. Sebastian, and M. Tom, Learning to classify text from labeled and unlabeled documents. Proceedings of the Fifteenth National/Tenth Conference on Artificial Intelligence/Innovative Applications of Artificial Intelligence, pp. 792-799, 1998.

- [17] W. Casey, H. Ben, C. Grace Y, and E. Gerard, Using the web for language independent spellchecking and autocorrection. Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, pp. 890-899, Singapore, 2009.
- [18] W. Xiong, L. Wu, F. Alleva, J. Droppo, X. Huang, and A. Stolcke, The microsoft 2017 conversational speech recognition system. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 5934-5938, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461870>.
- [19] W. Xiong et al., Toward human parity in conversational speech recognition. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 25(12), 2410-2423, 2017. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2017.2756440>.
- [20] M. T. Qadri and M. Asif, Automatic number plate recognition system for vehicle identification using optical character recognition, in 2009 International Conference on Education Technology and Computer, pp. 335-338, 2009. <https://doi.org/10.1109/ICETC.2009.54>.
- [21] H. Han et al., Faster Re-translation Using Non-Autoregressive Model For Simultaneous Neural Machine Translation. arXiv preprint arXiv:2012.14681, 2020.
- [22] G. Alfio, B. Or, P. Siddharth, and M. Kathlees, Semantic technologies in IBM Watson. Fourth Workshop on Teaching NLP and CL, pp. 85-92, Sofia, Bulgaria, 2013.
- [23] I. Aduriz, M. Urkia, I. Alegria, X. Artola, N. Ezeiza, and K. Sarasola, A spelling corrector for Basque based on morphology. Literary and Linguistic Computing, 12 (1), 31-38, 1997. <https://doi.org/10.1093/lilc/12.1.31>.
- [24] D. Simla, Bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile Türkçe yazım denetleyicisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2005.
- [25] T. Katrin, W. Joachim, and H. Udo, Sentence and token splitting based on conditional random fields. 10th Conference of the Pacific Association for Computational Linguistics, p.57, Melbourne, Australia, 2007.
- [26] R. Ricardo, O. Hugo Gonçalo, and G. Paulo, NLPPort: A Pipeline for Portuguese NLP. 7th Symposium on Languages, Applications and Technologies, Portugal, 2018.
- [27] P. McNamee and J. Mayfield, Character n-gram tokenization for European language text retrieval. Information retrieval, 7(1), 73-97, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:INRT.0000009441.78971.be>.
- [28] A. Voutilainen, Part-of-speech tagging. The Oxford handbook of computational linguistics, Oxford, 2003.
- [29] T. Kristina, K. Dan, M. Christopher D, and S. Yoram, Feature-rich part-of-speech tagging with a cyclic dependency network. Human Language Technology Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics, pp. 252-259, 2003.
- [30] J. Anjali Ganesh, A comparative study of stemming algorithms. International Journal of Computer Applications in Technology, 2 (6), 1930-1938, 2011.
- [31] Z. A. Güven and M. O. Unalır, Önerilen varlık ismi tanıma yöntemi ile soru cevaplamada bert modelinin iyileştirilmesi. 6th International Conference on Computer Science and Engineering, 2021.
- [32] B. Mohit, Theory and Applications of Natural Language Processing. Springer, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45358-8_7.
- [33] P.-H. Chen, Essential Elements of Natural Language Processing: What the Radiologist Should Know. Academic Radiology, 27 (1), 6-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.08.010>.
- [34] J. K. and J. R., Stop-Word Removal Algorithm and its Implementation for Sanskrit Language. International Journal of Computer Applications, 150 (2), 15-17, 2016. <https://doi.org/10.5120/ijca2016911462>.
- [35] E. S. Akgül, C. Ertano, and B. Diri, Sentiment analysis with Twitter. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 22 (2), 106-110, 2016. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.37268>.
- [36] M. Abdel-Nasser and K. Mahmoud, Accurate photovoltaic power forecasting models using deep LSTM-RNN. Neural Computing and Applications, 31 (7), 2727-2740, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3225-z>.
- [37] A. Sherstinsky, Fundamentals of Recurrent Neural Network (RNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) network. Physica D: Nonlinear Phenomena, 404, 132306, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2019.132306>.
- [38] A. C. Mendes and C. Antunes, Pattern mining with natural language processing: An exploratory approach. International Workshop on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition, Berlin, Germany, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03070-3_20.
- [39] A. H. Miller et al., ParlAI: A Dialog Research Software Platform. arXiv preprint arXiv:1705.06476, 2017.
- [40] M. Ott et al., fairseq: A Fast, Extensible Toolkit for Sequence Modeling. arXiv preprint arXiv:1904.01038, 2019.
- [41] M. Gardner et al., AllenNLP: A Deep Semantic Natural Language Processing Platform. arXiv preprint arXiv:1803.07640, 2018.
- [42] V. Zhong, C. Xiong, and R. Socher, Seq2SQL: Generating Structured Queries from Natural Language using Reinforcement Learning. arXiv preprint arXiv:1709.00103, 2017.
- [43] Y. Cai and X. Wan, IGSQ: Database Schema Interaction Graph Based Neural Model for Context-Dependent Text-to-SQL Generation. arXiv preprint arXiv:2011.05744, 2020.
- [44] G. Tur, D. Hakkani-Tur, and L. Heck, What is left to be understood in ATIS?. 2010 IEEE Spoken Language Technology Workshop, pp. 19-24, 2010. <https://doi.org/10.1109/SLT.2010.5700816>.

- [45] T. Yu, Z. Li, Z. Zhang, R. Zhang, and D. Radev, TypeSQL: Knowledge-based Type-Aware Neural Text-to-SQL Generation. arXiv preprint arXiv:1804.09769, 2018.
- [46] B. Wang, R. Shin, X. Liu, O. Polozov, and M. Richardson, RAT-SQL: Relation-Aware Schema Encoding and Linking for Text-to-SQL Parsers. arXiv preprint arXiv:1911.04942, 2019.
- [47] A. T. Nguyen, M. H. Dao, and D. Q. Nguyen, A Pilot Study of Text-to-SQL Semantic Parsing for Vietnamese. arXiv preprint arXiv:2010.01891, 2020.
- [48] T. Shi, K. Tatwawadi, K. Chakrabarti, Y. Mao, O. Polozov, and W. Chen, IncSQL: Training Incremental Text-to-SQL Parsers with Non-Deterministic Oracles. arXiv preprint arXiv:1809.05054, 2018.
- [49] J. M. Zelle and R. J. Mooney, Learning to parse database queries using inductive logic programming. Proceedings of the national conference on artificial intelligence, pp. 1050-1055, Oregon, USA, 1996.
- [50] A. Aghajanyan et al., Conversational Semantic Parsing. arXiv preprint arXiv:2009.13655, 2020.





Sadeleştirilmiş U-Net mimarisi ile beyin tümörü segmentasyonu Brain tumor segmentation with simplified U-Net architecture

Özlem Polat^{1,*} 

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas Türkiye

Öz

Kafatası içinde yer alan beyin tümörleri ciddi sonuçlara neden olan sağlık sorunları arasındadır. Beyin tümörünün hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilip tümör bölgesinin segmentasyonunun yapılması hastanın erken dönemde uygun tedavi almasını sağlayarak hastanın iyileşme ve hayatta kalma şansını artıracaktır. Literatürde birçok segmentasyon yöntemi bulunmaktadır. Düşük segmentasyon doğruluğu ve kullanılan ağ yapısının çok büyük olması mevcut yöntemlerin ana dezavantajıdır. Bu çalışmada beyin tümörlerinin MR görüntüleri üzerinde segmentasyonu için sadeleştirilmiş U-Net derin öğrenme modeli önerilmektedir. Model, 233 hastadan alınan ve yaygın beyin tümörlerinden gliom, menenjiom ve hipfiz tümörünü içeren 3064 MR görüntüsü üzerinde eğitilip test edilmiştir. Sonuç olarak ortalama 0.86 dice benzerlik katsayısı, 0.76 IoU skoru, 0.85 hassasiyet değeri ve 0.99 piksel doğruluk değeri elde edilmiştir. Önerilen model beyin tümörü segmentasyonunu hızlı ve yüksek doğrulukla gerçekleştirdiğinden hastalığın tanısında ve uygun tedavinin belirlenmesinde uzmanlara yardımcı olması açısından umut vaat etmektedir.

Anahtar kelimeler: Beyin tümörü, Segmentasyon, Derin öğrenme, U-Net

1 Giriş

Beyin insan vücudundaki en önemli ve karmaşık organlardan biridir ve milyarlarca hücre ile çalışır. Beyin tümörü, beyin içindeki veya çevresindeki anormal hücre gruplarının kontrolsüz bölünmesi ve çoğalmasından kaynaklanır. Bu hücre grubu, beyin aktivitesinin işlevselliğini etkileyebilir ve sağlıklı hücreleri yok edebilir [1]. Beyin tümörleri temel olarak iyi huylu (düşük dereceli, I ve II) ve kötü huylu (yüksek dereceli, III ve IV) olarak sınıflandırılabilir ve ciddi sonuçlara yol açabilen sağlık sorunları arasında yer alır. Beyin tümörleri kadın ve erkeklerde dünyada 10. [2] ve Türkiye’de 8. [3] önde gelen ölüm nedeni olarak raporlanmıştır. Beyin tümörlerinin segmentasyon ile sınırlarının ve sınıflama ile türlerinin doğru tahmin edilmesi, tedavinin planlanmasında kilit rol oynamaktadır.

Tümörlerin tespitinde tıbbi görüntüleme teknikleri kullanılmaktadır; ayrıca tıbbi görüntülemenin kanser tipi sınıflandırmasında kullanılan en yaygın ve güvenilir teknik olduğu düşünülmektedir. Bu yöntemin noninvaziv olması bu tekniği daha da önemli kılmaktadır [4]. Tıbbi görüntüleme

Abstract

Brain tumors located in the skull are among the health problems that cause serious consequences. Rapid and accurate detection of the brain tumor and segmentation of the tumor region will increase the patient's chance of recovery and survival by ensuring that the patient receives appropriate treatment in the early period. There are many segmentation methods in the literature. The low segmentation accuracy and the very large network structure used are the main disadvantages of the existing methods. In this study, a simplified U-Net deep learning model is used for segmentation on MR images of brain tumors. The model was trained and tested on 3064 MR images from 233 patients, which included the common brain tumors glioma, meningioma, and pituitary. As a result, average 0.86 dice similarity coefficient, 0.76 IoU score, 0.85 sensitivity value and 0.99 pixel accuracy value were obtained. Since the proposed model performs brain tumor segmentation quickly and with high accuracy, it promises to help specialists in the diagnosis of the disease and in determining the appropriate treatment.

Keywords: Brain tumor, Segmentation, Deep learning, U-Net

tekniklerinden biri olan manyetik rezonans görüntüleme (MRI) tekniği, beyin tümörlerinin sınıflandırılmasında ve segmente edilmesinde özellikle beyin dokusunun yüksek çözünürlüklü görüntülerini sağladığı için tercih edilmektedir.

Beyin tümörü segmentasyonu, farklı tümör dokularının (tümör, ödem ve nekroz) normal beyin dokularından (gri madde, beyaz madde ve beyin omurilik sıvısı) ayrılmasını ifade etmektedir. Beyin tümörü çalışmalarında anormal dokuların varlığı çoğu zaman kolaylıkla saptanabilmektedir. Bununla birlikte, anormalliklerin doğru bir şekilde segmente edilmesi ise kolay değildir [5]. Çünkü bu tümörler görünüm olarak heterojen yapıdadırlar ve beynin farklı yerlerinde sınırları düzensiz olduğundan farklı şekillerde meydana gelebilirler. Ayrıca MR görüntülemeye kullanılan voksel değerlerinin ölçek değerleri standart olmadığından tümörlü dokuların görünümü kurumdan kuruma da değişiklik gösterebilir [6]. Beyin tümörlerinin manuel olarak segmente edilmesi uzun zaman almaktadır ve görüntü sayısının çok fazla olması durumunda uygulanabilir değildir. Beyin tümörü segmentasyonu, uzun yıllardır araştırmacılar tarafından incelenmiş ve makine öğrenimi teknikleri

kullanılarak otomatikleştirilmiştir. Son yıllarda sıklıkla kullanılan ve başarısı kanıtlanmış olan derin öğrenme teknikleri bu alanda da yoğun olarak kullanılmaktadır.

Literatürde beyin tümörünün sınıflandırılması [7-10] ve segmente edilmesi [11-14] ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Son yıllarda bilgisayar teknolojilerinin gelişmesi ile, görüntüdeki özelliklerin otomatik olarak çıkarıldığı derin öğrenmenin, özelliklerin manuel olarak çıkarıldığı modellerden daha iyi performans göstermesi nedeniyle sınıflama ve segmentasyon işlemlerinde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [15]. Sobhaninia vd. [11] kademeli çift ölçekli LinkNet derin öğrenme modelini kullanarak beyin tümörü segmentasyonu yapmışlardır. Modeli 3064 beyin MR görüntüsünden oluşan Figshare veriseti [16] üzerinde eğitip test etmişlerdir. Kaldera vd. [12] beyin tümörlerinden gliomların segmentasyonu için hızlı bölge tabanlı konvolüsyonel sinir ağı (fast R-CNN) ve kenar tespit teknikleri kullanmışlardır. Maas vd. tarafından yapılan çalışmada [13] segmentasyon işlemi, bir darboğaz katmanıyla ayrılmış yoğun katmanlar içeren 4 kodlayıcı ve 4 kod çözücünden oluşmuş bir derin öğrenme modeli ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan modelde son katman, Softmax'lı bir sınıflandırıcı bloktur. Mimari, U-Net mimarisine benzer şekilde, aynı uzaysal çözünürlüğe sahip tüm kodlayıcı ve kod çözücü blokları arasında atlamalı bağlantılar içermektedir. Derin öğrenmenin kullanıldığı farklı bir çalışma da Diaz-Pernas vd. tarafından yapılmıştır [14]. Yazarlar kullandıkları modelin konvolüsyon katmanlarını 3 uzaysal ölçek şeklinde oluşturmuşlar ve sonrasında bu ölçeklerden elde edilen çıktıları birleştirerek öznetelik haritasını elde etmişlerdir.

Bu çalışmada [11-14]'de olduğu gibi Figshare veriseti kullanılmıştır. Literatürde farklı verisetlerini kullanarak beyin tümörü segmentasyonu yapan çalışmalar da mevcuttur. Li vd. [17] U-Net mimarisini modifiye ederek ve tam konvolüsyonel bir ağ kullanılarak yeni bir uçtan uca beyin tümörü segmentasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bilgi akışını geliştirmek için kodlama yolu ile kod çözme yolu arasında yukarı atlama bağlantısı olarak adlandırılan yenilikçi bir yapı önermişlerdir ve beyin tümörü alt bölgelerini sırayla segmentlere ayırmak için verimli bir kademeli eğitim stratejisi tanıtmışlardır. Toplamda 274 yüksek-seviyeli gliom ve düşük-seviyeli gliom tümörü içeren MR görüntüsü üzerinde model başarımı, 0.89 dice ve 0.90 hassasiyet değeri ile belirlenmiştir. Daimary vd. [18] görüntü segmentasyonunda sıklıkla tercih edilen CNN modellerinden U-Net ve SegNet5'i kullanarak hibrit bir model ortaya çıkarmışlardır. SegNet5, bir çift kodlayıcı ve kod çözücünden oluşmaktadır. Kodlayıcı yapısı VGG16'ya, kod çözücü yapısı ise VGG16'nın tersine benzemektedir; ancak SegNet5'in her konvolüsyon bloğunda bir konvolüsyon katmanı daha vardır. Önerilen modelde SegNet5, U-Net'te olduğu gibi ilk konvolüsyon bloklarına bir atlama bağlantısı eklenerek modifiye edilmektedir. Modelin değerlendirilmesinde 775 gliom tümörü içeren MR görüntüsü kullanılmıştır ve tümörler 0.73 mIoU ve 0.93 doğruluk değeri ile segmente edilmiştir. Derin öğrenme kullanılan başka bir çalışmada [19] bir konvolüsyonel sinir ağı destek vektör makine (DVM) algoritması ile birleştirilir

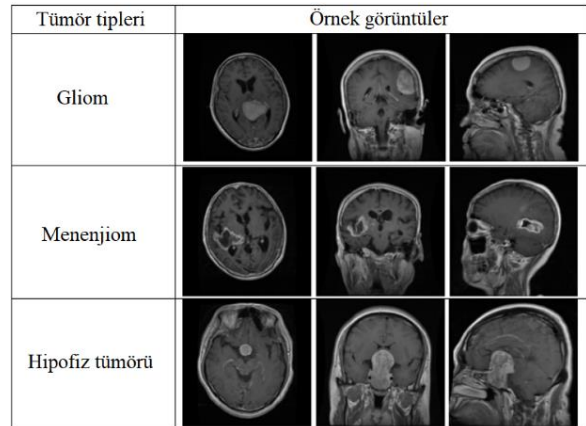
ve DCNN-F-SVM olarak isimlendirilir. Wu vd. tarafından önerilen bu modelde temel olarak üç aşama ile segmentasyon gerçekleştirilir. İlk aşamada, görüntü uzayından tümör işaret uzayına kadar olan haritalamayı öğrenmek için derin bir konvolüsyonel sinir ağı eğitilir. İkinci aşamada, bu eğitimden elde edilen etiketler, test görüntüleri ile birlikte entegre DVM sınıflandırıcısına giriş olarak verilir. Üçüncü aşamada ise önerilen modeli eğitmek için derin bir CNN ve entegre bir DVM seri olarak bağlanır. Önerilen model 543 gliom tümörü içeren MR görüntüsü üzerinde eğitilmiş ve test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda 0.90 dice ve 0.92 hassasiyet değeri elde edilmiştir.

Bu çalışmada yaygın beyin tümörlerinden olan gliom, menenjiom ve hipofiz bezi tümörü içeren MR görüntüleri üzerinde beyin tümörleri, sadeleştirilmiş U-Net modeli kullanılarak segmente edilmektedir.

2 Materyal ve metod

2.1 Figshare beyin tümörü veriseti

Bu çalışmada, önerilen sadeleştirilmiş U-Net modelini eğitmek ve test etmek için Figshare isimli beyin MR görüntülerinden oluşan bir veriseti kullanılmıştır. Figshare veriseti literatüre ilk olarak 2015 yılında tanıtılmış ve verisetinin güncel versiyonu Cheng tarafından 2017'de sunulmuştur [16]. Erişime açık olan verisetindeki görüntüler, yaygın beyin tümörlerinden üçünü, gliom, menenjiom ve hipofiz tümörünü, içermektedir. 233 hastaya ait 3064 T1-CE MR görüntüsünü içeren verisetinde gliom, menenjiom ve hipofiz tümörlerini içeren görüntü sayısı sırasıyla 1426, 708 ve 930'dur. Bu görüntüler 2005 ve 2010 yılları arasında Çin Guangzhou Nanfang Hastanesi ve Çin Tianjian Tıp Üniversitesi Genel Hastanesi'nden alınmıştır. Tüm görüntüler sagittal, aksel ve koronal olmak üzere üç düzlemde toplanmıştır ve sırasıyla 1025, 994 ve 1045 görüntü içermektedir. Farklı düzlemlere sahip farklı tümör sınıflarından görüntü örnekleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Orijinal görüntüler 512×512 çözünürlüğe ve 0.49×0.49mm² piksel boyutuna sahiptir. Görüntüler için dilim aralığı ve dilim kalınlığı sırasıyla 1 mm ve 6 mm'dir. Bu çalışma için görüntüler, önerilen modele girdi olarak verilmek üzere 128×128 piksel olarak yeniden boyutlandırılmıştır.



Şekil 1. Beyin tümör tipleri için örnek MR dilimleri [7]

2.2 Segmentasyon

Bölütme olarak da isimlendirilen segmentasyon en genel tanımı ile bir görüntüyü ortak özellikler içeren bölgelere ayırmaktır. Görüntüde her bir piksele bir sınıf değeri atanır, aynı sınıf değerine sahip pikseller ortak özelliklere sahip olduklarından dolayı görüntü segmente edilmiş olur. Beyin tümörü segmentasyon yöntemleri gerekli insan etkileşiminin derecesine göre üç gruba ayrılabilir [20]: manuel, yarı-otomatik ve tam otomatik segmentasyon.

Manuel segmentasyon beyin tümörlerinin sınırlarının manuel olarak çizilmesini ve görüntüdeki farklı anatomik yapıların farklı işaretlerle gösterilmesini ifade etmektedir. Manuel segmentasyonda, uzmanlar yalnızca görüntüde sunulan bilgileri kullanmakla kalmaz, aynı zamanda anatomi gibi ek bilgileri de kullanırlar. Manuel tanımlama, tümör içeren bölgelerin çizimini ve gösterimini kolaylaştırmak için gelişmiş grafik kullanıcı ara yüzlerine sahip yazılım araçları gerektirir. Manuel segmentasyonda tümör bölgesinin belirlenmesi ve sınırlarının çizilmesi zaman alıcı bir işittir.

Yarı otomatik beyin tümörü segmentasyonu üç aşamada insan müdahalesine ihtiyaç duymaktadır. Bu aşamalar segmentasyon yöntemini başlatmak, sonucun doğruluğunu kontrol etmek ve hatta segmentasyon sonucunu manuel olarak düzeltmektir [20]. Mevcut araştırmaların çoğu, insan etkileşimini en aza indirmeye çalışan beyin tümörlerinin yarı otomatik segmentasyonunu hedef almaktadır [21].

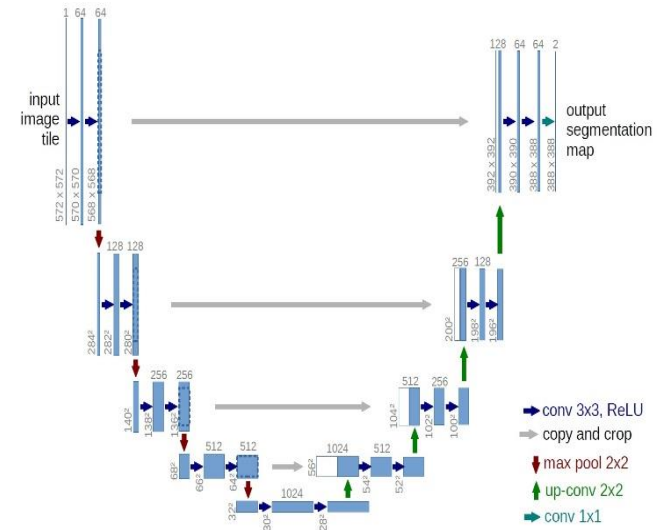
Tam otomatik yöntemlerde ise tümör segmentasyonu herhangi bir insan etkileşimi olmadan bilgisayarlar tarafından gerçekleştirilir. Bu yöntemler genellikle algoritmalarda insan zekâsını ve önceki bilgileri birleştirirler [21].

2.3 Sadeleştirilmiş U-Net modeli

U-Net mimarisi, Ronneberger vd. tarafından biyomedikal görüntü segmentasyonu için ortaya çıkartılmıştır [22]. Mimari, kodlayıcı ve kod çözücü olmak üzere iki yol içermektedir. İlk yol, kodlayıcı, görüntüdeki özellikleri yakalamak için kullanılan daraltma yoludur. Kodlayıcı, yalnızca geleneksel bir konvolüsyon katmanı, her konvolüsyon katmanından sonra uygulanan doğrultulmuş lineer birim fonksiyonu (ReLU) ve maksimum havuzlama katmanları içermektedir. İkinci yol, kod çözücü, transpoze konvolüsyonlar uygulayarak kesin lokalizasyonu sağlamak için kullanılan simetrik genişleyen bir yoldur. Herhangi bir tam bağlı katman içermeyip yalnızca konvolüsyon katmanları içerdiğinden uçtan uca tam konvolüsyonel bir ağ da denilebilir.

Orijinal U-Net modeli toplamda 23 konvolüsyon katmanı içermektedir. U-Net'e ilişkin mimari Şekil 2'de gösterilmiştir. Mimari U harfine benzediği için U-Net olarak isimlendirilmiştir. Sol taraf daraltma yolunu, sağ taraf da genişletme yolunu göstermektedir. Daraltma yolu yalnızca konvolüsyonel sinir ağlarından oluşmaktadır. Giriş görüntüsüne 3×3 boyutlu 64 tane filtre ile konvolüsyon işlemi uygulanır. Her bir konvolüsyon işleminden sonra oluşan özellik haritaları ReLU aktivasyon fonksiyonundan geçirilir. Sonrasında alt örnekleme için 2×2 boyutlu maksimum havuzlama işlemi uygulanır. Konvolüsyon+ReLU+maksimum havuzlama işlem döngüsü

bu şekilde 3 kez daha tekrar edilir. Daraltma yolundaki her alt örnekleme adımında, filtre sayısı iki katına çıkmaktadır. Modelin ilk kısmında azalan boyutun modelin ikinci kısmı olan genişletme yolunda artırılması amaçlanmaktadır. Bunu yaparken çıktının çözünürlüğünün de artırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla genişletme yolunda 2×2'lik yukarı konvolüsyon işlemi uygulanır ve filtre sayısı yarıya indirilir. Sonrasında daraltma yolundan uygun şekilde kırılmış özellik haritası kopyalanarak genişletme yolunda elde edilen çıktı birleştirilir ve arka arkaya 2 kez 3×3'lük konvolüsyon işlemi uygulanır. Bu kısımda da her bir konvolüsyon işleminden sonra ReLU aktivasyon fonksiyonu uygulanmakta ve bahsedilen sıralı işlemler 3 kez daha tekrar etmektedir. Son katmanda, 64 bileşenli özellik vektörünü istenen sayıda sınıfa eşlemek için 1×1'lik konvolüsyon işlemi kullanılır [22].



Şekil 2. Orijinal U-Net mimarisi [22]

Bu çalışmada önerilen modelde U-net sadeleştirilmiş haliyle kullanılmaktadır. Sadeleştirilmiş U-Net modelinde daraltma ve genişletme yollarındaki katman sayıları değişmezken (orijinal U-Net ile aynı sayıda), bu katmanlarda kullanılan filtre sayıları $\frac{3}{4}$ oranında azaltılmıştır. Örneğin giriş katmanındaki konvolüsyon işlemlerinde kullanılan filtre sayısı orijinal U-Net'te 64 iken, sadeleştirilmiş U-Net'te 16'ya düşürülmüştür. Bu şekilde her katmandaki filtre sayıları azaltılmıştır. Böylelikle beyin tümörlerinin segmentasyonu için hesaplanan parametre sayısı önemli ölçüde azaltılmıştır.

2.4 Değerlendirme metrikleri

Beyin tümörlerinin MR görüntüleri üzerinde segmente edilmesinde önerilen sadeleştirilmiş U-Net modelinin değerlendirilmesi için, literatürde segmentasyon problemlerinde sıklıkla kullanılan Dice benzerlik sabiti (1), birleşimlerin kesişim değeri (IoU) (2), hassasiyet (3) ve piksel doğruluğu (4) metrikleri kullanılmıştır.

Segmentasyon problemlerinde sıklıkla kullanılan ölçütlerin başında Dice benzerlik sabiti gelmektedir.

Denklem 1'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Dice benzerlik sabiti} = \frac{2TP}{2TP+FP+FN} \quad (1)$$

Denklem 2’de belirtilen IoU piksel tabanlı bir değerlendirme ölçütüdür. Uzmanlar tarafından işaretlenmiş tümörlü alanları gösteren, maske olarak da isimlendirilen, referans görüntü ya da referans maske (ground-truth) ile model tarafından ortaya çıkarılan maskedeki tümör sınıfına ait örtüşen piksel oranını göstermektedir. mIoU ise, çok sınıflı segmentasyon problemlerinde sınıflara ilişkin ortalama IoU değerini belirtmek için kullanılmaktadır.

$$\text{IoU} = \frac{TP}{TP+FP+FN} \quad (2)$$

Hassasiyet, model çıktısında doğru tahmin edilen tümörlü bölgelerin referans görüntüdeki tümörlü bölgelere olan oranını göstermektedir ve Denklem 3’teki gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Hassasiyet} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

Denklem 4 ile belirtilen piksel doğruluğu, görüntüdeki (hem tümör hem de arka plan sınıfına ait) doğru sınıflanmış piksellerin tüm piksellere oranını belirtmektedir.

$$\text{Piksel doğruluğu} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (4)$$

MR görüntülerindeki tümör içeren piksel sınıfını P (pozitif), tümör içermeyen arka plan piksellerinin sınıfını da N (negatif) ile belirtelim. Bu durumda Denklem 1-4’te kullanılan

- TP, gerçekte P sınıfına ait ve model tarafından da P olarak sınıflandırılan piksellerin sayısını,
- TN, gerçekte N sınıfına ait ve N olarak sınıflandırılan piksellerin sayısını,
- FP, gerçekte N sınıfına ait ancak model tarafından P olarak sınıflandırılan piksel sayısını
- FN, gerçekte P sınıfına ait ancak model tarafından N olarak sınıflandırılan piksel sayısını göstermektedir.

3 Deneysel sonuçlar ve tartışma

Beyin tümörlerinin MR görüntüleri üzerinde segmentasyonu amacıyla önerilen sadeleştirilmiş U-Net modeli, Google Colab platformunda Python programlama dili kullanılarak analiz edilmiştir. Modelin değerlendirilmesinde en yüksek sonuçlar veren parametre değerleri paket boyutu için 16 ve epok sayısı için 50 olarak belirlenmiştir. Öğrenme algoritması olarak 0.001 öğrenme oranı ile Adam tercih edilmiştir. Görüntülerin %70’i eğitim ve %30’u test amacıyla kullanılmıştır. Yapılan deneylere ilişkin gliom, menenjiom ve hipofiz tümörü segmentasyon sonuçları ve ortalama sonuçlar Tablo 1’de gösterilmektedir.

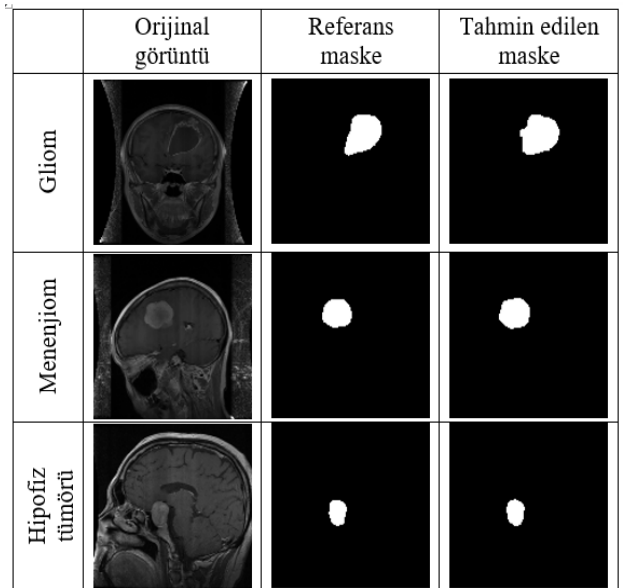
Verisetinde gliom içeren MR görüntülerinin sayısı diğerlerinden fazla olmasına rağmen Tablo 1’e bakıldığında bu tümöre ilişkin segmentasyon başarımlarının diğerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Beyin tümörü segmentasyonu test sonuçları

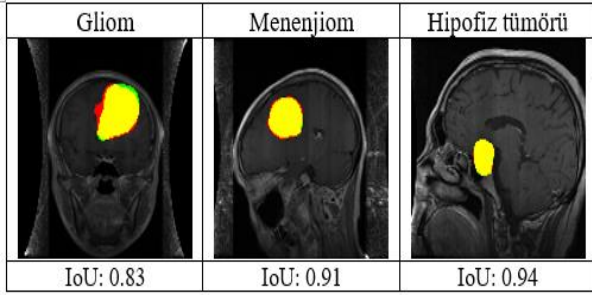
	Dice katsayısı	IoU	Hassasiyet	Piksel doğruluğu
Gliom	0.77	0.62	0.73	0.98
Menenjiom	0.93	0.86	0.90	0.99
Hipofiz tümörü	0.89	0.81	0.92	0.99
Ortalama	0.86	0.76	0.85	0.99

Gliom tümörleri doğası gereği ilerledikçe ve büyüdükçe MR üzerindeki görünüşleri her ilerleme aşamasında değişir. Diğer tümör sınıfları olan menenjiom ve hipofiz tümörü ise ilerleme sürecinde daha tutarlı kalarak MR üzerinde çok fazla değişim göstermezler. Yani gliom tümörlerinin yoğunlukları tümörün ilerlemesi durumunda değişim göstermektedir. Bu da gliom tümörlerin MR üzerindeki segmentasyon başarımının düşük olmasını açıklamaktadır [13,23,24].

Beyin tümörlerinin segmentasyonuna ilişkin görsel sonuçlar Şekil 3 ve 4’te gösterilmektedir. Şekil 3’te gliom, menenjiom ve hipofiz tümörü içeren MR görüntüleri, bu görüntülere ilişkin tümörlerin yerini gösteren uzmanlar tarafından oluşturulmuş referans maske ve model tarafından tahmin edilen maske gösterilmektedir. Şekil 4’te ise Şekil 3’teki görüntülere ilişkin modelin başarımı MR görüntüleri üzerinde gösterilmekte, ayrıca her bir görüntüye ilişkin segmentasyon sonucu IoU cinsinden belirtilmektedir. Buna göre model tarafından sarı ile işaretlenmiş pikseller gerçekte tümör içeren ve tümör alanı olarak tahmin edilen (TP) pikselleri göstermektedir. Kırmızı işaretli pikseller gerçekte tümör içermeyen ancak model tarafından tümör alanı olarak tahmin edilen (FP) pikselleri, yeşil işaretli pikseller ise gerçekte tümör içeren ancak model tarafından tümörsüz alan olarak tahmin edilen (FN) pikselleri göstermektedir.



Şekil 3. Beyin tümör tiplerine ilişkin referans maske ve sadeleştirilmiş U-Net modeli tarafından üretilen maske.



Şekil 4. Şekil 3'teki görüntülerin segmentasyonuna ilişkin başarımların görselleştirilmesi.

Beyin tümörlerinin segmentasyonuna ilişkin yapılan çalışma, literatürde aynı verisetini kullanan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Buna ilişkin karşılaştırma sonuçları dice metriği cinsinden **Tablo 2**'de gösterilmektedir. **Tablo 2**'deki çalışmaların bazıları başarımları tümör sınıfı bazında verirken, bazıları sadece ortalama başarımları vermiştir. **Tablo 2**'ye bakıldığında sadeleştirilmiş U-Net modelinin aynı verisetini kullanan çoğu çalışmadan daha başarılı olduğu görülmektedir. Yalnızca [12]'deki dice benzerlik katsayısı bu çalışmada elde edilen başarımdan daha yüksektir. Eksenel düzlemde elde edilen görüntüler, sagittal ve koronal düzlemde elde edilen görüntülere göre daha yüksek çözünürlüklü ve daha az gürültülü olduğundan dolayı, [12]'de yalnızca eksenel düzlemde elde edilen MR görüntülerinin kullanıldığını belirtmek gerekmektedir.

Tablo 2. Aynı veri setini kullanan çalışmalar ile dice benzerlik katsayısı cinsinden karşılaştırma

Çalışma	Gliom	Menenjiom	Hipofiz T.	Ortalama
Sobhaninin vd. [11]	n.i.	n.i.	n.i.	0.80
Kaldera vd. [12]	n.i.	n.i.	n.i.	0.91
Maas vd. [13]	0.63	0.85	0.83	0.74
Díaz-Pernas vd. [14]	0.78	0.89	0.91	0.83
Önerilen	0.77	0.93	0.89	0.86

n.i.: Bilgi yok

4 Sonuçlar

Beyin tümörlerinin tespiti, sınıflandırılması ve segmentasyonu tıbbi müdahalelerde büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada yaygın beyin tümörlerinden olan gliom, menenjiom ve hipofiz tümörünün MR görüntüleri üzerinde segmente edilmesi amaçlanmıştır. Parametre sayısı azaltılmış olan sadeleştirilmiş U-Net modeli, 3064 T1 ağırlıklı MR görüntüsü üzerinde eğitilmiş ve test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ortalama dice benzerlik katsayısı, IoU, hassasiyet ve piksel doğruluğu cinsinden sırasıyla 0.86, 0.76, 0.85 ve 0.99 segmentasyon başarımına

ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen sadeleştirilmiş U-Net modelinin, beyin tümörlerinin MR görüntüleri üzerinde segmentasyonunda başarılı olduğunu göstermektedir ve uzmanlara teşhis ve tedavi aşamasında karar vermelerinde yardımcı olması açısından umut vaat edicidir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] H. Mohsen, E.A. El-Dahshan, E.M. El-Horbaty ve A.M. Salem, Classification using deep learning neural networks for brain tumors. *Future Computing and Informatics Journal*, 3 (1), 68-71, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2017.12.001>.
- [2] G.S. Tandel, A. Balestrieri, T. Jujaray, N.N. Khanna, L. Saba ve J.S. Suri, Multiclass magnetic resonance imaging brain tumor classification using artificial intelligence paradigm. *Computers in Biology and Medicine*, 122, 103804, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2020.103804>.
- [3] Types of cancer, Brain Tumor: Statistics. <https://www.cancer.net/cancer-types/brain-tumor/statistics> Accessed 28 April 2022.
- [4] K. Usman ve K. Rajpoot, Brain tumor classification from multi-modality MRI using wavelets and machine learning. *Pattern Analysis and Applications*, 20, 871-881, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10044-017-0597-8>
- [5] N. Gordillo, E. Montseny ve P. Sobrevilla, State of the art survey on MRI brain tumor segmentation. *Magnetic Resonance Imaging*, 31 (8), 1426-1438, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2013.05.002>.
- [6] A. Baştuğ Koç ve D. Akgün, U-net mimarileri ile glioma tümör segmentasyonu üzerine bir literatür çalışması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26, 407-414, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.959590>.
- [7] Ö. Polat, C. Güngen, Classification of brain tumors from MR images using deep transfer learning. *Journal of Supercomputing*, 77, 7236-7252, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11227-020-03572-9>.
- [8] G. Xiao, H. Wang, J. Shen, Z. Chen, Z. Zhang ve X. Ge, Synergy factorized bilinear network with a dual suppression strategy for brain tumor classification in MRI. *Micromachines*, 13 (1), 2022. <https://doi.org/10.3390/mi13010015>.
- [9] B.V. Isunuri ve J. Kakarla, Three-class brain tumor classification from magnetic resonance images using separable convolution based neural network. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34, e6541, 2022. <https://doi.org/10.1002/cpe.6541>.
- [10] J. Kakarla, B.V. Isunuri, K.S. Doppalapudi ve K.S.R. Bylapudi, Three-class classification of brain magnetic resonance images using average-pooling convolutional neural network. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 31 (3), 1731-1740, 2021. <https://doi.org/10.1002/ima.22554>.

- [11] Z. Sobhaninia, S. Rezaei, N. Karimi, A. Emami ve S. Samavi, Brain Tumor Segmentation by Cascaded Deep Neural Networks Using Multiple Image Scales. 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), sayfa 1-4, Tabriz, Iran, 4-6 Ağustos 2020. <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9260876>.
- [12] H.N.T.K. Kaldera, S.R. Gunasekara ve M.B. Dissanayake, MRI based glioma segmentation using deep learning algorithms. 2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), sayfa 51-56, Colombo, Sri Lanka, 28-28 Mart 2019. <https://doi.org/10.23919/SCSE.2019.8842668>.
- [13] B. Maas, E. Zabehe ve S. Arabshahi, QuickTumorNet: Fast automatic multi-class segmentation of brain tumors. 10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER), sayfa 81-85, Italy, 4-6 Mayıs 2021. <https://doi.org/10.1109/NER49283.2021.9441286>.
- [14] F.J. Díaz-Pernas, M. Martínez-Zarzuela, M. Antón-Rodríguez ve D. González-Ortega, A deep learning approach for brain tumor classification and segmentation using a multiscale convolutional neural network. *Healthcare (Basel)*, 9 (2), 153, 2021. <https://doi.org/10.3390/healthcare9020153>.
- [15] K. Kamnitsas, C. Ledig, V.F.J. Newcombe, J.P. Simpson, A.D. Kane, D.K. Menon, D. Rueckert ve B. Glocker, Efficient multi-scale 3D CNN with fully connected CRF for accurate brain lesion segmentation. *Medical Image Analysis*, 36, 61-78, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.10.004>.
- [16] J. Cheng, Brain tumor dataset, figshare. 2017. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1512427.v5>.
- [17] H. Li, A. Li and M. Wang, A novel end-to-end brain tumor segmentation method using improved fully convolutional networks. *Computers in Biology and Medicine*, 108, 150-160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.03.014>.
- [18] D. Daimary, M.B. Bora, K. Amitab ve D. Kandar, Brain tumor segmentation from MRI images using hybrid convolutional neural networks. *Procedia Computer Science*, 167, 2419-2428, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.295>.
- [19] W. Wu, D. Li, J. Du, X. Gao, W. Gu, F. Zhao, X. Feng and H. Yan, An intelligent diagnosis method of brain MRI tumor segmentation using deep convolutional neural network and SVM algorithm. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 6789306, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6789306>.
- [20] J.L. Foo, A survey of user interaction and automation in medical image segmentation methods. Iowa State University Human Computer Interaction Technical Report ISU-HCI-2006-02, 2006.
- [21] N. Gordillo, E. Montseny ve P. Sobrevilla, State of the art survey on MRI brain tumor segmentation. *Magnetic Resonance Imaging*, 31 (8), 1426-1438, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2013.05.002>.
- [22] O. Ronneberger, P. Fischer, ve T. Brox, U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds) *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, 9351. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [23] J. Liang, X. Lv, C. Lu, X. Ye, X. Chen, J. Fu, C. Luo ve Y. Zhao, Prognostic factors of patients with Gliomas - an analysis on 335 patients with glioblastoma and other forms of gliomas. *BMC Cancer*, 20 (1), 35, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12885-019-6511-6>.
- [24] N. Sarbu, L. Oleaga, I. Valdivieco, T. Pujol ve J. Berenguer, Increased signal intensity in FLAIR sequences in the resection cavity can predict progression and progression-free survival in gliomas. *Neurocirugia (Astur)*, 27 (6), 269-276, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.neucir.2016.04.002>.





Makine öğrenme yöntemleri ile ağ trafik analizi Network traffic analysis with machine learning methods

Bülent Tuğrul^{1,*} , Adil Shihab Ahmed Ahmed² 

¹ Ankara Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara Türkiye

² Ankara Üniversitesi, Adli Bilişim Bölümü, 06590, Ankara Türkiye

Öz

Saldırı Tespit Sistemleri (STS) ağa yapılan saldırıları ağ yöneticilerine bildirmek için kullanılan tekniklerden biridir. Her ne kadar çeşitli anomali tespit teknikleri geliştirilmiş olsa da, bu alanda yüksek veri boyutsallığı, hesaplama karmaşıklığı üzerindeki etki, ve hesaplama süresi gibi zorluklar ve sorunlar bulunmaktadır. Bunun yanı sıra saldırı tespit sistemlerinin yanlış alarm vermeleri de anomali trafik tespit sorunlarından biri olmakta, bu sorunları aşmak için makine öğrenme yöntemlerine başvurarak sorunların azaltılması ve saldırı tespit sistemlerinin performansını yükseltilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada saldırı tespit sistemlerinin performansını yükseltmek amacıyla belirlediğimiz makine öğrenme yöntemlerini uygulayarak en iyi performansı gösteren J48 algoritması olup %99.92 bir doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu algoritma saldırı tespit sistemleri tarafından kullanılması için önerilen algoritma olup STS'nin çeşitli ağ trafiğini ayırt etmesine ve dışarıdan gelen trafiği saldırı olup olmadığına karar vermesinde yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Ağ güvenliği, Hizmet engelleme saldırısı, Makine öğrenmesi, Saldırı tespit sistemi.

Abstract

Intrusion Detection Systems (IDS) are one of the techniques used to notify network administrators of attacks on the network. Although various anomaly detection techniques have been developed, there are challenges and problems in this area, such as high data dimensionality, impact on computational complexity, and computation time. In addition, false alarms by intrusion detection systems are one of the problems in detecting anomaly traffic. Machine learning methods are used to overcome these problems, reduce the issues, and increase the performance of intrusion detection systems. In this study, the decision tree algorithm shows the best performance by applying the machine learning methods we have determined to increase the performance of intrusion detection systems, and it has demonstrated an accuracy rate of 99.92%. This algorithm is recommended for use by intrusion detection systems in our study, and it will help STS distinguish between various network traffic and decide whether the incoming traffic is an attack or not.

Keywords: Network security, Distributed denial of service attack (DDoS), Intrusion detection system, Machine learning

1 Giriş

Dünya çapında bilgi ve iletişim teknolojisi alanındaki mevcut gelişmeler, ağ yöneticileri için büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Nitekim bilgisayar ağları çok hızlı şekilde genişlemekte ve ağ kullanıcı sayısı her geçen gün artmaktadır. Artan ağ verimi ve güvenlik tehdidi ile birlikte, izinsiz giriş tespit sistemleri (STS'ler) üzerine yapılan çalışmalar, bilgisayar bilimi alanında büyük ilgi görmektedir.

Ağlarda bulunan kötü amaçlı yazılımlar verilere ve sistemlere karşı birçok tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle bu tehdidin güvence altına alınması gerekmektedir. Bu noktada ise bilgisayar ağlarında bulunan kötü amaçlı yazılımlara karşı verimli ve etkili yöntemlere gereksinim vardır. Ağ üzerinden geçen çok büyük miktarda veri, verinin önem ve gizliliği, veri güvenliğinin sağlanması ve kullanıcı verilerinin korunması gerekliliği ile ilgili olarak günümüz dünyasında ağ yöneten ve sistemi olası hasarlara karşı koruyan bir güvenlik sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Son zamanlarda dikkat çeken araçlardan biri de saldırı tespit sistemleridir. STS'ler, ağ trafiğini şüpheli etkinliklere karşı izler ve bu tür faaliyetleri keşfettiği anda harekete geçer. Bu sistem, zararlı etkinlik veya politika ihlaline karşı yapılan hamleleri yöneticiye bildirmekle yükümlüdür. Bu sistem, izinsiz girişin türü, konumu ve kaynağı hakkında bilgi verir. Aynı zamanda bu sistem, normal bir davranışı modelleyebilir ve modelden sapsarsa trafiği bir saldırı olarak algılar. Bu tür bir yaklaşıma anomali tespiti denir. Ayrıca farklı saldırıların davranışlarını modelleyebilir ve modele uyuyorsa trafiği bir saldırı olarak algılayabilir. Bu tür bir yaklaşıma kötüye kullanım tespiti veya imza tespiti denir.

Bu çalışmada makine öğrenme yöntemlerini kullanarak STS'lerin performansını yükseltmek için belirlediğimiz algoritmalar arasında en iyi performans gösteren yöntem saptanmıştır.

Bunun için CICIDS2017 veri seti kullanılmıştır. Bu veri setini, veri ön işlemeden geçirip veri dengeleme işlemine tabi tutularak temiz bir veri seti elde edildikten sonra makine öğrenme yöntemleri (Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: btugrul@eng.ankara.edu.tr (B. Tuğrul)

Geliş / Received: 15.05.2022 Kabul / Accepted: 25.07.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1113956

(DVM), K en yakın komşu algoritması (KNN), J48 ve Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron-MLP)) WEKA programı aracılığı ile uygulanmıştır ve bunların arasında en iyi performans gösteren yöntem saptanmıştır.

Saldırı tespit sistemleri tarafından kullanılan metotlar (algoritmalar) kimi zaman ağ üzerinden geçen trafiği yanlış algılayıp yöneticiye alarm olarak bildirmesi örneğin normal trafikleri saldırı olarak algılaması veya saldırı trafiklerini algılamamaları gibi sorunlar ile karşı karşıya kalabilmekte. Çalışmamız bu gibi sorunların iyileştirilmesini veya giderilmesini ve çok sayıda yanlış alarmlara karşı gerekli önlemlerin alınmasını amaçlamaktadır.

Çalışmanın hedefleri:

- I. Boyut azaltma yöntemini kullanarak zamana dayalı verilere ve özellik çıkarımına dayalı öğrenme doğruluğunu dinamik olarak artıran otomatik bir sistem geliştirmek
- II. CICIDS2017 veri setinin temiz ve dengeli bir alt kümesini seçmek
- III. Belirlediğimiz yöntemleri kullanarak seçilen veri seti üzerinde uygulamak
- IV. Bütün yöntemlerin performanslarının karşılaştırılması

En iyi performans gösteren yöntemin önerilmesi ve saldırı tespit sistemlerinde kullanılması sonucunda anormal trafiğin tespit edilmesi ve daha iyileştirilmesi sonucunda operatöre bildirilip gerekli önlemlerin alınması.

İlgili Çalışmalar: Son zamanlarda teknoloji alanındaki gelişmelere bağlı olarak ağ cihazlarının sayısı artış eğilimi göstermektedir. Bu durum güvenlik sorunu daha da önemli hale getirmektedir. Bu güvenlik problemine çözüm üretmek için KDD-Cup99 ve NSL-KDD gibi veri setleri oluşturuldu. Bu veri setlerinin eski olmaları, yeterli senaryolar içermemeleri ve barındırdıkları bazı problemler nedeniyle yeni veri setlerin oluşturulmasına gerek duyuldu. Ağa izinsiz giriş tespiti sistemlerinin geliştirilmesinde CICIDS2017 veri seti artık yaygın olarak kullanılmaktadır. Yulianto vd. [1] CICIDS2017 veri kümesi ile bir IDS sistemi tasarlamışlardır. Sistemin performansını artırmak için Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği (SMOTE), Temel Bileşen Analizi (PCA) ve Topluluk Özellik Seçim'ini (EFS) yöntemlerini çalışmalarında kullanmışlardır. Yapmış oldukları analizler sonucunda geliştirdikleri yöntemin SVM tabanlı yöntemden daha iyi sonuçlar ürettiğini ifade etmişlerdir. Engelen vd. [2] CICIDS2017 veri setinde tespit ettikleri trafik üretimi, akış yapısı, özellik çıkarma ve etiketleme ile ilgili bazı problemleri ortadan kaldırmak için veri seti üzerinde çeşitli ön işlem yöntemleri uygulamışlardır. Elde ettikleri yeni veri setinin %20'den fazla verisi yeniden oluşturularak etiketlenmiştir. Eski ve yeni veri seti çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri ile eğitilerek sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar yeni oluşturulan veri setinin daha iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir. Priyanka ve Kumar [3] diğer çalışmalardan farklı olarak bir derin öğrenme yapısı olan Evrişimli Sinir Ağlarını (CNN) geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri ile beraber kullanmıştır. Ama CNN yöntemi rastgele ormandan daha iyi sonuç üretmemiştir. Rosay vd. [4] benzer şekilde CICIDS2017 veri setinde

gözlemledikleri bazı problemleri temizlemek için yeni bir özellik çıkarım aracı olan açık kaynak kodlu LycoSTand'u geliştirmişlerdir. Bu aracı ve orijinal CICIDS2017 veri setini kullanarak yeni LYCOS-IDS2017 veri setini oluşturmuşlardır. Orijinal ve yeni veri setleri arasındaki performans karşılaştırması gerçekleştirmişlerdir. Tüm makine öğrenimi yöntemlerinin önemli iyileşmeler gösterdiklerini savunmaktadırlar. Ayrıca, Rastgele Orman yöntemi tüm performans metrikleri dikkate alındığında diğer bütün yöntemlerden daha iyi değerler üretmiştir. Sonuç olarak yapılan tüm bu çalışmalar ışığında, gelen ağ trafiğini analiz ederek saldırıların önüne geçilmesi hususunda saldırı tespit sistemlerinin önemi vurgulanmıştır.

2 Materyal ve metot

Saldırı Tespit Sistemi veri analizi kapsamında yürütülen bu çalışma, CICIDS2017 veri seti, Windows 10 işletim sistemi, Intel(R) Core (TM) i3-3110M CPU, 4 GB Ram, 500 Gigabayt HDD nitelikli belleği olan dizüstü bilgisayarda WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) sürüm 3.8.5 uygulaması sayesinde yapılan deneyler sonucunda makine öğrenmesi ve veri madenciliği algoritmaları değerlendirilmiş ve performans ölçümleri incelenmiştir. Test çalışmalarına geçmeden önce kullandığımız metotlar WEKA programı aracılığı yapılmıştır. Bu program 2.1 başlık altında kısaca incelenmiştir.

2.1 WEKA Program

Waikato Environment for Knowledge Analysis (Weka), Yeni Zelanda Waikato Üniversitesinde Java ile yazılmış açık kaynak olarak geliştirilen bir makine öğrenimi yazılımıdır. WEKA, bir dizi makine öğrenme algoritması kullanarak doğrudan verilere uygulayabilen veya Java kodundan çağırabilen bir veri madenciliği yazılımıdır. WEKA, "ARFF" (Attribute Relationship File Format) formatına sahip olmakla birlikte çıkan sonuçları görsel bir şekilde alınması da mümkündür Şekil 1'de WEKA programı giriş ekranı gösterilmiştir [5, 6].



Şekil 1. WEKA programı giriş ekranı

Explorer: Ham veriler üzerinde veri madenciliği görevlerini gerçekleştirmek için grafiksel ara yüz ile ekrandaki dosyaları açma veya alma, daha sonra çalışma hedefine göre veri işleme, çeşitli algoritmalar kullanarak (sınıflandırma,

kümeleme, ilişkilendirme algoritmalarını) bir çok analiz gerçekleştirilebilir [5].

Experimenter: Veri setleri üzerinde algoritma uygulamalarımıza deneyleri tasarlamamıza, çalıştırmamıza ve sonuçları analiz etmemize olanak tanır [6].

KnowledgeFlow: WEKA ara yüzü olan Explorer üzerinde bulunan bütün algoritmaları grafiksel olarak uygulamamızı sağlayan bir ara yüzdür, ayrıca KnowledgeFlow verileri artımlı veya toplu olarak işleyebilmektedir [6].

Workbench: Bu kullanıcı ara yüzü birçok zaman uzmanlar tarafından kullanılmaktadır [7].

Simple CLI: Weka programı bir işletim sistemi üzerinde kullanılması halinde ve o işletim sistemi komut satırı desteklemiyor ise Weka programı kendi üzerinde bulunan Simple CLI ara yüzü ile kendi komutlarını çalıştırabilir. Java tabanlı bu sürüm birçok farklı uygulama alanında, özellikle eğitim amaçlı ve araştırma amaçlı kullanılmaktadır [6].

2.2 Veri seti açıklaması ve veri işleme

Bu çalışmada kullanılan veri seti Brunswick'in (UNB) Kanada Siber Güvenlik Enstitüsü (CIC) tarafından oluşturulmuştur. Bu saldırı tespit sistemi veri tabanı serbest bir veri tabanından ibarettir ve araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. CICIDS2017 Veri seti 3,8 milyon veri kaydı barındırır [8]. Veritabanı kayıt işlemi 2017 yılında beş gün sürmüştür. Veritabanı bulunan trafik türleri ise Benign, DoS Hulk Saldırısı, Port Tarama, DDoS Saldırısı, Dos Golden Eye saldırısı, FTP Patator, SSH Patator, Dos Slow Loris, DoS Slow HTTP Testi, Botnet, kaba kuvvet (brute-force), XSS Web Saldırısı, Infiltration SQL Enjeksiyon ve Heart Bleed saldırıları bulunmaktadır.

2.2.1 Veri ön işleme

Veri ön işleme, ham verilerin hazırlanması ve bir makine öğrenimi modeline uygun hale getirilmesi sürecidir. Veri ön işleme bir makine öğrenimi modeli oluştururken ilk ve en önemli adımlarından biridir çünkü verileri, veri madenciliğinde fiilen uygulamak için uygun bir şekilde veya biçimde hazırlar. Bazen veriler, bir makine öğrenmesi projesi oluştururken ön işleme sırasında her zaman tek bir dosya halinde temiz ve formatlanmış verilere rastlamamız söz konusu olmayabilir. Bu verileri farklı dosyalar içerisinde toplayarak tek bir dosya haline getirilmesi sonucunda uygun bir format biçiminde işlenmesi sağlanır. Çünkü bu verilerle herhangi bir işlem yapılırken, verilerin temiz ve formatlı bir şekilde olması zorunludur.

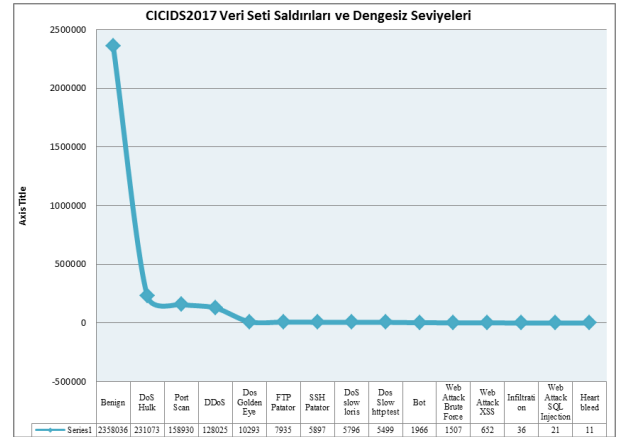
Veri ön işlemeye ihtiyaç duyulmasının temel nedeni ise, gerçekte veriler genellikle gürültü ve karmaşık değerler içerir ve makine öğrenimi için uygun bir biçimde değildir. Dolayısıyla veri ön işlemenin görevi, verileri temizlemek ve bir makine öğrenim modelinin uygulanmasına hazır hale getirilmesidir sonuç olarak makine öğrenim algoritmalarının doğruluğunu ya da verimliliğini artırır ve sağlıklı bir yöntem seçilmesine yardımcı olan bir işlemdir. Bu yüzden verilerin temizlenmesini ve formatlanmasını veri ön işleme üstlenerek yapmaktadır.



Şekil 2. CICIDS2017 veri seti üzerinde veri ön işleme şeması

2.2.2 Dengesiz veriler (Imbalanced data)

Veri dengesizliği, genellikle bir veri kümesi içerisinde bulunan sınıfların eşit olmayan dağılımını yansıtır. Bu çalışmada kullandığımız CICIDS2017 veri setinde, STS'ler tarafından tespit edilen trafiğin çoğu saldırı değildir ancak tespiti yapılan atakların pek azı saldırı sınıfı olarak nitelendirilmektedir. Bu da bize veri setinde bulunan saldırı sınıfları hakkında saldırı ve saldırı olmayan sınıflar arasında 80:20 gibi bir oranın belirlenmesini ve fikir sahibi olmamızı sağlar. Dolayısıyla bu bilgiler ışığından yola çıkarak ilk olarak, verilerdeki dengesizliği görmek için aşağıda (Şekil 3) bir sınıf dağılımı yapılmış ve ardından da hafiften aşırıya doğru dengesiz verilerin aralığı Tablo 1'de açıklanmıştır.



Şekil 3. CICIDS2017 veri seti saldırıları ve dengesiz seviyeleri

Tablo 1. Verilerin dengesizlik derecesi ve % düzeyi

NO	Dengesizlik Derecesi	% Düzeyi
1	Hafif	Veri setinin %20-40'ı
2	Orta	Veri setinin %1-20'si
3	Fazla (Aşırı)	Veri setinin <%1'i

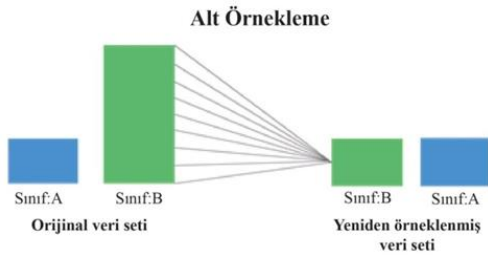
Bu derece sınıflandırmasına göre, veri kümelerde mevcut olan saldırı sınıfını değerlendireceğiz ve modelimizde kalacak sınıf yalnızca orta veya daha büyük olan verilerdir. Ancak veri setinde gözlenen herhangi bir aşırı dengesiz veri bulunması halinde, veri dengeleme sürecini engellemek için kaldırılacaktır [9].

2.2.3 Verileri yeniden örnekleme

Yeniden örnekleme tekniği, dengesiz veri kümeleriyle başa çıkmak için yaygın olarak benimsenen ve kullanılan bir tekniktir. Genellikle bu tekniğin uygulanması çok kolaydır ve çalıştırılması hızlıdır. Ayrıca başlangıç için ideal bir tekniktir.

Yeniden örnekleme tekniğinin çalışma mekanizması ise, azınlık sınıfına örnek ekleyerek veya çoğunluk sınıfından örnek silerek veri kümesinin daha dengeli bir hale gelmesini sağlar. Bu sayede de daha iyi makine öğrenimi modelleri oluşturur.

Bu değişiklikleri belirli bir veri kümesinde tanıtmının yolu iki ana yöntemle elde edilir: Aşırı Örnekleme ve Alt Örnekleme. Bu çalışmada veri setini dengelemek için alt örnekleme yöntemi kullanılacaktır.

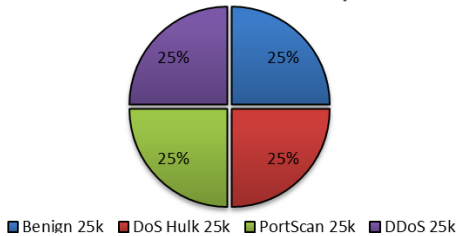


Şekil 4. Veri alt örnekleme şeması temsili

Şekil 3'e göre, örneklerin sayısı bir etiket türünden diğerine değişkenlik gösterdiğinden dolayı, veri kümesi örnekleri arasında bir dengeleme söz konusu olmadığı için bu da öğrenme modellerinin performansını etkileyecektir. Çalışmamız sırasında makine öğrenme yöntemlerini denemek üzere en üstten 4 etiket türü için filtrelenen CICIDS2017 verilerinin bir alt kümesi seçildi. Filtreleme sonucunda, Şekil 5'te gösterilen (Benign, Dos Hulk, Port Tarama ve DDoS) türler elde edilmiştir.

Ayrıca, örnek işleme sınırlamaları nedeniyle verilerin alt kümesi azaltılmıştır. Yani etiket türlerinin her biri 25K örneğe indirgenmiştir. Bu da bize kabul edilebilir bir hesaplama süresi veren toplam 100K satırlık bir veri örneği sonucunu elde etmemizi sağladı. Veri dağılımı Şekil 5'te gösterilmiştir.

Alt Örneklemeden Sonraki Saldırıların Şeması Temsili



Şekil 5. Alt örneklemeden sonraki her biri saldırının şeması temsili

2.3 Boyut indirgeme

Yüksek boyutlu verilerin işlenmesi ve bu veriler içerisinde en etkili güce sahip olan önemli özellikli verileri bulmak zordur. Ayrıca büyük veriler önemli sayıda öznitelik öğrenme modelini yavaşlatmakta ve doğruluk oranını

etkilemektedir. Böyle bir durumla başa çıkmanın en pratik yolu, verileri makine öğrenimi ve model üretimi için kaynak veri olarak kullanmadan önce öznitelik sayısını en aza indirmektir [10]. Şekil 6, veri boyutunu azaltırken izlenecek genel fikri temsil etmektedir. STS alanlarında daha önce araştırılmış ve test edilmiş, iyi bilinen bazı boyutsal küçülme (azaltma) yöntemleri vardır. Her boyut indirgeme metodunun, bu çalışmada inceleyeceğimiz kendi veri projeksiyonu ve görselleştirme yolu vardır.

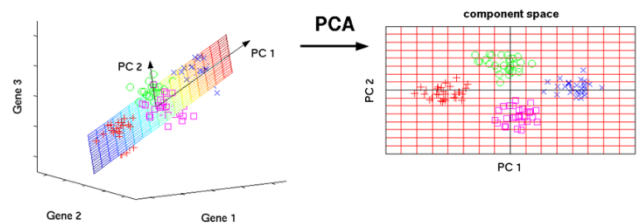


Şekil 6. Veri azaltma şeması

2.3.1 Temel bileşenler analizi (Principle components analysis- PCA)

Temel Bileşen Analizi, makine öğreniminde verilerin boyutunu azaltmak için kullanılan denetimsiz bir öğrenme algoritmasıdır. PCA, boyut azaltmak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. PCA, eğilimleri ve kalıpları korurken, veri özellikleri açısından yüksek boyutlu verileri basitleştiren bir boyut azaltma tekniğidir. Bu, verilerin özelliklerin açıklaması olarak işlev gören daha küçük boyutlara çevrilmesiyle elde edilir. PCA, her bir özelliğin varyansını dikkate alarak çalışır, çünkü yüksek nitelik, sınıflar arasındaki iyi ayrımı gösterir ve dolayısıyla boyutluluğu azaltır. PCA, veri noktası ile ana bileşen arasında olan mesafeyi azaltır. PCA, $m < n$ olduğunda; n -boyutlu uzayı m -boyutlu uzaya eşler. Burada n ana bileşenleri temsil eder [11]. PCA algoritması, aşağıdaki gibi bazı matematiksel kavramlara dayanmaktadır:

- Varyans ve Kovaryans
- Öz değerler ve Öz faktörleri



Şekil 7. PCA temsili

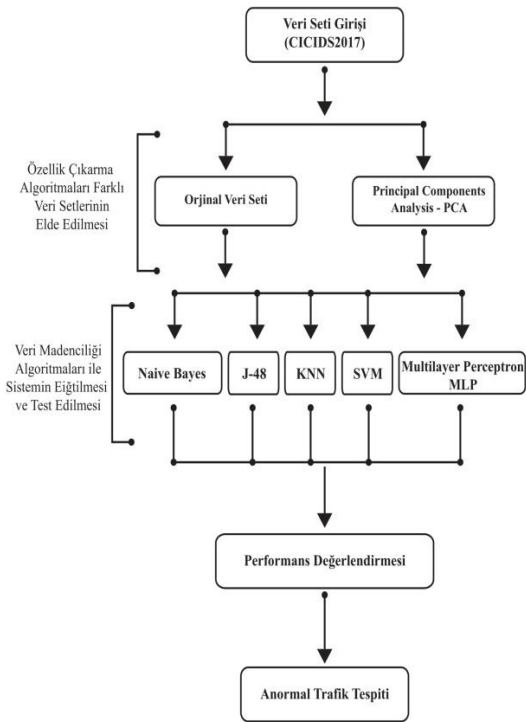
2.4 Makine öğrenme yöntemleri

Makine Öğrenimi (MÖ), cihazları bilinen kurallara göre programlamak yerine deneyimlerinden öğrenmelerine yardımcı olan yapay zekâ tekniklerinden biridir [12]. MÖ, insan yardımına, karmaşık matematiksel denklemlere ihtiyaç duymaz ve dinamik ağlarda çalışabilir. Son zamanlarda IoT güvenliğini sağlamak için makine öğrenim tekniklerini dikkate değer bir şekilde geliştirildi [13, 14].

Bu nedenle, cihazların davranışlarını analiz ederek çeşitli saldırıları erken bir aşamada tespit etmek için MÖ yöntemleri kullanılabilir. Buna ek olarak, bazı cihazlar için

çeşitli MÖ algoritmaları kullanılarak uygun çözümler sunulabilir.

Makine Öğrenme Yöntemleri ise, verileri ön işleme aşamasından geçirerek, boyutsallığını küçülttükten ve etiketlerle birleştirdikten sonra öğrenme ve test etme için geçen süreçtir. Kullanılacak sınıflandırıcılar, (Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi (DVM), K en yakın komşu algoritması (KNN), J48 ve Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer perceptron-MLP)) yöntemlerini kullanarak, makine öğrenmesi yöntemi sayesinde data analizi için önerilen en iyi model seçimi hedeflenmiştir. Şekil 8'de izlenecek metodoloji kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır.



Şekil 8. Performans testleri blok diyagramı

- Karar ağacı

Karar ağacı, uygulaması basit ve sonuçları herkes tarafından kolayca yorumlanabilir bir yöntemdir. Temsili yapısı, herkes tarafından anlaşılabilir (IF-THEN) kuralları olarak dışa aktarabilir. Karar ağacı algoritmaları, hiyerarşik yapıları bazı karar düğümlerinin ortadan kaldırılmasına izin verdiği için diğer öğrenme algoritmalarına göre daha hızlı çalışır. Karar ağacından kusursuz bir model öğrenmek yerine, en basit ağaç ile modeli bulmak, test verileri üzerindeki performansın iyileştirilebilmesi için önemlidir (Alpaydin, 2010, s:185). Karar ağaçları, verileri analiz edebilir ve ağdaki kötü niyetli faaliyetleri gösteren önemli özellikleri belirleyebilir. Üstelik karar ağacı yöntemi çok sayıda izinsiz giriş tespit verilerini analiz edip güvenlik sistemlerinin performansını artırır [15].

Karar ağacı algoritmalarının çalışma mekanizmaları ise, karar ağacı algoritmaları, giriş özelliklerini ağaç düğümlerine eşler. Özellikler, bilgi kazanımı yöntemiyle önemlerine göre sıralanır. Aralarından en önemli özellikli

olan kök düğüm olarak seçilir. Kök düğümü seçtikten sonra algoritma özyinelemeli olarak çalışmaya başlar. Her düğüm için, karşılık gelen özelliklerin her bir değeri için yeni dallar oluşturulur. Daha sonra eğitim örnekleri, o özellik için değerlerine göre bu dallara ayrılır. Her dal için düğüm olarak yeni bir özellik seçilir ve özyinelemeli algoritma bu düğümler üzerinde çalışmaya devam eder. Algoritma, tüm yaprak düğümleri aynı örnek etikete sahip olana kadar çalışır.

- Naive bayes

Bu makine öğrenimi sınıflandırıcı modeli Bayes sınıflandırması veya daha çok Naive Bayes sınıflandırması olarak bilinir. Sonuçları tahmin etmek için olasılıklara ve koşullu olasılıklara dayanan istatistiksel bir sınıflandırmadır. Gerçek olan veriler üzerinde denendiği zaman yüksek performans göstermiştir. Naive Bayes yöntemi Bayes teoremine dayanmaktadır [16].

Naive Bayes sınıflandırıcısının çeşitli sınırlamaları olmasına rağmen, özellikler gerçek sınıfa göre koşullu olarak bağımsız ise, optimal bir sınıflandırıcıdır. Genellikle, daha karmaşık algoritmalarla karşılaştırılan ilk sınıflandırıcılardan biridir. Buna ek olarak Naive Bayes, belirli kullanıcı türleri, diğer karmaşık sınıflandırıcılara (örn., DVM) kıyasla sınıflandırma modelini daha sezgisel olarak anladıklarını ifade etmiştir. Naive Bayes sınıflandırıcısının en büyük avantajlarından biri, çevrimiçi bir algoritma olması ve eğitiminin doğrusal zamanda tamamlanabilmesi, ayrıca NB'nin kolay anlaşılması, sınıflandırmalar için daha az veri gerektirmesi, uygulanmasının kolay olması, çok aşamalı sınıflandırma için uygulanabilir olması gibi avantajları vardır.

NB özellikler arasındaki etkileşimlere ve doğru sonuca ulaşmaya direnebilecek ön bilgilere bağlıdır. Son olarak NB genellikle ağ katmanında ve anomali tespitinde izinsiz giriş tespiti için kullanılır [17].

- K- En yakın komşuluk algoritması (K-NN)

K en yakın komşuluk algoritması, belirli bir veri örneğinin sınıfını tahmin etmek için "özellik benzerliği" fikrini kullanan en basit denetimli makine öğrenme algoritmalarından biridir. Bir örneği komşularına olan mesafesini hesaplayarak komşularına göre tanımlar. KNN algoritmasında, K parametresi modelin performansını etkiler. K değeri çok küçük ise model aşırı uyuma duyarlı olabilir. K değeri çok büyük ise örneğinin yanlış sınıflandırılmasına neden olabilir. Ayrıca bu algoritma sınıflandırmanın yanı sıra regresyon için de kullanılmaktadır [18].

KNN, genellikle Öklid mesafesini kullanan denetimli öğrenme tekniğine dayalı en basit makine öğrenimi algoritmalarından biridir. K-NN, istatistiksel olarak parametrik olmayan bir algoritmadır [19], yani temel veriler üzerinde herhangi bir varsayımda bulunmaz.

KNN'nin kullandığı Öklid uzaklığı, bilinmeyen düğümlere ortalama bir değer belirler [20]. Örneğin, verilerde bulunan herhangi bir düğüm eksik ise, bu eksik düğümü en yakın komşunun değerinden tahmin edilir. Bu değer kesin değildir, ancak olası bir eksik düğümü ortaya çıkar ise tanımlamaya yardımcı olur.

- Destek Vektör Makinesi (DVM)

Destek Vektör Makinesi (DVM), çeşitli özelliklere sahip bir model sınıflandırma ve regresyon türü olup verileri analiz etmek için kullanılır. Esas olarak ikili sınıflandırma (lineer ve non lineer) tekniği olarak kullanılmıştır. Bu teknik, ilk olarak 1998 yılında bilim adamı Vladimir Vapnik tarafından önerilen ve temel istatistiksel metotlara dayanan kuvvetli bir sınıflandırıcı tekniğidir [21].

Destek Vektör Makinesi (DVM), sınıflandırıcı, istatistiksel öğrenme teorisine dayanır ve yapısal risk minimizasyon kurallarını kullanarak bir pozitif örnek sınıfını bir negatif örnek sınıfından izole etmek için bir hiper düzlem üretir. DVM, veri noktalarını bir hiper düzlemlerle ayırmayı ve her veri noktasının hangi sınıfa ait olduğunu belirlemeyi amaçlar. DVM, tüm sınıfları ayırmak gerektiğinden destek vektörleri arasındaki marjı maksimize eder. DVM, yüksek sınıflandırma doğruluğu ve regresyon ve sınıflandırma görevlerini çözmedeki performansı nedeniyle popüler bir makine öğrenme tekniğidir. SVM başlangıçta ikili sınıflandırma için tasarlanmıştır. Daha sonra çok sınıflı senaryolara genişletilmiştir [22].

STS'ler açısından bir destek vektör makinesi kullanmanın ana avantajı, izinsiz girişleri gerçek zamanlı olarak tespit etme yeteneği sahiptir. Dolayısıyla ile DVM'ler, iyi dairesel yapıları ve boyutsallık problemin üstesinden gelme yetenekleri nedeniyle anormal izinsiz girişleri tespit etmek için popüler bir teknik haline gelmiştir. Ayrıca, küresel (global) olarak minimum düzeydeki gerçek riskleri bulmak için de faydalıdır. Çünkü küçük eğitim-örnek koşulları altında yüksek boyutlu alanlardaki çekirdek hilelerini iyi bir şekilde genelleştirebildikleri için, yapısal riskleri azaltmada kullanılabilirler.

- Çok katmanlı algılayıcı- Multilayer perceptron (MLP)

Çok katmanlı algılayıcı, yapay sinir ağı türlerinden biri olarak bilinmektedir. MLP ileri besleme olarak tanımlanır yani girdileri çıktı vektörlerine eşleme yapan bir ağ türüdür. MLP, girdi katmanının alt seviyede olduğu, çıktı katmanının en üst seviyede olduğu ve ortadaki diğer katmanların gizlendiği, birden fazla düğüm ve seviye katmanına sahip bir grafik olarak karakterize edilebilir bir tekniktir. Bu yüzden bu sinir ağı türünde bir veya daha fazla gizli katman oluşturmak mümkündür. MLP ağının bağlantısı, üst seviyedeki düğümlerin alt seviyedeki tüm düğümlere bağlantı sağlandığı yerdir. Çok Katmanlı Algılayıcı genellikle denetimli öğrenme zorlukları için kullanılır. MLP, doğrusal olmayan verileri çözme sınırlamasını düzelten tekil bir katman öncüsünün uzantısıdır. Girdi katmanında iletilen veriler daha sonra gizli katmanda sabit sayıda yineleme ve katman için ileri geri akar sonuçlar çıktı katmanından elde edilir. Verileri eğitirken uygulanan mimariyi çalıştıran modeli temsil eder [23].

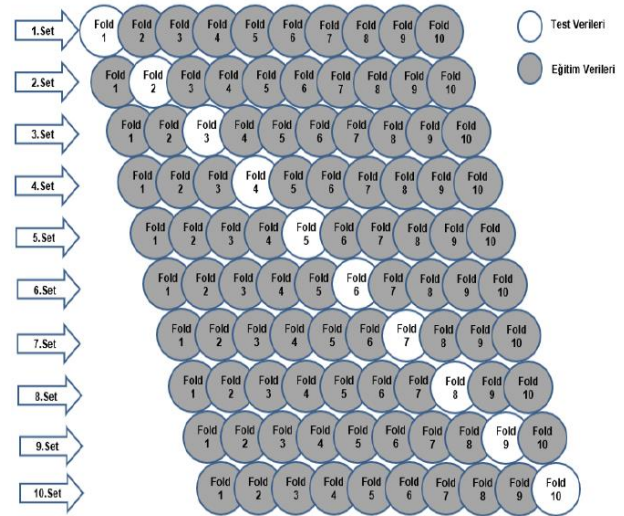
Sonuç olarak MLP eğitim aşamasında çok uzun zaman almasına rağmen verileri test etmek için çok az zaman harcayan bir sinir ağı sınıflandırıcıdır. Sınıflandırma, regresyon ve tahmin gibi çeşitli görevler için kullanılır. MLP üç katmana dayalı olarak çalışır: sınıf sayısı (çıkıtı), veri kümesi (giriş) ve gizli katmanlar.

3 Bulgular ve tartışma

Brunswick'in (UNB) Kanada Siber Güvenlik Enstitüsü (CIC) tarafından oluşturulmuş CICIDS2017 veri seti üzerinde uygulanan her bir algoritmanın ağırlıklı ortalaması Tablo 2'de sunulmuştur. Bunun yanı sıra verilmiş olan algoritmaları uygularken sınama seçeneği olarak Çapraz Doğrulama kullanılıp kat sayısı ise 10 olarak belirlenmiştir. İlk adımın birinci kısmı test verisi geri kalan 9'u ise eğitim verisidir. Ardından ikinci adımda ise verinin 2. kısmı test verisi ve geri kalan 9 kısmı ise eğitim verisi olarak analiz edilmiştir. Bütün adımlar (10 adım) aynı şekilde devam etmektedir. Çıkan analiz sonucunda %94.13 Naive Bayes, %96.58 Destek vektör makinesi (DVM), %99.87 K en yakın komşu algoritması (KNN) ve bu yöntemde K sayısı 1 olarak en iyi sonuç ortaya çıkmıştır, ardından %99.92 doğruluk sonucunu J48 vermiştir, son olarak %98.50 doğruluk sonucunu MLP algoritması kayıttır.

Tablo 2. Çapraz Doğrulama Kat=10 kullanarak alınan algoritma sonuçları

	Naive Bayes	SVM	KNN	J48	MLP
Doğruluk	94.14	96.58	99.88	99.92	98.50
Hassasiyet	0.95	0.96	0.99	0.99	0.98
Duyarlılık	0.94	0.96	0.99	0.99	0.98
F-Skor	0.94	0.96	0.99	0.99	0.98
ROC Alan	0.98	0.98	0.99	1.00	0.99



Şekil 9. 10 katlı çapraz doğrulama yapısı

Tablo 3. Çapraz Doğrulama Kat=10 ve boyutsal indirgeme yöntemi PCA kullanarak alınan algoritma sonuçları

	PCA Naive Bayes	PCA SVM	PCA KNN K=1	PCA J48	PCA MLP
Doğruluk%	82.42	95.07	99.88	99.76	98.23
Hassasiyet	0.83	0.95	0.99	0.99	0.98
Duyarlılık	0.82	0.95	0.99	0.99	0.98
F-Skor	0.81	0.95	0.99	0.99	0.98
ROC Alan	0.94	0.97	0.99	0.99	0.99

Tablo 3'te CICIDS2017 veri seti üzerinde boyutsal indirgeme algoritması olan PCA uygulanıp veri setinin boyutu küçültülmüştür ve test seçeneği olarak Çapraz Doğrulama kat sayısı 10 olup ardından belirlediğimiz algoritmalar uygulanarak her bir algoritma için doğruluk elde edilmiştir. Bunlar %82.42 Naive Bayes, %95.07 DVM, %99.88 k-NN, ardından %99.76 J48 ve son olarak %98.23 MLP olarak sonuçlar elde edilmiştir, bunun yanı sıra (Hassasiyet, Duyarlılık, F-Skor, ROC Alan) değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak **Tablo 3**'te gösterilmiştir.

Veri seti üzerinde uygulanmış olunan boyutsal indirgeme algoritması olan PCA ardından test seçeneği olarak Çapraz Doğrulama kat sayısı 10 olarak algoritmalar arasında en iyi performansı gösteren algoritma K-NN ve bu yöntemde k sayısı 1 olarak en iyi sonuç elde edilerek doğruluk değeri %99.88 olarak bu aşamada en yüksek performansı göstermiştir.

Tablo 4. Bölünme yüzdesi 80% kullanarak alınan algoritma sonuçları

	Naive Bayes	SVM	KNN	J48	MLP
Doğruluk%	93.94	96.57	99.87	99.92	98.74
Hassasiyet	0.83	0.955	0.99	0.99	0.98
Duyarlılık	0.94	0.968	0.99	0.99	0.98
F-Skor	0.81	0.951	0.99	0.99	0.98
ROC Alan	0.93	0.96	0.99	0.99	0.98

Tablo 4'teki sonuçlar makine öğrenimine sunulan CICIDS2017 100 bin satır, 70 nitelik ve 4 sınıftan oluşan veri seti üzerinde uygulanan algoritmalar neticesinde diğer tablolarda uygulandığı gibi ağırlıklı ortalaması alınmıştır. Bu aşamada kullanılan test seçeneği olarak bölünme yüzdesi % 80 olarak belirlenmiştir. Bu değer %80'i eğitim seti ve %20'de test seti olarak her bir algoritmayı verilen veri seti üzerinde uygulayarak ayrı ayrı analiz edilecektir. CICIDS2017 veri setinin %20'i üzerinde yaklaşık 20K satırlık bir veri seti uygulanmış olan algoritmalar sonucunda %93.94 Naive Bayes, %96.57 DVM, %99.87 k-NN algoritması ve bu yöntemde k sayısı 1 olarak en iyi performansı göstermiş, %99.92 J48 ve son olarak %98.74 MLP olarakta görülmüştür.

Sonuç olarak uygulanmış olunan bölünme yüzdesi %80 değeriyle algoritmalar arasında en iyi performansı gösteren algoritma J48 olup ve doğruluk değeri %99.92 olarak bu aşamada en yüksek performansı göstermiştir.

Tablo 5. Bölünme yüzdesi 80% ve boyutsal indirgeme yöntemi PCA kullanarak alınan algoritma sonuçları

	PCA Naive Bayes	PCA SVM	PCA KNN k=2	PCA J48	PCA MLP
Doğruluk%	82.45	95.07	99.86	99.69	98.94
Hassasiyet	0.83	0.95	0.99	0.99	0.99
Duyarlılık	0.82	0.95	0.99	0.99	0.98
F-Skor	0.81	0.95	0.99	0.99	0.98
ROC Alan	0.94	0.92	0.99	0.99	0.99

Tablo 5'te verilmiş olan sonuçlar veri seti üzerinde uygulanan boyutsal indirgeme algoritması olan PCA uygulanıp veri setinin boyutu küçültülmüştür, ardından algoritmaları uygulama sırasında test seçeneği olarak bölünme yüzde değeri %80 olarak seçilmiştir. Belirlediğimiz algoritmalar ve MLP uygulanarak her bir algoritma için doğruluk elde edilmiştir. Bunlar %82.45 Naive Bayes, %95.07 destek vektör makinesi, %99.86 k-NN, ardından %99.69 J48 ve son olarakta %98.94 Multilayer perceptron olarak sonuçlar elde edilmiştir, bunun yanı sıra (Hassasiyet, Duyarlılık, F-Skor, ROC Alan) değerlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak **Tablo 4**'te gösterilmiştir.

Uygulanmış olunan veri seti üzerinde boyutsal indirgeme algoritması olan PCA ardından test seçeneği olarak bölünme yüzdesi %80 olup algoritmalar arasında en iyi performansı gösteren algoritma k-NN ve bu yöntemde k sayısı 2 olarak en iyi sonuç elde edilerek doğruluk %99.86 olarak bu aşamada en yüksek performansı göstermiştir.

3.1 En iyi performans gösteren algoritma

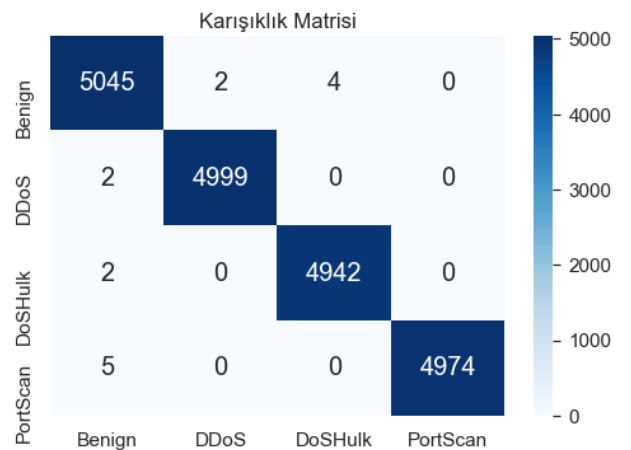
Bu çalışmada CICIDS2017 veri seti üzerinde 5 ayrı algoritma uygulanarak sonuçlar elde ettik, bu sonuçlar içerisinde kullandığımız 2 ayrı veri seti ve 2 ayrı test seçeneği bulunmakta, bu veri setinin 1. Veri Ön işlemeden geçen orijinal veri seti 2. ise aynı şekilde veri ön işlemeden geçerek boyutsal indirgeme işlemine yani PCA tabii tutularak yeni bir veri seti elde edilmiştir.

Diğer yandan 2 ayrı test seçeneği kullanılmakta, bunların 1. Çapraz Doğrulama kat sayısı 10 olup diğeri ise Bölünme yüzdesi 80 olarak algoritmalar ile uygulanmıştır.

Uygulanan Çapraz Doğrulama kat=10 test seçeneğinde veri setinin tamamı kullanarak, diğeri ise Bölünme yüzdesi %80 olarak veri setinin 20K'sı kullanılıp yukarıda bulunan tablolardaki sonuçlar elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçları karşılaştırarak en iyi performansı gösteren algoritma Bölünme yüzdesi 80 test seçeneğini ve orijinal veri seti üzerinde uygulanan J48 olarak kayıt edilmiştir. Çıkan sonuca göre doğruluk değeri %99.92 olarak (**Tablo 4**) verilen sonuçlar en iyi performans gösteren algoritma olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. J48 algoritması seçerek bölünme yüzdesi 80% uygulanan karışıklık matrisi sonucu



Tablo 6’da en iyi performans gösteren J48 Matrisi, veri seti üzerinde uygulanan bölünme yüzdesi 80 olup sonucu ortaya çıkmıştır, bu matrisin aa kısmı BENIGN, bb kısmı DDoS, cc kısmı DoSHulk ve dd kısmında PortScan değerleri uygulanmış olan algoritma sunucunda belirlenmiştir.

Ancak matrikste olan DDos (ab) kısım, DoSHulk olan (ac) kısmı ve PortScan olan (ad) kısımlar algoritma tarafından BENIGN olarak algılanmıştır, aynı şekilde BENIGN olan (ba) kısmında Ddos olarak algılanmıştır ve BENIGN olan (ca) kısmı, DoSHulk olarak algılanmıştır, ve bu kısımlarda bulunan değerler hata payı kabul edilip % 0.0751 oluşturmaktadır.

Tablo 7. Çalışma sonuçlarının benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Makale	PCA	En iyi algoritma	Doğruluk
Yulianto vd. [1]	Evet	Adaboost	81,83
Engelen vd. [2]	Hayır	Rasgele Orman	99,00
Priyanka ve Kumar [3]	Evet	Rasgele Orman	99,90
Rosay vd. [4]	Hayır	Rasgele Orman	99,90
Çalışmamız	Evet	J48	99,92

Sonuç olarak bu çalışmada keşfedilen en iyi performanslı makine öğrenme algoritması J48 saldırı tespit sistemlerinde üzerinde kullanılması uygun görülerek STS’ler tarafından trafik analizi ve gelen paketlerin saldırı olup olmadığını tespit ederek bulunduğu sistemi kötücül trafikten korumakla STS’lere önerilmektedir.

4 Sonuçlar

Saldırı tespit sistemleri (STS) çalışmalarında doğru bir model kullanılması çok önemlidir. Aksi halde, ağ trafiğinde dolaşan paketlerin kötü sınıflandırılması nedeniyle kaynaklanan sorunlarının olma olasılığı yüksektir. Saldırı tespit sistemleri için bir model tasarım süreci esnasında kullanılan veri seti oldukça önemlidir. Bu çalışmada kullanılan CICIDS2017 herkese açık ve araştırmacılar tarafından sık sık kullanılan bir veri setidir.

Bilinmekte olan ağ iletişim protokolleri (IPv4, IPv6, TCP, UDP, FTP, ARP, ICMP, DNS, SNMP, HTTP, SMTP ve POP), ağ güvenlik tehditleri (paket koklama ve aldatma), Hizmet Engelleme Saldırıları (SYN, ACK/FIN/PUSH, UDP, DNS, MAC ve HTTP taşmaları) ve buna ek olarak Ağ Keşfi yöntemleri (IP tarama, port tarama, işletim sistemi tarama) saldırganlar tarafından sık sık kullanılmaktadır.

Saldırganlara karşı önlem alabilmek için genellikle makine öğrenmesi tekniklerini kullanarak ağ trafik analizinde saldırı tespit sistemlerine yardımcı olabilmektedirler.

Bu çalışmada kullandığımız CICIDS2017 veri seti Brunswick’in (UNB) Kanada Siber Güvenlik Enstitüsü (CIC) tarafından oluşturulmuştur. Bu veri seti üzerinde veri temizleme işlemi yapılarak gürültülü verilerden kurtulup boyutsal indirgeme algoritması olan temel bileşenler analizi (PCA) uygulanarak yeni bir veri seti elde edilmiştir.

Bu işlemler yapıldıktan sonra elde edilen her iki veri seti üzerinde belirlemiş olduğumuz makine öğrenme yöntemleri (Naive Bayes, Destek vektör makinesi (DVM), K en yakın

komşu algoritması (KNN), J48 ve çok katmanlı algılayıcı (multilayer perceptron-MLP)) uygulanmıştır. Bütün bu yöntemler veri madenciliğinde kullanılan WEKA programı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 8. Makina öğrenme sınıflandırıcılarının başarı değerleri

Makine Öğrenme Algoritmaları	Çapraz Doğrulama kat= 10		Percentage Split % = 80	
	Normal	PCA	Normal	PCA
Naive Bayes	94.13	82.42	93.94	82.45
DVM	96.58	95.07	96.57	95.07
KNN	99.87	99.88	99.87	99.86
J48	99.92	99.76	99.92	99.69
MLP	98.50	98.23	98.74	98.94

Bu çalışma sonucunda makine öğrenimi teknolojisi kullanılarak ve daha önceden saldırı tespit sistemleri tarafından tespit edilen izinsiz girişler ve anormal trafiklerin bulunduğu bir veri setini analiz edip kullanılan modellerin başarı oranı değerlendirmesi gerekirse en yüksek performans gösteren algoritma J48 olduğu ve %99.92 bir doğruluk oranı kayıt etmiştir. Diğer algoritmaların doğruluk oranları Tablo 8’de verilmiştir. Sonuç olarak en iyi performansı gösteren özellik seçimi kullanıldığında, kötü amaçlı yazılım algılama sonuçlarının daha iyi hale getirilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] A. Yulianto, P. Sukarno, N.A. Suwastika, Improving adaboost-based intrusion detection system (IDS) performance on CICIDS 2017 dataset, Journal of Physics: Conference Series, 1192(1), 012018, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1192/1/012018>.
- [2] G. Engelen, V. Rimmer, W. Joosen, Troubleshooting an intrusion detection dataset: the CICIDS2017 case study. IEEE Security and Privacy Workshops (SPW), pp. 7-12, 2021. <https://doi.org/10.1109/SPW53761.2021.00009>.
- [3] V. Priyanka and T. G. Kumar, Performance assessment of IDS based on CICIDS-2017 dataset. Information and Communication Technology for Competitive Strategies (ICTCS 2020), pp. 611-621, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0739-4_58.
- [4] A. Rosay, E. Cheval, F. Carlier and P. Leroux, Network intrusion detection: a comprehensive analysis of CICIDS2017. 8th International Conference on Information Systems Security and Privacy, pp. 25-36, 2022. <https://doi.org/10.5220/0010774000003120>.
- [5] R.R. Boukaert, E. Frank, M. Hall, R. Kirby, P. Reutemann, A. Seewald, D. Scuse, Weka manual for version 3-7-3, The University of Waikato, 327, 2010.
- [6] S. Singhal and M. Jena, A study on WEKA tool for data preprocessing, Classification and Clustering.

- International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2(6), 250-253, 2013.
- [7] C. Gürmen, Saldırı tespit sistemleri için makine öğrenme yöntemlerinin performans karşılaştırması. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Türkiye, 2020.
- [8] C. Kruegel and G. Vigna, Anomaly detection of web-based attacks. Proceedings of the 10th ACM Conference on Computer and Communications Security, 251-261, Washington D.C., USA, 2003. <https://doi.org/10.1145/948109.948144>.
- [9] A.A. Abdulrahman and M.K. Ibrahim, Toward constructing a balanced intrusion detection dataset based on CICIDS2017, Samarra Journal of Pure and Applied Science, 2(3), 132-142, 2020.
- [10] A.N. Bhagoji, D. Culina, C. Sitawarin, P. Mittal, Enhancing robustness of machine learning systems via data transformations. 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), pp. 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/CISS.2018.8362326>.
- [11] K.K. Vasan and B. Surendiran, Dimensionality reduction using principal component analysis for network intrusion detection, Perspectives in Science, 8, 510-512, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.05.010>.
- [12] M.I. Jordan and T.M. Mitchell, Machine learning: trends, perspective, and prospects, Science, 349(6245), 255-260 2015. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>.
- [13] M.A. Alsheikh, S. Lin, D. Niyato, H.P. Tan, Machine learning in wireless sensor networks: algorithms, strategies, and applications, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16(4), 1996-2018, 2014. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2320099>.
- [14] I. Butun, S. D. Morgera, R. Sankar, A survey of intrusion detection systems in wireless sensor networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16(1), 266-282, 2013. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.050113.00191>
- [15] K. Rai, M.S. Devi, A. Guleria, Decision tree-based algorithm for intrusion detection, International Journal of Advanced Networking and Applications, 7(4), 2828-2834, 2016.
- [16] A. L. Buczak, E. Guven, A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection. IEEE Communications surveys & tutorials, 18(2), 1153-1176, 2015. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502>.
- [17] S.M. Tahsien, H. Karimipour, P. Spachos, Machine learning based solutions for security of internet of things (Iot): a survey. Journal of Network and Computer Applications, 161, 102630, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102630>.
- [18] Y. Xin, L. Kong, Z. Liu, Y. Chen, Y. Li, H. Zhu, M. Gao, H. Hou, C. Wang, Machine learning and deep learning methods for cybersecurity. IEEE Access, 6, 35365-35381, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2836950>.
- [19] F. Chen, P. Deng, J. Wan, Dd Zhang, A.V. Vasilakos, X. Rong, Data mining for the internet of things: literature review and challenges. International Journal of Distributed Sensor Networks, 431047, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/431047>.
- [20] Z. Deng, X. Zhu, D. Cheng, M. Zong, S. Zhang, Efficient knn classification algorithm for big data. Neurocomputing, 195, 143-148, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.112>
- [21] A. Aldallal, F. Alisa, Effective intrusion detection dystem to secure data in cloud using machine learning. Symmetry, 13(12), 1-26, 2021. <https://doi.org/10.3390/sym13122306>.
- [22] M. Al-Qatf, Y. Lasheng, M. Al-Habib, K. Al-Sabahi, Deep learning approach combining sparse autoencoder with SVM for network intrusion detection. IEEE Access. 6, 52843-52856, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2869577>.
- [23] M. Alkasassbeh, M. Almseidin, Machine learning methods for network intrusion detection. arXiv preprint, arXiv:1809.02610, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.02610>.





Parallel solution of Lambert's problem using modified Chebyshev-Picard iteration method

Lambert probleminin modifiye Chebyshev-Picard yineleme yöntemini kullanarak paralel çözümü

Majd Ajroudi¹, F. Şükrü Torun^{2,*}

^{1,2} Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Computer Engineering, 06020, Ankara, Turkey,

Abstract

Lambert's problem is one of the classical methods for solving the multiple revolution problem in orbit determination. With the increasing interest in space exploration programs and using satellite networks, it is important to provide an accurate and rapid method that will provide the network control center with information regarding the orbit of each satellite in the network and help the satellites improve routing decisions in onboard processing satellites. Lambert's problem is one of the methods that solve the problem iteratively and this iteration was originally done using Newton's iteration method. In recent studies, it is recommended to use the Chebyshev-Picard iteration method to solve this problem. Since the aim here is to provide a method that solves the problem rapidly, the Chebyshev-Picard iteration method serves our objective since it is highly parallelizable. In this work, we have developed a parallel algorithm that solves Lambert's problem in a parallel environment. We have conducted experiments to demonstrate the parallel scalability of the algorithm on both shared and distributed memory architectures. The experimental results show that the parallel algorithm achieves 8.26- and 3.94-times faster execution time on distributed memory and shared memory architectures, respectively.

Keywords: High performance computing, Lambert's problem, Modified Chebyshev-Picard iteration, Orbit determination, Parallel computing.

1 Introduction

Today, astronomy, astronautics, artificial satellites, satellite navigation systems [1], and orbital calculations are fields of increasing importance. When sending a satellite into orbit, it is essential to have a method that can predict the state vector of the satellite at any given time. Once a state vector of the satellite is determined, the six classical orbital elements that define an orbit can be calculated [2]. This procedure is called orbit determination. Lambert's problem is one of the classical methods of determining a preliminary orbit of celestial objects from two position vectors and the time of flight between the two points, which makes it a Boundary Value Problem (BVP) [3] and requires solving the differential as shown in Equation (1). The basic idea of Lambert's problem is to calculate the trajectory that connects

Öz

Lambert problemi, yörünge belirlemede çoklu devir problemini çözmek için kullanılan klasik yöntemlerden biridir. Uzay araştırma programlarına ve uydu ağlarının kullanımına olan ilginin artmasıyla, ağ kontrol merkezine ağdaki her bir uydunun yörüngesine ilişkin bilgileri sağlayacak ve uyduların yönlendirme kararlarını iyileştirmesine yardımcı olacak doğru ve hızlı bir yöntemin sağlanması önemlidir. Lambert problemi, bu problemi yinelemeli olarak çözen yöntemlerden biridir ve bu yineleme önceki yıllarda Newton'un yineleme yöntemi kullanılarak yapılmaktaydı. Daha güncel araştırmalarda bu problemi çözmek için Chebyshev-Picard yineleme yöntemi kullanılması önerilmektedir. Önerilen metot çözüm süresinde iyileştirmeler sunmasına rağmen büyük problemlerde çözüm çok uzun süreler alabilmektedir. Bu çalışmada, Lambert problemini paralel programlama teknikleri kullanarak daha hızlı çözen yeni bir paralel algoritma önerilmiştir. Ayrıca algoritmanın paralel ölçeklenebilirliğini göstermek için 2 farklı paralel sistemde; paylaşımlı ve dağıtık bellek mimarilerinde deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, paralel algoritmanın dağıtık bellek ve paylaşımlı bellek mimarilerinde sırasıyla 8.26 ve 3.94 kat daha hızlı çözüm süresine ulaştığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yüksek performanslı hesaplama, Lambert problemi, Modifiye Chebyshev-Picard yinelemesi, Yörünge belirleme, Paralel hesaplama.

two points where the initial and final time is given, as shown in Figure 1.

$$\ddot{r} = -\mu \cdot \frac{\hat{r}}{r^2} \quad (1)$$

Some recent studies [3, 4] have shown a significant improvement in the performance of the Chebyshev-Picard iterative method after developing an approach to run the method in a parallel environment. Chebyshev-Picard iterative method [3] is a method that uses Chebyshev polynomials to approximate the state trajectory in a Picard iteration, where the boundary conditions are preserved by constraining the Chebyshev polynomials coefficients. This new approach is called Modified Chebyshev-Picard Iteration (MCPI). Solving Lambert's Problem using MCPI is

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fstorun@aybu.edu.tr (F. S. Torun)

Geliş / Received: 07.02.2022 Kabul / Accepted: 03.10.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1069509

proposed in [5], where a solution for multiple revolutions perturbed Lambert's problem was proposed, as will be explained in the next section.

The original MCPI is a combination of the works of Emile Picard (Picard iteration) [6] and Rafnuty Chebyshev (Chebyshev polynomials) [7]. Since Chebyshev function approximation is orthogonal, Clenshaw and Norton found it beneficial to combine it with Picard iteration in a simultaneous manner to provide a solution to non-linear ordinary differential equations [8].

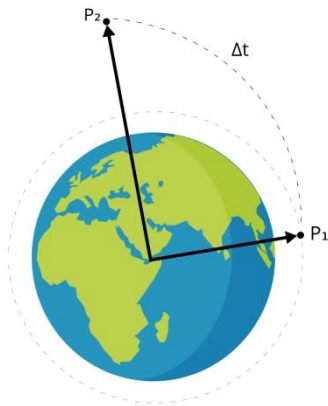


Figure 1. Trajectory calculation using Lambert's problem.

The MCPI algorithm is quite prone to parallel processing, and several early studies proposed different approaches [3, 9, 10, 11] to the method. Additionally, [3] demonstrates the efficiency of MCPI in non-linear IVP and BVP when compared to other solvers, as will be discussed in the next section.

The time taken to calculate a highly-accurate position of a single satellite using this algorithm is often acceptable depending on the case. However, when working with a satellite constellation such as Starlink [12], which forms a network of more than 3000 thousand satellites constantly communicating with each other, such calculations can be quite exhaustive. Parallel computing techniques should be considered to accomplish these tasks in a reasonable time.

This work aims to use the approach of MCPI to solve the second-order differential equation of Lambert's problem, shown in Equation (1), in a parallel environment provided by the Message Passing Interface (MPI) [13]. Similar applications of MCPI exist in the literature [3, 4, 5]; however, these studies lack the discussion of the problem from the computer science perspective, thus the work presented in this paper emphasizes this by discussing the detailed parallelization of the problem along with comparing the performance in two different computer architectures.

In the rest of this paper, we begin with discussing related works. Next, the proposed algorithm and the implementation details are presented. Finally, we discuss the results and conclude the work.

2 Related works

Solving Initial Value Problems (IVP) and Boundary Value Problems (BVP) using a combination of Picard iteration and Chebyshev polynomials is first proposed in [8], where a method to approximate the trajectory and the integrand by the same set of discrete Chebyshev polynomials is proposed. The Chebyshev polynomials in approximating the integrand of Picard iteration along the i^{th} trajectory gives an efficient and accurate approximation [8].

The parallelization of the Chebyshev-Picard iteration is mentioned in many studies [10, 14, 15, 17]. One of the recent works is Bai's Ph.D. dissertation [4] which proves the great capability of the method by extending the earlier works to show an outperforming ODEs' numerical integration in the sequential computing environment. The improvement of the Chebyshev-Picard iterations method encouraged its application to classical methods and problems to improve their performance, such as Lambert's Problem as we will see later in the rest of this section.

Junkin and Bai extend their previous work on developing parallel structured MCPI in [5]. The authors of the paper have compared the results of solving single orbit propagation between Runge-Kutta12(10) versus MCPI for a different number of nodes and various spherical harmonic orders. It is explicitly mentioned that, although the results of the experiments show a positive impact of MCPI, the experiments were limited and should be generalized for other cases.

The method of particular solutions and MCPI are combined in [5] to solve the multiple revolutions perturbed Lambert's problem for orbit transfer of a satellite. According to [5], solving the two-point boundary problems with the method of particular solutions can be done using any numerical integrator, however, MCPI increased the efficiency that cannot be provided with step-by-step integrators.

An implementation of MCPI in a parallel environment to solve a perturbed orbital trajectory is presented in [16]. The framework of this research is divided into three modules: a control module, a set of worker modules, and a renderer module. The control module ensures the coordination using the database and sends jobs to MCPI working processes, which propagate an orbit trajectory and report the propagated data to the renderer module and the control module for catalog update. The main module and MCPI workers can run on any multi-core CPU machine.

Recent studies used MCPI in a parallel environment to improve Space Situational Awareness by applying it to the process of Conjunction Assessment [17-18]. The work provided in [17] compared the MCPI method with the single satellite method using SGP4 and has shown that MCPI-aided conjunction analysis provided approximately a 50% increase in the speed. These findings can potentially protect space assets by providing timely warnings of potential collisions.

3 Proposed algorithm and implementation details

3.1.1 Introduction to MCPI

The first form of the method introduced by Emile Picard for path approximation is presented as

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t)),$$

with the initial condition $x(t_0)$. Then the form can be rearranged to:

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t f(\tau, x(\tau)) d\tau. \quad (2)$$

It has been stated that the convergence of Picard iteration was bounded to a time interval $t - t_0$ less than δ , this time interval for computing the satellite trajectories in Earth orbit can approach 20,000 seconds, which is more than three periods of a typical low Earth orbit satellite [4].

Chebyshev polynomials can be obtained by the following recurrence relation:

$$\begin{aligned} T_0(x) &= 1 \\ T_1(x) &= x \\ T_n(x) &= 2xT_{n-1} - T_{n-2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Note that the first Chebyshev polynomials T are defined by the first two relations and the rest of the polynomials can be calculated using the recurrence relation.

In the MCPI algorithm, Chebyshev polynomials are used to approximate unknown trajectory and the integrand of Picard iteration. The discrete nodes τ used for the approximation of the state are the Chebyshev-Gauss-Lobatto nodes and are given by

$$\tau_n = -\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} T_0(\tau_0) & T_1(\tau_0) & \dots & T_N(\tau_0) \\ T_0(\tau_1) & T_1(\tau_1) & T_1(\tau_1) & T_N(\tau_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_0(\tau_N) & T_1(\tau_N) & \dots & T_N(\tau_N) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

where N is the total number of nodes throughout the trajectory. Notice that each row in the previous matrix is separate from the other rows, thus the calculation of this matrix can be done in parallel, where a row-wise partitioning method is performed, and each process takes an equal number of rows. The second and the third functions that are computed in parallel are the coefficient vector and the

$$g(\tau, x^{i-1}(\tau)) \sim \frac{1}{2} F_0^{i-1} T_0(\tau) + \sum_{k=1}^{k=N} F_k^{i-1} T_k(\tau), \quad (6)$$

where

$$\sum_{k=1}^{k=N} F_k^{i-1} T_k(\tau) = F_1^{i-1} T_1(\tau) + \dots + F_N^{i-1} T_N(\tau). \quad (7)$$

integrand approximation, as shown in Equations (6) and (8).

$$\begin{aligned} F_k^{i-1} &= \frac{1}{2} g(\tau_0, x^{i-1}(\tau)) T_k(\tau_0) \\ &+ \sum_{j=0}^{j=N-1} g(\tau_j, x^{i-1}(\tau)) T_k(\tau_j) \\ &+ \frac{1}{2} g(\tau_N, x^{i-1}(\tau)) T_k(\tau_N), \end{aligned} \quad (8)$$

where

$$\begin{aligned} &\sum_{j=0}^{j=N-1} g(\tau_j, x^{i-1}(\tau)) T_k(\tau_j) \\ &= g(\tau_1, x^{i-1}(\tau)) T_k(\tau_1) \\ &+ g(\tau_{N-1}, x^{i-1}(\tau)) T_k(\tau_{N-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

The function that calculates the coefficient vector F takes two inputs, vector G , and Chebyshev polynomials matrix T , each row for these two inputs independently results in one entry of F . Thus, row-wise partitioning is done to those two inputs and then distributed to the processes where each worker process performs its tasks before the master process collects the results and returns them as one vector. We note that the overall time of the execution is mostly dominated by the function which is responsible for the calculation of F . Then the trajectory vector for i^{th} iteration is calculated using

$$\begin{aligned} x^i(\tau) &= x_0 + \sum_{j=0}^{N-1} F_j^{i-1} \int_{-1}^{\tau} T(s) ds, \\ &= \frac{\gamma_0^i}{2} T_0(\tau) + \sum_{k=1}^N \gamma_k^i T_k(\tau), \end{aligned} \quad (10)$$

where x_0 is shown in Equations (11). The first and last entries of the trajectory vector represent the boundary conditions stated for the problem. These two entries are found by applying the value of τ in the boundary conditions, namely $\tau = -1$ and $\tau = 1$.

$$x_0 = x(-1) = \frac{\gamma_0^i}{2} T_0(-1) + \sum_{k=1}^N \gamma_k^i T_k(-1) \quad (11)$$

$$x_f = x(1) = \frac{\gamma_0^i}{2} T_0(1) + \sum_{k=1}^N \gamma_k^i T_k(1) \quad (12)$$

In Equations (11) and (12), γ is a coefficient vector that is updated in each iteration. This coefficient can be calculated using the following formulae, which are derived in [3]:

$$\gamma_N^i = \frac{F_{N-1}^{i-1}}{2N} \quad (13)$$

$$\gamma_k^i = \frac{1}{2k} (F_{k-1}^{i-1} - F_{k+1}^{i-1}), \text{ for } k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (14)$$

$$\gamma_0^i = x_f + x_0 - 2(\gamma_2 + \gamma_4 + \gamma_6 + \dots) \quad (15)$$

$$\gamma_1^i = \frac{x_f - x_0}{2} - (\gamma_3 + \gamma_5 + \gamma_7 + \dots). \quad (16)$$

3.1.2 MCPI for second-order ODE

The challenging part of Lambert’s problem is that the differential equation is a second-order ODE, and thus, the position vector x along with the velocity vector v will be updated in each iteration.

The second-order ODE has the form of Equation (17) and can be solved using a cascaded MCPI formulation. In this formulation, the velocity calculation is done following the approach mentioned in the previous subsection, and the position is integrated directly from the approximated velocity.

In the case of the first-order ODE, x is updated using the formula

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f(t, x, \dot{x}). \quad (17)$$

To perform the second integration, we use the fact that the velocity is the time derivative of the position to obtain the second differential equation. Thus, our main differential equations become:

$$\frac{dv}{d\tau} = g(\tau, x, v) \quad (18)$$

and,

$$\frac{dx}{d\tau} = v. \quad (19)$$

Then using the fundamentals of Picard iteration, these two equations can be transformed to the following:

$$v^i(\tau) = v_0 + \int_{-1}^{\tau} g(s, x^{i-1}(s), v^{i-1}(s)) ds, \quad (20)$$

for $i = 1, 2, \dots,$

$$x^i(\tau) = x_0 + \int_{-1}^{\tau} v(s) ds \frac{dx}{d\tau}. \quad (21)$$

3.1.3 Matrix-Vector form

Since our calculations are done for each node along the trajectory, we can organize our results regarding each function in a matrix form. This matrix-vector form provides the possibility of solving the problem in parallel by dividing the tasks on multiple processors.

The solution update formulas for the velocity and position are shown below:

$$V^i = C_x C_\alpha g_{prev} + C_x \Theta_{v0}, \quad (22)$$

$$X^i = \frac{t_f - t_0}{2} C_x C_\alpha (V^i) + C_x \Theta_{x0}, \quad (23)$$

where V^i and X^i are the i^{th} solutions for the velocity and position, respectively. C_x and C_α are constant matrices that are determined by the number of nodes n only, g_{prev} is the approximation of the integrand and Θ_0 is a vector of the boundary conditions for V and X . The flowchart for the second-order matrix-vector approach is shown in Figure 2.

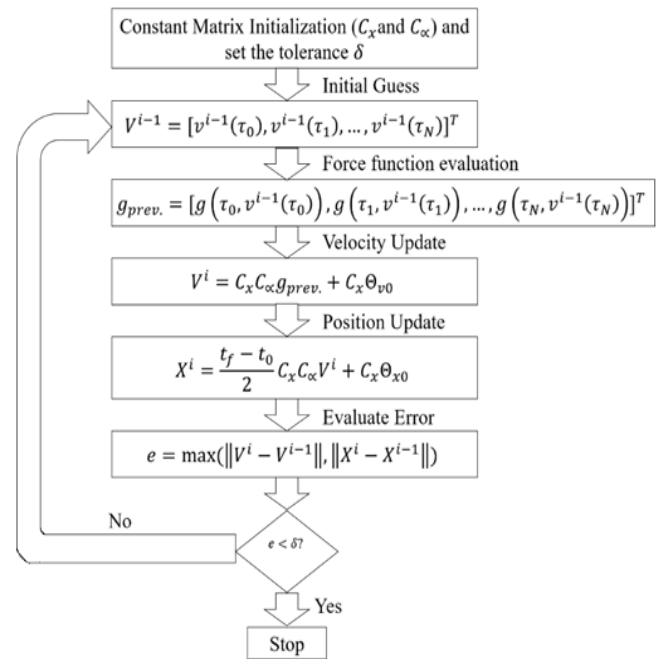


Figure 2. Matrix-vector approach of MCPI algorithm for second-order differential equations

3.1.4 Proposed solution

As mentioned in the previous sections, the MCPI algorithm is implemented through several functions, some of which are iterated several times. In this section, we discuss those that were written in parallel and the data that was transferred between processors. This exchange of data was done using Message Passing Interface (MPI) [13] library. Parallel algorithms that are implemented with the MPI library can work on both shared memory and distributed memory architectures efficiently. Applying MPI to the algorithm allows the implementation of data parallelism by distributing the matrices’ rows or columns among several processors and similar instructions are executed over the distributed data.

Chebyshev polynomials matrix: This function depends on the range of nodes distributed over the interval $[-1, 1]$, which are stored in the array τ . Chebyshev polynomials of order M are generated for each node as mentioned in Equation (3). Since the polynomials for each node are independent of the other rows, we can divide the values of

the array τ among several processors, of which each processor would be responsible for generating Chebyshev polynomials for the nodes that were sent to it. The data distribution of this function is described in Figure 3.

Force function: The parallelization of this function is the most fundamental process in the proposed solution since it defines the ODE that is being solved. In our case, we are working with a 3D problem, meaning that this function is called three times in each iteration. Each entry of the resulting column-vector is the result of the sum of multiplications of the coefficient's vector with its corresponding Chebyshev polynomials entry. Thus, the function is parallelized by sending the vector of the coefficient to each process and the rows of the Chebyshev polynomials matrix to the process responsible for them.

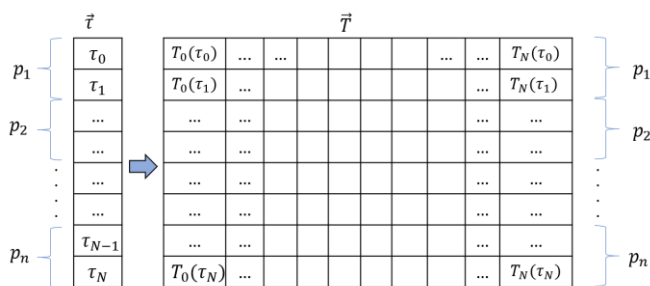


Figure 3. Description of the parallel Chebyshev polynomials function

Chebyshev coefficients: The result of this function is a column vector containing coefficients for each order of the Chebyshev polynomials. The computation of the result of this function is similar to the force function; thus, the parallelization is implemented similarly.

The matrix partitioning, data distribution, and parallelization of the Chebyshev coefficient's function and the force function are described in Figure 4. Here, each processor p_i is responsible for computations of subsequent rows of the matrix and consecutive entries of the vector according to the owner-compute rule.

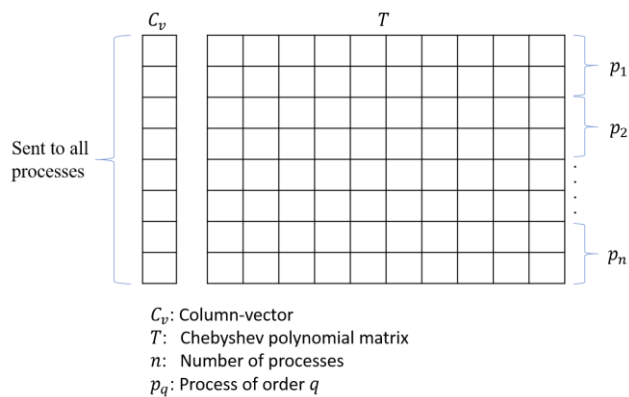


Figure 4. Data distribution of the parallel force function and coefficient function

3.1.5 Implementation details

The parallel algorithm is implemented with the Python programming language. We have used the MPI library to distribute, synchronize, and gather data between distributed processes in our parallel algorithm. We have exploited the MPI4Py package which provides bindings of the MPI routines for Python, allowing it to exploit multiple distributed processors. In the experiments, Python version 3.0 and OpenMPI version 4.0.0 MPI implementations were used.

4 Experimental results

The results that are presented in this section are discussed and analyzed in terms of two main concepts: speed-up and efficiency. Speed-up is the factor of reduction in the execution time of the parallel implementation against the sequential implementation. According to the values of speed-up, it can be categorized into three types; linear: if the value of speed-up is equal to the number of processors, sub-linear: if the value of the speed-up is less than the number of processors, and super-linear: if the value of speed-up is larger than the number of processors. Speed-up values can be obtained using the following equation:

$$Speed-up = \frac{Time\ of\ the\ sequential\ algorithm}{Time\ of\ the\ parallel\ algorithm} \quad (24)$$

The parallel efficiency measures the effectiveness of the algorithm in a parallel environment. In other words, the efficiency can be used to measure the computing power deficiency in parallel execution. This ratio is obtained by the following formula:

$$Efficiency = \frac{Speed-up}{Number\ of\ processors} \quad (25)$$

The experiments were conducted on two different architectures. The first experiment was conducted on a shared memory architecture with Intel i7-5930K 6-core CPU and 32GB memory and for the second we used a distributed memory HPC cluster named Barbun HPC Supercomputer in TUBITAK ULAKBIM High Performance and Grid Computing Center (TRUBA), where each computation node has the following configuration: 2 sockets, 20 cores per socket, Intel Xeon Gold 6148 CPU and 384 GBs of main memory. In both experiments, the number of trajectory nodes was set to $N = 5000$ and the tolerance value to 0.0001. In operational cases, the number of trajectory nodes decided depends on the accuracy of the trajectory intended to be found.

Tables 1 and 2 show the execution time alongside the speed-up and the efficiency for the experiment on the shared memory machine and the HPC cluster, respectively. As can be seen in the tables, the speed-up values increase when the number of cores used in the parallel run increases. The proposed parallel algorithm gets sub-linear speed-up values for all test cases since the obtained speed-up values are less

than the number of processors used, and the efficiency is always less than one.

The proposed algorithm achieves the highest speed-up on the shared memory machine with 3.94 when it uses 6 cores, and the efficiency is 0.66 for this test. The proposed algorithm achieves the highest speed-up on the HPC cluster with 8.26 speed-up on 80 processors with an efficiency of 0.10. According to Amdahl’s law [19], this experimental finding is expected since the sequential portion of the algorithm cannot be parallelized, and the portion of the sequential part increases proportionally for large number of processes. Furthermore, for large number of processors, the communication overhead increases as well. These two factors limit the speed-up for the larger number of cores, and it causes lower efficiency values in the parallel system.

Table 1. Speed-up and efficiency results for the shared memory system

#Cores	Execution Time (s)	Speed-up	Efficiency
1	147.50	1.00	1.00
2	82.52	1.79	0.89
3	59.37	2.48	0.83
4	52.06	2.83	0.71
5	42.05	3.51	0.70
6	37.48	3.94	0.66

Table 2. Speed-up and efficiency results for the HPC cluster

#Cores	Execution Time (s)	Speed-up	Efficiency
1	163.66	1.00	1.00
4	57.20	2.86	0.72
8	42.90	3.82	0.48
16	30.75	5.32	0.33
32	26.49	6.18	0.19
48	20.93	7.82	0.16
64	20.12	8.13	0.13
80	19.82	8.26	0.10

Figures 5 and 7 depict the obtained speed-up values for each number of cores respectively for the shared memory and HPC platforms. Additionally, Figures 6 and 8 show the respective efficiency values for each number of cores. As seen in the figures, when the number of processors increases the speed-up increases for both cases. However, the speed-up starts to stabilize in the HPC cluster with an increasing number of processors. In addition to these experiments, we have conducted extra experiments with larger problems where the number of trajectory nodes was set to $N = 10.000$ and $N = 20.000$ in the HPC cluster by using 80 cores. Since we increased the granularity of the problem in these tests, we got higher efficiency values of 0.11 and 0.15 respectively for $N = 10000$ and $N = 20000$ as expected.

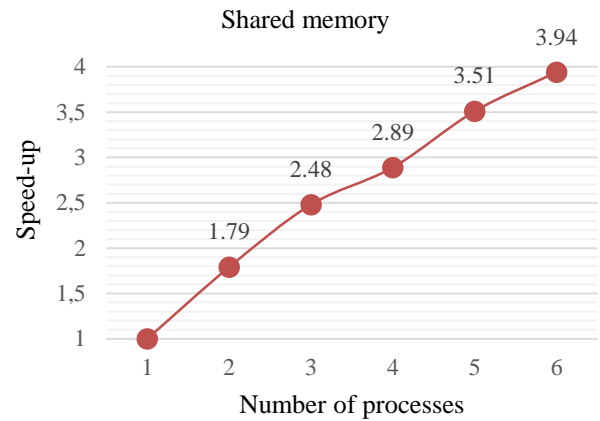


Figure 5. Speed-up versus the number of processes for shared memory machine

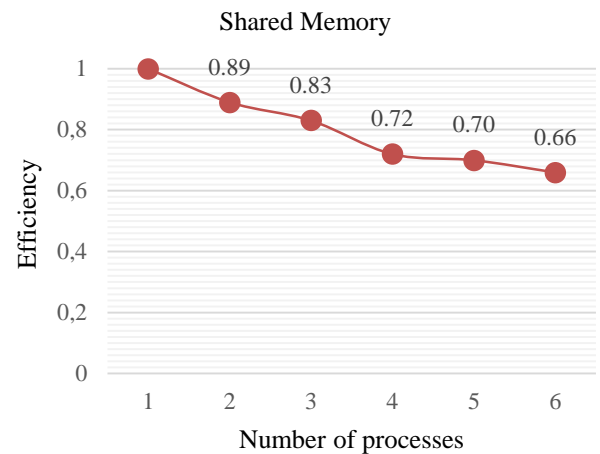


Figure 6. Efficiency versus the number of processes for shared-memory machine

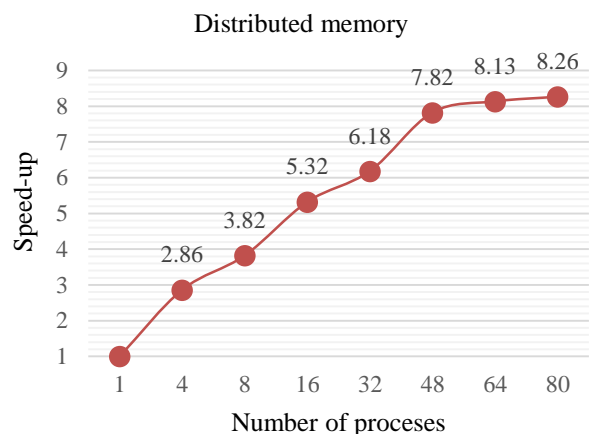


Figure 7. Speed-up versus the number of processes for HPC cluster

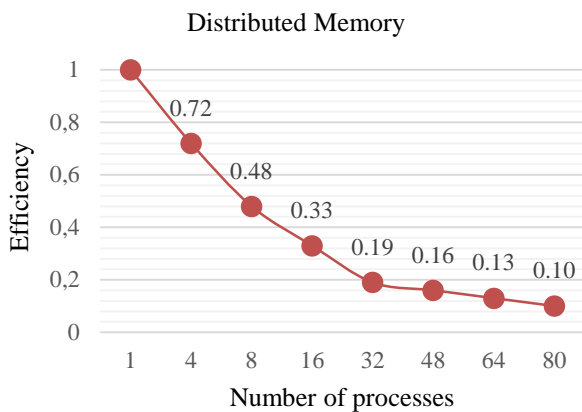


Figure 6. Efficiency versus Number of processes for HPC cluster

5 Discussion

The experimental results obtained in this work show a considerable improvement in the execution time of the MCPI algorithm on two different parallel architectures. These findings also confirm the results obtained in previous studies [4,5]. Additionally, in [5], the performance of MCPI is compared with the Runge-Kutta12 (10) algorithm and it is reported that MCPI is 11 times faster than the other algorithm. GPU-based parallelism is also proposed in [3] for the MCPI algorithm. In [3], for performance analysis, the execution time of a sequential MATLAB program is compared with a CUDA-based parallel program written in C/C++ programming language. When N is set to 511, it is reported that the CUDA-based algorithm is 34 times faster than the corresponding MATLAB program by using Nvidia 9400 GT (includes 16 CUDA cores) GPU card. Although it seems a high speed-up of 34 is achieved, we note that MATLAB programs are known to be much slower than similar C programs. For instance, one recent study [20] reports that their MATLAB program is approximately 30 times slower than the corresponding C++ program.

6 Conclusions

This study presents the parallelization of the solution of Lambert's problem using the Modified Chebyshev-Picard Iteration (MCPI) algorithm. It provides a parallel algorithm and its implementation details for astrodynamics methods by applying the parallel version of the MCPI solver to the famous Lambert's problem. Since the problem is three-dimensional, the biggest challenge is reorganizing the data in each iteration to avoid the corruption of data in the communication step between the parallel processes. We have conducted experimental results and presented the performance of the algorithm on two different parallel architectures. The experimental results on an HPC cluster show that the proposed parallel algorithm achieves 8.26 times faster execution time compared to the sequential algorithm. The proposed algorithm also achieves 3.83 times faster execution time compared to the sequential algorithm on a 6-core shared memory system. As future work, we

intend to improve the parallel solution time further by parallelizing the integrand approximation function.

Acknowledgment

The numerical calculations reported in this paper were fully/partially performed at TUBITAK ULAKBIM, High Performance and Grid Computing Center (TRUBA resources).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 11%

References

- [1] C. İnal, B. Bilgen, S. Bülbül and M. Başbük, Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(1), 109-115, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.996018>
- [2] H. D. Curtis, Orbital mechanics for engineering students, Elsevier, Florida, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097747-8.00003-7>
- [3] X. Bai, Modified Chebyshev-Picard iteration method for solution of boundary value problems. Ph.D dissertation, Texas A&M University, Texas, 2010.
- [4] J. L. Junkins, A. B. Younes, R. M. Woollands, and X. Bai, Picard iteration, Chebyshev polynomials and Chebyshev-Picard methods: Application in astrodynamics. The Journal of Astronautical Sciences, vol. 60, no. 3-4, pp. 623-653, 2013. <https://doi.org/10.1007/s40295-015-0061-1>
- [5] R. M. Woollands, J. L. Read, A. B. Probe, and J. L. Junkins, Multiple revolution solutions for the perturbed lambert problem using the method of particular solutions and Picard iteration. The Journal of Astronautical Sciences, vol. 64, no. 4, pp. 361-378, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40295-017-0116-6>
- [6] P. B. Bailey, Nonlinear two point boundary value problems, 1st ed., vol. 44, NX Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., pp. 21-49, 1968. <https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1969-12263-9>
- [7] J. C. Mason and D. Handscomb, Chebyshev polynomials. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2003. <https://doi.org/10.1201/9781420036114>
- [8] C. W. Clenshaw and H. J. Norton, The solution of nonlinear ordinary differential equations in Chebyshev series. The Computer Journal, vol. 6, no. 1, pp. 88-92, 1963. <https://doi.org/10.1093/comjnl/6.1.88>
- [9] T. Feagin and P. Nacozy, Matrix formulation of the Picard method for parallel computation. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, vol. 29, no. 2, pp. 107-115, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF01232802>
- [10] J. Shaver, Formulation and evaluation of parallel algorithms for the orbit determination problem. Ph.D dissertation, United States Airforce, 1980.
- [11] T. Fukushima, Vector integration of dynamical motions by the Picard-Chebyshev method. The Astronomical

- Journal, vol. 113, p. 2325, 1997. <https://doi.org/10.1086/118443>
- [12] J. C. McDowell, The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation. *The Astrophysical Journal Letters* 892.2 (2020): L36. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>
- [13] W. Gropp, E. Lusk, N. Doss and A. Skjellum. A high-performance, portable implementation of the MPI message passing interface standard. *Parallel Computing*, vol. 22, no. 6, pp. 789–828, 1996. [https://doi.org/10.1016/0167-8191\(96\)00024-5](https://doi.org/10.1016/0167-8191(96)00024-5)
- [14] T. Fukushima, Picard iteration method, Chebyshev polynomial approximation, and global numerical integration of dynamical motions. *The Astronomical Journal*, vol. 113, pp. 1909–1914, 1997. <https://doi.org/10.1086/118404>
- [15] G. Miel, Numerical solution on parallel processors of two-point boundary-value problems of astrodynamics. *Numerical Solution of Integral Equations*. Springer, Boston, MA, 1990. pp. 131-182. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2593-0_4
- [16] B. Macomber, A. Probe, R. Woollands, and J. L. Junkins, Parallel Modified-Chebyshev Picard iteration for orbit catalog propagation and Monte Carlo analysis. 38th Annual AAS/AIAA Guidance and Control Conference, Breckenridge, USA, Jan 2015.
- [17] A. Probe, B. Macomber, J. Read, R. Woollands, A. Masher, and J. Junkins, Efficient conjunction assessment using modified Chebyshev picard iteration. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, Hawaii, 2015.
- [18] C. T. Shelton, Adaptive and orbital element methods for conjunction analysis. Ph.D dissertation, Texas A&M University, Texas, 2020.
- [19] G. M. Amdahl, Computer architecture and Amdahl's law. *Computer* 46.12, 2013. <https://doi.org/10.1109/MC.2013.418>
- [20] Q. Do, S. Acuña, J. I. Kristiansen, K. Agarwal and P. H. Ha, Highly efficient and scalable framework for high-speed super-resolution microscopy. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 97053-97067, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094840>





Temporal variation of air pollution variables in different regions of Turkey during the Covid-19 restrictions

Covid-19 pandemisi kısıtlamaları sırasında Türkiye'deki farklı bölgelerdeki hava kirliliği değişkenlerinin zamansal değişimi

Zinnur Yılmaz^{1,*} , Mustafa Bünyamin Karagözoğlu² 

^{1,2} Sivas Cumhuriyet University, Environmental Engineering Department, 58140, Sivas, Turkey

Abstract

The main source of air pollution is harmful gases and particulate matter released into the atmosphere as a result of burning fossil fuels. The emergence of the new coronavirus has caused a pandemic respiratory disease (COVID-19) in which vaccines and targeted therapeutics for treatment are unavailable. For this reason, the concentration levels of PM10 and SO₂ measured with the help of data from 78 measurement stations in Turkey, primarily in Ankara, Istanbul and Izmir, were evaluated within the scope of the "National Air Quality Monitoring Network". According to the average values calculated depending on some measures taken during the quarantine period, there has been a significant decrease in air pollutant concentrations such as PM10 and SO₂, albeit in a short time. Depending on the population density of the 78 provinces represented, the ratio of the population in the regions positively affected by the decrease in PM10 and SO₂ parameters to the population of Turkey is 87.6% and 70.2%, respectively. The rates for the regions negatively affected by the concentration increase were calculated as 11.8% and 29.8% for both pollutants.

Keywords: Air pollution, COVID-19, PM10, SO₂, Turkey

1 Introduction

The Novel Coronavirus Disease (COVID-19) was first reported in Wuhan City of the People's Republic of China in December 2019, with a virus identified on January 13, 2020, as a result of research conducted in a group of patients, who presented with respiratory symptoms. The recent coronavirus disease called COVID-19 has raised global concerns and led to thorough restrictions in many countries [1-4]. The disease is induced by severe acute respiratory syndrome arising from coronavirus 2 (SARS-CoV-2) [5]. The disease was first detected in people who visited seafood and animal markets located in the specified region. It soon spread from person to person, reaching Wuhan and other cities in China, as well as the other countries of the world [6]. The deadly and novel coronavirus spreads rapidly among people in close contact with those infected [3,7]. It's possible to contain the spread of the virus by maintaining appropriate social distance, practicing proper personal hygiene, avoiding

Öz

Hava kirliliğinin ana kaynağı, fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere salınan zararlı gazlar ve partikül maddelerdir. Yeni koronavirüsün ortaya çıkması, tedavi için aşıların ve hedefli terapötiklerin bulunmadığı pandemik bir solunum hastalığına (COVID-19) neden olmuştur. Bu nedenle Türkiye'de Ankara, İstanbul ve İzmir başta olmak üzere 78 ölçüm istasyonundan alınan veriler yardımıyla ölçülen PM10 ve SO₂ konsantrasyon seviyeleri "Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı" kapsamında değerlendirilmiştir. Karantina döneminde alınan bazı önlemlere bağlı olarak hesaplanan ortalama değerlere göre PM10 ve SO₂ gibi hava kirliletiçi konsantrasyonlarında kısa sürede de olsa önemli bir azalma olmuştur. Temsil edilen 78 ilin nüfus yoğunluğuna bağlı olarak PM10 ve SO₂ parametrelerindeki düşüşten olumlu etkilenen bölgelerdeki nüfusun Türkiye nüfusuna oranı sırasıyla %87.6 ve %70.2'dir. Konsantrasyon artışından olumsuz etkilenen bölgeler için oranlar her iki kirliletiçi için %11.8 ve %29.8 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Hava kirliliği, COVID-19, PM10, SO₂, Türkiye

gatherings and activities with high infection risk such as visiting hospitals, attending meetings, and using public transportation [6,8,9].

On January 31, 2020, the World Health Organization (WHO) declared the "Public Health Emergency of International Concern (PHEIC)" regarding the novel coronavirus (COVID-19) outbreak that originated in China [10]. The pandemic affected 196 countries in the world, including Turkey.

In Turkey, the first known case of COVID-19 pandemic caused by the globally spreading coronavirus was reported on March 11, 2020, by the Ministry of Health of the Republic of Turkey. The first death in Turkey due to the virus occurred on March 16, 2020. The number of cases in Turkey has been continually increasing since March 2020. According to the latest data from the WHO, the COVID-19 virus has infected approximately 587 million people and more than 6.43 million people have died from the virus as of today.

* Corresponding author e-mail: zinnuryilmaz@cumhuriyet.edu.tr (Z. Yılmaz)

Geliş / Received: 08.04.2022 Kabul / Accepted: 22.07.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1100409

The uncertainty about the long-term effects of the COVID-19 pandemic and the duration of the pandemic is likely to continue for a while [11]. Various factors such as climate conditions (e.g. temperature and humidity), population density, and quality of medical care all affect the transmission of viruses [4]. Therefore, understanding the relationship between the geographic characteristics of a country and the transmission of COVID-19 is the key to making the best decision to control and prevent a pandemic. Therefore, the geography and the spatial organization of a city can be very helpful in tracking the spread of the disease [4,12].

Previous studies show that air pollutants in the environment constitute risk factors for respiratory tract infection by transmitting microorganisms and affecting immunity, thus making people less resistant to pathogens [13–17].

2 Air pollution and the Covid-19 pandemic

The main sources of air pollution are the harmful gasses and particulate matter released into the atmosphere as a result of burning fossil fuels to generate energy. The current air pollutants are the primary pollutants released directly from the source to the atmosphere, and the secondary pollutants are generated during certain physical and chemical reactions resulting from the interactions of primary pollutants in the atmospheric environment [18,19].

Today, air pollution poses a serious environmental risk regarding many diseases and deaths in the world [20]. Figure 1 shows a world map exhibiting the death rate related to air pollution according to 2017 data [21]. According to the data, 9 out of 10 people have to breathe in air containing high levels of pollutants, which emphasizes the negative effect of air pollution on human health [1]. According to a report by WHO, exposure to air pollution causes 7 million deaths every year, mostly from non-contagious diseases, including acute respiratory infections such as pneumonia [22].

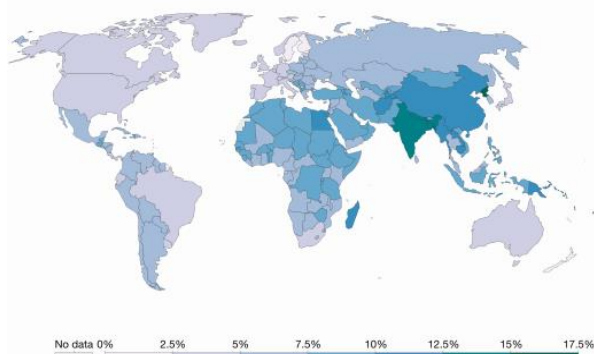


Figure 1. World map displaying the death rate from air pollution in 2017 [21].

Air pollutants, formed as a result of chemical reactions or physical events in the atmosphere, act as a carrier and negatively affect the immune system [13,14]. Several studies have revealed an association between short and long-term exposure to ambient air pollutants and multiple adverse

health effects (such as higher mortality rates, increased number of hospitalizations, and outpatient clinic visits) [23].

Globally, 9% of deaths are caused by air pollution, and this rate varies among countries (2% to 15%). Researchers have argued that high air pollution and especially smoking have made people more vulnerable to diseases caused by air pollution in the current course of COVID-19 [18,19]. Scientists believe that air pollution is a common denominator in countries with severe cases of COVID-19, particularly in the northern regions of China, South Korea, Iran, and Italy [24]. Cities with more air pollution, in particular, carry a higher risk of COVID-19 [18]. Changing volumes of air pollution have been associated with increased respiratory infections and lung diseases [15,21,22,25,26]. These adverse conditions suffered by individuals due to air pollution may reduce the chances of survival from COVID-19 [27].

Studies conducted in China have concluded that the risk factors associated with the development of COVID-19 are advanced age, smoking history, hypertension, and heart disease [28–30].

The restriction of routine life activities in large geographic areas due to quarantine measures prompted by COVID-19 has led to a significant reduction in air pollution in many parts of the world, including China, Italy, and California (USA) [31,32]. In addition to pollution, greenhouse gas emissions have also decreased across continents [33]. The amounts of nitrogen monoxide (NO) and nitrogen dioxide (NO₂), which are significant air pollutants in China, vary in the atmosphere depending on the season and the hour of the day. Findings show that the rates of these pollutants decreased by 36% in 2020 compared to 2019 [34].

Particularly in Italy, the release of NO₂, an important source of PM generated by diesel vehicles, significantly decreased [27]. The PM10 levels in Lombardy significantly decreased after the implementation of 10-day social distancing mandates pertaining to the COVID-19 pandemic (Figure 2 A-B). Also, the concentration of NO_x, one of the major air pollutants, significantly decreased in France due to a decrease in economic activity and transport caused by COVID-19 (Figure 3) [35].

Weather monitoring studies conducted in New York (USA) have revealed extremely high levels of CO over the past year and a half [36]. However, after the spread of COVID-19 in New York, traffic levels decreased by 35% from the previous year. CO and CO₂ emissions (5-10%) and methane concentrations also showed a significant reduction. In addition, officials have reported a decrease in NO₂ levels as the COVID-19 pandemic has led to a decline in business activity, resulting in less traffic in certain areas of the US [37].

In Brazil (Rio de Janeiro), carbon monoxide (CO) levels dropped significantly (30.3–48.5%) during the partial lockdown that began in mid-March. NO₂ decreased at a lower rate due to industrial and diesel engine vehicle inputs, and ozone level increased due to the decrease in nitrogen oxide level with a volatile organic compound (VOC) controlled scenario [38].

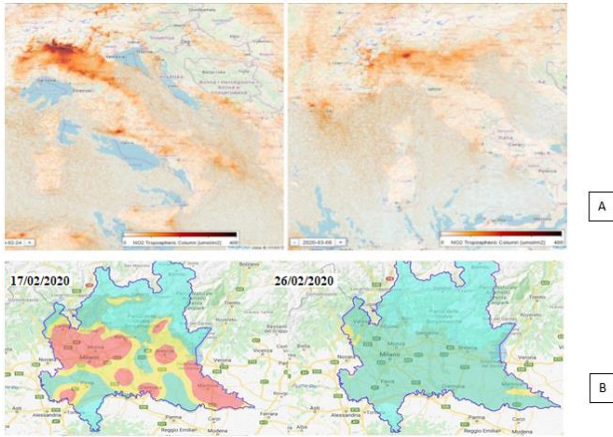


Figure 2. Image (A) shows the decrease in particulate matter levels of 10 micrometers (PM10) in Lombardy (Italy), and Image (B) shows the change in the NO₂ concentration in major Italian cities after 10 days of social distancing measures implemented due to the COVID-19 [27].

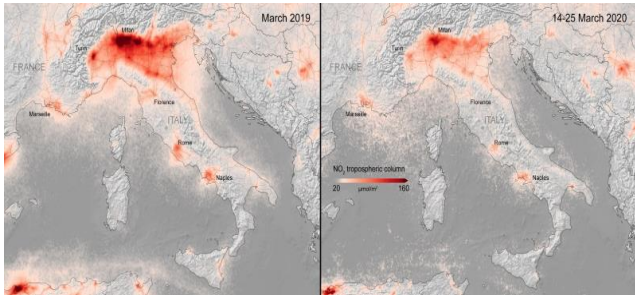


Figure 3. Image shows the decrease in NO₂ concentration in major French cities during the COVID-19 quarantine measures [35].

In another study conducted in Brazil, in order to understand the effects of partial quarantine on air quality in the state of São Paulo due to COVID-19, a study was conducted in which the five-year monthly average and four weeks before the quarantine data from four air quality stations were analyzed. As a result of the study, a decrease of up to 64.8% in CO concentrations (ppm) in the city center, and a decrease of up to 77.3% and 54.3% in the concentrations of NO and NO₂ on the city highways were observed, respectively. The partial quarantine has contributed to a positive effect on air quality [39].

In the study conducted in Beijing, Shanghai, Guangzhou and Wuhan cities of China, the effect of decreasing anthropogenic activities on air quality when COVID-19 started was investigated. PM_{2.5} decline rates in Beijing, Shanghai, Guangzhou and Wuhan were found to be 9.23, 6.37, 5.35 and 30.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. It has been understood that the decrease in anthropogenic activities, especially in transportation and industry, contributes to the reduction of PM_{2.5} concentrations. The decrease in PM_{2.5} also indirectly demonstrates the adoption of “social distancing” [40,41].

Çelik and Arıcı (2021) air quality forecasting during the covid-19 outbreak: the example of Zonguldak, in his works;

historical air quality data and PM₁₀, SO₂, CO, O₃ and NO₂ pollutant concentrations measured on days during the Covid-19 epidemic process were analyzed with machine learning models for a successful prediction of air quality. A significant decrease was observed in the measured values of CO and SO₂ pollutants. When the data set consisting of pollutant concentrations measured daily for 2019-2020 is examined, it has been found that the relationship between PM₁₀ and Air Quality Index is in parallel with the PM₁₀ increase-decrease curve and the air quality curve at many points [42]. Topuz and Karabulut (2021), in their study to examine the effect of the measures taken within the scope of Covid-19 on the air quality in the Eastern Mediterranean, daily measurement of 9 measurement stations in Adana, Mersin, Hatay, Kahramanmaraş and Osmaniye between 01.01.2019-01.06.2020. data were taken and analyzed. When the results are examined; Especially from March 2020 until 01.06.2020, a significant decrease was observed in all measured pollutant values, especially PM 10 and SO₂, of almost all stations compared to the same period of the previous year (March-June 2019). According to the results of the statistical analysis; It has been determined that there are significant differences in the 99% confidence interval between the March-June periods of 2019 and 2020 in the average of the pollutant values of all stations, excluding PM 10 pollutants of Kahramanmaraş Central, Hatay İskenderun and Adana stations [43].

Kaplan et al., (2021), in their study, the effects of the COVID-19 quarantine implemented in Turkey on air quality were examined using remote sensing data. In this context, air quality was determined by measuring the amount of NO₂, CO, O₃, SO₂ molecules in the air obtained by the Sentinel-5P TROPOMI satellite before and after the shutdown, and comparisons were made. The results revealed how the closures implemented during the COVID-19 pandemic affect air quality. The results revealed how the closures implemented during the COVID-19 pandemic affect air quality [44]. Kaplan et al., (2021), in their study on Predicting PM₁₀ and SO₂ air pollutants using Artificial Neural Network and Calculating the Error Rate, PM₁₀ and SO₂ estimation was made using Sulfur Dioxide (SO₂) and Particulate Matter (PM₁₀) data. In addition, Levenberg - Marquardt learning algorithm was used in Artificial Neural Networks (ANN) feedback network structure as a method. The obtained results were compared with the actual values and the root mean square error (OKH) was found. The OKH values found were < 0.04 [45]. Kara et al., (2020) investigated the effect of pollutants (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂ and O₃) caused by the COVID-19 epidemic on air quality in semi-rural areas in Trabzon during the COVID-19 Measures. The measures implemented in Turkey were taken into account as three periods before (1 January-15 March), during (16 March-31 May) and after (1 June-30 June) and analysis of 6 different pollutants was carried out. It has been determined that air pollution in Trabzon decreased by 20% in general during the curfew period, and the pollutant concentrations increased by 30% during the normalization period [46].

The studies conducted above on COVID-19 show the effects and reflections of closure decisions and restrictions on air quality in the world and in Turkey.

According to scientific studies, meteorological data revealed that air pollution resulting from a combination of factors such as the level of industrialization and regional topography may be a vector of infection and a damage factor in the health-related consequences of the COVID-19 pandemic [47–49].

Air quality varies depending on natural (forest fires, volcanic eruption) and anthropogenic (traffic, industrial and domestic heating) sources, meteorological parameters and atmospheric and topographic factors in a particular region, and directly or indirectly affects human health negatively.

Given the fact that Turkey has implemented similar measures to those in various other countries; The main objective of this study is to determine the distribution of hourly PM10 and SO₂ concentration values obtained from 78 measuring stations throughout Turkey between 16 March and 11 May 2020 and to compare them with the limit values in national and international regulations.

3 Method

In this study examining the distribution of PM10 and SO₂ concentrations in terms of air pollution in 78 cities of Turkey, the concentration values of the aforementioned air pollutants were obtained from the air quality monitoring stations of the Ministry of Environment and Urbanization of the Republic of Turkey. Data regarding the hourly PM10 and SO₂ values between 00.00 on March 16, 2020, and 23.59 on May 11, 2020, were obtained from the air quality monitoring stations [48].

PM10 and SO₂ concentration values were evaluated within the scope of the study for a total of 336 measurement stations where air quality measurements were carried out in Turkey. The grouping of stations in industry, traffic and urban areas were not included in the study because they showed the same increase and decrease values for all groups in terms of the parameters examined. In addition, air pollution measurement stations in Mersin, Uşak and Ardahan provinces were not included in the study because there was no necessary data.

The mean values of the concentrations of these pollutants between March 16 - May 11, 2020, when strict measures were taken in Turkey regarding the coronavirus, and the same periods covering the years 2015-2019, when there was no virus epidemic, were calculated and compared with the countries in the world in order to monitor the current possible changes.

These dates were selected as they indicate the days when the restrictions were first implemented following the first death in Turkey due to COVID-19, and when the restrictions were eased. This period can be described as Phase I in Turkey.

In the study, one air quality station was selected from each city, and the related station data were evaluated with the Excel 2010 program, and then the calculated average and change rates were processed on the Turkey map with the ArcMap 10.8 program.

Accordingly, arithmetic mean values of the pollutants were calculated using the equation given below.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

In this equation (1),

\bar{x} = mean PM10 or SO₂ values

x = hourly PM10 or SO₂ values

n = total PM10 or SO₂ counts

4 Results and discussion

This study examined the effects of reduced emission on air pollution due to decreased human activity during the COVID-19 outbreak in Turkey. For this purpose, 78 provinces with current data for 2020 in air pollution monitoring stations from 81 provinces in Turkey were selected.

Table 1 shows the cities with trends of increase and decrease in PM10 and Table 2 shows the cities with trends of increase and decrease in SO₂ concentrations. These tables also show the mean values of these parameters from the same periods between the years of 2015 and 2019. The mean distribution of the concentrations of the pollutants among the provinces is presented in Figure 4-5.

PM10 generally contains earth crust materials, and the dust released into the atmosphere from roads and industrial facilities. Various natural sources such as the burning of fuels, diesel engines, construction and industrial activities, secondary aerosols (reaction of ammonia, sulfur, and nitrogen oxides in the air), plant pollen, and dust from the ground can generate particulate matter [49]. Calculations around the dates referred to as Phase I, indicating the implementation of measures in Turkey due to COVID-19 (March 16 - May 11, 2020) and the same periods between 2015 and 2019 showed that Hakkari (76%), Mardin (76%), Niğde (62%), Şanlıurfa (62%), and Afyonkarahisar (59%) were the cities where mean PM10 values decreased the most. A comparison between the dates in Phase I and the corresponding periods from 2015-2019 revealed that the mean PM10 values increased in 2020 in Tunceli (61%), Kilis (54%), Şırnak (31%), Malatya (28%), and Çanakkale (23%).

SO₂ is released through the burning of sulfur compounds found in fossil fuels, coal, and fuel oil. SO₂ concentrations are generally high in central areas of cities with the widespread use of coal for domestic heating, as well as industrial zones and their surroundings [50]. In this context, the maximum decrease and maximum increase rates of SO₂ concentrations on the basis of provinces were calculated for the dates we call phase I and the relevant periods between 2015-2019. The cities with the maximum decrease in mean SO₂ concentrations were Afyonkarahisar (79%), Kars (77%), Denizli (71%), Bartın (70%), and Osmaniye (68%); and Hakkari (393%), Ordu (369%), Tunceli (296%), Kocaeli (226%), and Şanlıurfa (186%) showed the most increased mean values.

Table 1. The changes in PM10 concentrations in cities with trends of increase and decrease in the specified periods (%).

NO	Station	Maximum Trend of Increase in PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Parameters			Station	Maximum Trend of Decrease in PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Parameters		
		2020	2015-2019 (Mean)	Change (%)		2020	2015-2019 (Mean)	Change (%)
1	Tunceli	25.82	16.02	61.17	Hakkari	11.1	46.42	76.09
2	Kilis	48.53	31.46	54.27	Mardin	13.65	57.07	76.08
3	Şırnak	48.16	36.79	30.91	Niğde	26.29	69.19	62.01
4	Malatya	46.08	36.03	27.9	Şanlıurfa	13.41	35.26	61.97
5	Çanakkale	39.83	32.41	22.89	Afyonkarahisar	23.54	57.73	59.23
Mean Value for Turkey						32.66	45.45	28.15

Table 2. The changes in SO₂ concentrations in cities with a trend of increase and decrease during the specified periods (%).

NO	Station	Maximum Trend of Increase in SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Parameter			Station	Maximum Trend of Decrease in SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Parameter		
		2020	2015-2019 (Mean)	Change (%)		2020	2015-2019 (Mean)	Change (%)
1	Hakkari	169.94	34.46	393.12	Afyonkarahisar	4.06	19.55	79.24
2	Ordu	24.05	5.13	369.04	Kars	3.54	15.39	77
3	Tunceli	20.3	5.13	295.87	Denizli	4.86	16.71	70.91
4	Kocaeli	15.51	4.76	225.84	Bartın	3.31	10.94	69.76
5	Şanlıurfa	25.9	9.05	186.31	Osmaniye	3.36	10.36	67.58
Mean Value for Turkey		11.89	10.50	13.16				



(a)



(b)

Figure 4. Mean PM10 values in Turkey between March 16 - May 11, (a- 2020, b- Between 2015-2019)

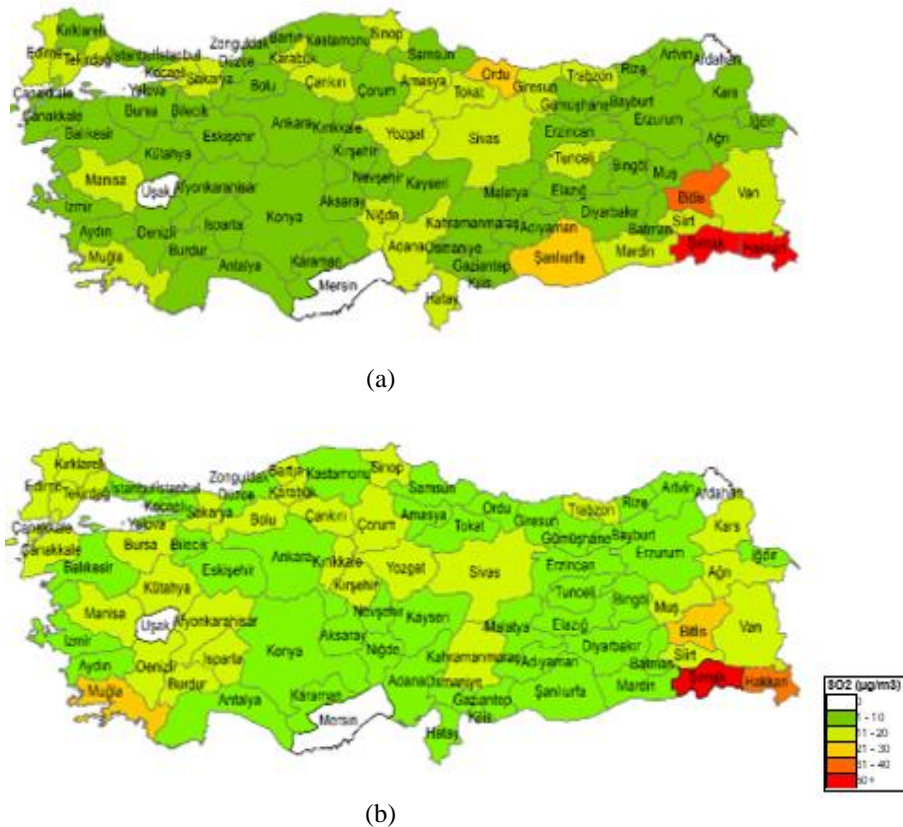


Figure 5. Mean SO₂ values in Turkey between March 16 - May 11 (a- 2020, b- Between 2015-2019)

According to Turkish Statistical Institute (TurkStat) data, the 78 cities, where the air pollutants such as PM₁₀ and SO₂ were evaluated, represent 97.2% of the population of Turkey. Based on the population density of the 78 cities represented, the ratio of the population in the regions positively affected by the decrease in the PM₁₀ parameters to the population of Turkey was 87.6%. The population ratio in the regions that were adversely affected by the increase in PM₁₀ parameters was 11.8%. The population ratio in regions with no change in PM₁₀ concentrations was 0.6%. The ratio of the population in the regions positively affected by the decrease in concentration in the SO₂ parameter to the population of Turkey was 70.2%, while for the regions negatively affected by the increase in concentration, this figure was 29.8%.

These calculations were made with the view that the PM₁₀ and SO₂ parameters had the same impact on the population of the entire city in the regions where the measurements were taken.

Comparison between the mean values of the data belonging to the period with COVID-19 restrictions and the data belonging to the period between 2015 and 2019 in Turkey, revealed an increase in both PM₁₀ and SO₂ parameters in Artvin (PM₁₀ 5%, SO₂ 20%), Kastamonu (PM₁₀ 5%, SO₂ 38%), Bingöl (PM₁₀ 12%, SO₂ 33%), Amasya (PM₁₀ 18%, SO₂ 79%), Şırnak (PM₁₀ 31%, SO₂ 12%), Kilis (PM₁₀ 54%, SO₂ 19%), and Tunceli (PM₁₀ 61%, SO₂ 296%).

A study conducted in Salé City (Morocco) evaluated the changes in the concentrations of certain air pollutants (PM₁₀, SO₂) during the restriction period. The results indicated that the difference between the concentrations recorded before and during the restriction period was 75% - 49% for PM₁₀ and SO₂, respectively [51].

Another study examining the potential effects of COVID-19 restrictions on the air quality in Tehran, the capital of Iran, based on the data obtained from 12 air quality monitoring stations, revealed that SO₂, PM₁₀ concentrations had decreased by 5–28% and 1.4–30%, respectively [52].

A similar study conducted in China showed that the SO₂ and PM₁₀ concentrations measured in 44 cities between January 1 and 21, 2020, had decreased by 6.76% and 13.66%, respectively and that the mean air quality index (AQI) had decreased by 7.8% [53].

Another study in Korea showed that the concentration of PM₁₀ associated with industrial activities and traffic decreased in periods when COVID-19 restrictions were put in place. In March 2020, following the quarantine, the average level of PM₁₀ concentration across the country decreased by 35.56% compared to the average level of the previous year and researchers reported that the aforementioned decrease was not associated with a decrease in SO₂ concentration [54]. A comparison between PM₁₀ concentration values from the period with COVID-19 restrictions in Turkey and the mean values between 2015 and 2019 (45.45 µg/m³), showed a 28% decrease based on the

mean 2020 data (32.66 µg/m³). On the other hand, there was a 13% increase in the mean SO₂ concentration values (2020: 11.89 µg/m³; mean value between 2015 and 2019: 10.50 µg/m³).

5 Conclusion

It has been concluded that PM10 concentration, which is related to industrial activities and traffic, decreased during the quarantine period, with the COVID-19 virus epidemic measures being taken in Turkey. Furthermore, the distributions of SO₂ concentrations in Turkey, showed that COVID-19 quarantine periods imposed during the cold season in the country led to high SO₂ concentration levels in regions where the use of solid fuel is common.

Findings showed that even though SO₂ concentrations presented a trend of increase, based on the mean values for the concentrations of air pollutants, air pollution significantly decreased as a result of certain measures such as curfews on weekends and weekdays, restriction of industrial activities and intercity transportation, albeit for short periods.

Taking into consideration the mortality rate associated with air pollution, it is important for people living in cities with higher air pollution levels to be more cautious and take steps to strengthen their immune systems. Additionally, the use of masks can reduce coronavirus exposure, as the transmitting aerosols are in the 1-5 µm range. Mask use is therefore imperative to reduce the impact of air pollution in highly-polluted cities, which could, in turn, lower the risk associated with COVID-19.

With the implementation of safety measures and restrictions, emissions from exhausts of vehicles and industrial production showed a significant decrease, which contributed to a decline in the concentrations of the pollutants examined in the study.

In conclusion, the decrease in the PM10 and SO₂ concentrations observed in the cities examined in the study could essentially be associated with the strict measures implemented during the COVID-19 pandemic, which restricted mobility and industrial activities, leading to a significant decrease in the emissions caused by exhausts of vehicles and industrial production.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

Similarity (iThenticate): 13%

References

- [1] World Health Organization, Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): Situation Report, 72, World Health Organization, 2020. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331685> (accessed: 31.03.2022).
- [2] S. Gautam, U. Trivedi, Global implications of bio-aerosol in pandemic. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 3861-3865, 2020. doi:10.1007/s10668-020-00704-2.
- [3] H. Bherwani, A. Gupta, S. Anjum, A. Anshul, R. Kumar, Exploring dependence of COVID-19 on environmental factors and spread prediction in India. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 3, 1-13, 2020. doi:10.1038/s41612-020-00142-x.
- [4] J. Wang, K. Tang, K. Feng, X. Lin, W. Lv, K. Chen, F. Wang, Impact of Temperature and Relative Humidity on the Transmission of COVID-19: A Modeling Study in China and the United States. *BMJ Open*, 11, e043863, 2020. doi:10.2139/ssrn.3551767.
- [5] S. Gautam, L. Hens, COVID-19: impact by and on the environment, health and economy. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 4953-4954, 2020. doi:10.1007/s10668-020-00818-7.
- [6] S. Gautam, The Influence of COVID-19 on Air Quality in India: A Boon or Inutil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104, 724-726, 2020. doi:10.1007/s00128-020-02877-y.
- [7] M. Cascella, M. Rajnik, A. Aleem, S.C. Dulebohn, R. Di Napoli, Features, Evaluation, and Treatment of Coronavirus (COVID-19). *StatPearls*, StatPearls Publishing, Treasure Island (FL), 2022. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554776/> (accessed: 31.03.2022).
- [8] H. Bherwani, M. Nair, K. Musugu, S. Gautam, A. Gupta, A. Kapley, R. Kumar, Valuation of air pollution externalities: comparative assessment of economic damage and emission reduction under COVID-19 lockdown. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 13, 683-694, 2020. doi:10.1007/s11869-020-00845-3.
- [9] WHO, 9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action. 2018. <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action> (accessed: 31.03.2022).
- [10] C. Sohrabi, Z. Alsafi, N. O'Neill, M. Khan, A. Kerwan, A. Al-Jabir, C. Iosifidis, R. Agha, World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel coronavirus (COVID-19). *International Journal of Surgery*, 76, 71-76, 2020. doi:10.1016/j.ijssu.2020.02.034.
- [11] L. Atay, COVID-19 pandemic and its impact on tourism. *Journal of Travel and Hospitality Management*. 17, 168-172, 2020. doi:10.24010/soid.723581.
- [12] M.N. Kamel Boulos, E.M. Geraghty, Geographical tracking and mapping of coronavirus disease COVID-19/severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) epidemic and associated events around the world: how 21st century GIS technologies are supporting the global fight against outbreaks and epidemics. *International Journal of Health Geographics*, 19, 8, 2020. doi:10.1186/s12942-020-00202-8.
- [13] J.M.S. Susanne Becker, Exposure to urban air particulates alters the Macrophage-Mediated inflammatory response to respiratory viral infection. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 57, 1999. 445-457. doi:10.1080/009841099157539.
- [14] Q.-C. Cai, J. Lu, Q.-F. Xu, Q. Guo, D.-Z. Xu, Q.-W. Sun, H. Yang, G.-M. Zhao, Q.-W. Jiang, Influence of meteorological factors and air pollution on the

- outbreak of severe acute respiratory syndrome. *Public Health*, 121, 258-265, 2007. doi:10.1016/j.puhe.2006.09.023.
- [15] B.D. Horne, E.A. Joy, M.G. Hofmann, P.H. Gesteland, J.B. Cannon, J.S. Lefler, D.P. Blagev, E.K. Korgenski, N. Torosyan, G.I. Hansen, D. Kartchner, C.A. Pope, Short-Term elevation of fine particulate matter air pollution and acute lower respiratory infection. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 198, 759-766, 2018. doi:10.1164/rccm.201709-1883OC.
- [16] J. Xie, J. Teng, Y. Fan, R. Xie, A. Shen, The short-term effects of air pollutants on hospitalizations for respiratory disease in Hefei, China. *International Journal of Biometeorology*, 63, 315-326, 2019. doi:10.1007/s00484-018-01665-y.
- [17] Q. Xu, X. Li, S. Wang, C. Wang, F. Huang, Q. Gao, L. Wu, L. Tao, J. Guo, W. Wang, X. Guo, Fine particulate air pollution and hospital emergency room visits for respiratory disease in urban areas in Beijing, China. *PLOS ONE*, 11, e0153099, 2016. doi:10.1371/journal.pone.0153099.
- [18] R. Korber, Severe coronavirus & poor air quality could be linked. *Breezometer*, 2020. <https://blog.breezometer.com/coronavirus-air-quality-connection> (accessed: 31.03.2022).
- [19] B.S. Perappadan, Coronavirus | Air pollution may further impact patients, say doctors. *The Hindu*, 2020. <https://www.thehindu.com/sci-tech/health/coronavirus-air-pollution-may-further-impact-patients-say-doctors/article61961810.ece> (accessed: 31.03.2022).
- [20] J.D. Stanaway, A. Afshin, E. Gakidou and at all, Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 392, 1923-1994, 2018. doi:10.1016/S0140-6736(18)32225-6.
- [21] H. Ritchie, M. Roser, Air pollution, our world in data. 2017. <https://ourworldindata.org/air-pollution> (accessed: 31.03.2022).
- [22] B.D. Horne, Air pollution kills 7 million people each year, many from pneumonia. *Infectious Disease News*, 2018. <https://www.healio.com/news/infectious-disease/20180501/air-pollution-kills-7-million-people-each-year-many-from-pneumonia> (accessed: 31.03.2022).
- [23] S.A. Bremner, H.R. Anderson, R.W. Atkinson, A.J. McMichael, D.P. Strachan, J.M. Bland, J.S. Bower, Short-term associations between outdoor air pollution and mortality in London 1992. *Occupational and Environmental Medicine*, 56, 237-244, 1999. doi:10.1136/oem.56.4.237.
- [24] P. Vetter, I. Eckerle, L. Kaiser, Covid-19: a puzzle with many missing pieces. *BMJ*, 368, m627, 2020. doi:10.1136/bmj.m627.
- [25] T. Schikowski, D. Sugiri, U. Ranft, U. Gehring, J. Heinrich, H.-E. Wichmann, U. Krämer, Long-term air pollution exposure and living close to busy roads are associated with COPD in women. *Respiratory Research*, 6, 152, 2005. doi:10.1186/1465-9921-6-152.
- [26] J. Ciencewicz, I. Jaspers, Air pollution and respiratory viral infection. *Inhalation Toxicology*, 19, 1135-1146, 2007. doi:10.1080/08958370701665434.
- [27] E.P.H. Alliance, Coronavirus threat greater for polluted cities - EPA, <https://epa.org/>. (t.y.). <https://epa.org/coronavirus-threat-greater-for-polluted-cities/> (accessed: 31.03.2022).
- [28] C. Wu, X. Chen, Y. Cai, J. Xia, X. Zhou, S. Xu, H. Huang, L. Zhang, X. Zhou, C. Du, Y. Zhang, J. Song, S. Wang, Y. Chao, Z. Yang, J. Xu, X. Zhou, D. Chen, W. Xiong, L. Xu, F. Zhou, J. Jiang, C. Bai, J. Zheng, Y. Song, Risk factors associated with acute respiratory distress syndrome and death in patients with coronavirus disease 2019 pneumonia in Wuhan, China. *JAMA Internal Medicine*, 180, 934-943, 2020. doi:10.1001/jamainternmed.2020.0994.
- [29] W. Liu, Z.-W. Tao, L. Wang, M.-L. Yuan, K. Liu, L. Zhou, S. Wei, Y. Deng, J. Liu, H.-G. Liu, M. Yang, Y. Hu, Analysis of factors associated with disease outcomes in hospitalized patients with 2019 novel coronavirus disease. *Chinese Medical Journal*, 133, 1032-1038, 2020. doi:10.1097/CM9.0000000000000775.
- [30] M. Chen, Y. Fan, X. Wu, L. Zhang, T. Guo, K. Deng, J. Cao, H. Luo, T. He, Y. Gong, H. Wang, J. Wan, X. Wang, Z. Lu, Clinical characteristics and risk factors for fatal outcome in patients with 2019-coronavirus infected disease (COVID-19) in Wuhan, China. *Social Science Research Network*, Rochester, NY, 2020. doi:10.2139/ssrn.3546069.
- [31] J. Calma, Air pollution could make the COVID-19 pandemic worse for some people. *The Verge*, 2020. <https://www.theverge.com/2020/3/19/21186653/coronavirus-covid-19-air-pollution-vulnerable-lung-disease-pandemic> (accessed: 31.03.2022).
- [32] J. Calma, Maps show drastic drop in China's air pollution after coronavirus quarantine. *The Verge*, 2020. <https://www.theverge.com/2020/3/2/21161324/coronavirus-quarantine-china-maps-air-pollution> (accessed: 31.03.2022).
- [33] M. Henriques, Will Covid-19 have a lasting impact on the environment?. *BBC*, 2020. <https://www.bbc.com/future/article/20200326-covid-19-the-impact-of-coronavirus-on-the-environment> (accessed: 31.03.2022).
- [34] L. Myllyvirta, Analysis: Coronavirus temporarily reduced China's CO₂ emissions by a quarter. *Carbon Brief*, 2020. <https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-has-temporarily-reduced-chinas-co2-emissions-by-a-quarter> (accessed: 31.03.2022).
- [35] I. Todorović, Air pollution sharply falls worldwide on COVID-19 lockdowns. 2020. <https://balkangreenenergynews.com/air-pollution->

- [sharply-falls-worldwide-on-covid-19-lockdowns](#) (accessed: 31.03.2022).
- [36] B. Pascus, City traffic levels plummet 35% following new executive orders, Crain's New York Business. 2020. <https://www.crainsnewyork.com/coronavirus/city-traffic-levels-plummet-35-following-new-executive-orders> (accessed: 31.03.2022).
- [37] fox2detroit, Air pollution drops across the globe amid COVID-19 pandemic, data suggests. fox2detroit, 2020. <https://www.fox2detroit.com/news/air-pollution-drops-across-the-globe-amid-covid-19-pandemic-data-suggests> (accessed: 31.03.2022).
- [38] G. Dantas, B. Siciliano, B.B. França, C.M. da Silva, G. Arbilla, The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of The Total Environment*, 729, 139085, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139085.
- [39] L.Y.K. Nakada, R.C. Urban, COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. *Science of The Total Environment*, 730, 139087, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139087.
- [40] J. Wang, G. Du, COVID-19 may transmit through aerosol. *Irish Journal of Medical Science*, 189, 1143-1144, 2020. doi:10.1007/s11845-020-02218-2.
- [41] P. Wang, K. Chen, S. Zhu, P. Wang, H. Zhang, Severe air pollution events not avoided by reduced anthropogenic activities during COVID-19 outbreak. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104814, 2020. doi:10.1016/j.resconrec.2020.104814.
- [42] B.D. Çelik, N. Arici, Air Quality Forecast in the Covid-19 Outbreak Process: Zonguldak Case. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 7, 222-232, 2021.
- [43] M. Topuz, M. Karabulut, Occurred change in air pollution parameters in the process of coronavirus (COVID-19) measures: example of the Eastern Mediterranean. *International Journal of Geography and Geography Education*, 44, 428-444, 2021. doi:10.32003/igge.837367.
- [44] G. Kaplan, D. Matci, F. Erdem, N. Öçer, U. Avdan, Detection of the Effect of Covid-19 Lockdown on Air Quality in Turkey with Remote Sensing Data. 3th International Disaster and Resilience Congress, 5-7 October 2021 AFAD Campus, Ankara, 2021.
- [45] Y. Kaplan, U. Saray, E. Azkeskin, Which cause air pollution PM10 and SO2 using by artificial neural network of estimation and error rate calculation. Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 14, 2, 2014.
- [46] Y. Kara, Ş. Dursun, H. Toros, Assessment of Air Pollution in Trabzon During COVID-19 Measures. *Journal of Research in Atmospheric Science (JRAS)*, 2, 1, 1-6, 2020.
- [47] R.J. Isaifan, The dramatic impact of Coronavirus outbreak on air quality: Has it saved as much as it has killed so far?. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6, 275-288, 2020. doi:10.22034/gjesm.2020.03.01.
- [48] SİM (Sürekli İzleme Merkezi), 2022. <https://www.havaizleme.gov.tr/> (accessed: 31.03.2022).
- [49] F. Özdemir, Analysis of dispersion of sulfur dioxide and particulate matter pollution in Turkey, Master Thesis, Yıldız Technical University Institute of Science, İstanbul, 2008.
- [50] Ö. Akyürek, Analysis of relation between air pollution and meteorological conditions for Trabzon urban depending on data between 2006 and 2011, Master Thesis, Karadeniz Technical University, Graduate Institute of Natural and Applied Sciences, Trabzon, 2012.
- [51] A. Otmani, A. Benchrif, M. Tahri, M. Bounakhla, E.M. Chakir, M. El Bouch, M. Krombi, Impact of Covid-19 lockdown on PM10, SO₂ and NO₂ concentrations in Salé City (Morocco). *Science of The Total Environment*, 735, 139541, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139541.
- [52] P. Broomandi, F. Karaca, A. Nikfal, A. Jahanbakhshi, M. Tamjidi, J.R. Kim, Impact of COVID-19 event on the air quality in Iran. *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 1793-1804, 2020. doi:10.4209/aaqr.2020.05.0205.
- [53] R. Bao, A. Zhang, Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China. *Science of The Total Environment*, 731, 139052, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139052.
- [54] M.J. Ju, J. Oh, Y.-H. Choi, Changes in air pollution levels after COVID-19 outbreak in Korea. *Science of The Total Environment*, 750, 141521, 2021. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141521.





Array gain analyses of MIMO systems in 5G communication systems

5G iletişim sistemlerinde ÇGÇÇ sistemlerin dizin kazanç analizleri

Ural Mutlu^{1,*} , Yasin Kabalcı² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir University, Bor Vocational School, 51700, Bor, Niğde Turkey

² Niğde Ömer Halisdemir University, Electrical and Electronic Engineering Department, 51240, Niğde, Turkey

Abstract

In the last decade, Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) algorithms have been developed for mobile communication networks in order to increase spectrum efficiency and reduce transmitted power, which are also two of the main Key Performance Indicators of Fifth Generation New Radio (5G NR). Therefore, various MIMO algorithms are being researched for their adaptability to 5G NR specifications. The objective of this study is to examine the array gains achieved with the deployment of multiple transmit antennas and multiple receive antennas in 5G NR Physical Downlink Shared Channel (PDSCH). The study first examines the array gains of Single-Input Multiple-Output (SIMO) and Multiple-Input Single-Output (MISO), then combines the transmitter and the receiver diversities in a MIMO system for 5G PDSCH. The array gains are achieved through precoding and combining vectors obtained by Singular Value Decomposition (SVD) of the channel coefficients matrix. The results show that theoretical array gains can be achieved in end-to-end 5G NR downlink channels.

Keywords: Array gain, 5G, MIMO, SIMO, MISO

1 Introduction

The deployment of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) communication techniques to the mobile communication networks has gained considerable attention in the last decade mainly due to the development in the MIMO processing algorithms, the improvements in the computing capabilities of the mobile devices, and the increase in carrier frequencies. The term MIMO is used to describe both a communication system consisting of an array of multiple transmit and receive antennas and the signal processing algorithms involved in the successfully transmission of modulated signals through these multiple antennas. MIMO improves the reliability, power consumption, and spectral efficiency of communication systems by providing spatial diversity and spatial multiplexing [1–3]. Spatial diversity uses the spatially separated multiple channels between transmit and receive antennas to improve the reliability and the power consumption of a single data stream. Spatial multiplexing, on the other hand, uses the multiple signal paths to send multiple data streams simultaneously in order to increase spectral efficiency.

Öz

Son on yılda, mobil iletişim ağlarında spektrum verimliliğini artırmak ve kullanılan iletim gücünü azaltmak için Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (ÇGÇÇ) algoritmaları geliştirilmiştir. Spektrum verimliliğini artırmak ve kullanılan iletim gücünü azaltmak Beşinci Nesil Yeni Radyonun (5G YR) da Temel Performans Göstergelerinden olduğundan MIMO algoritmalarının 5G YR spesifikasyonlarına uygunluğu araştırılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, 5G YR Fiziksel Aşağı Yönlü Bağlantı Paylaşımlı Kanalında (FAYBPK) çoklu verici antenler ve çoklu alıcı antenler kullanılarak elde edilen dizin kazançlarını incelemektir. Çalışma, Tekli Giriş Çoklu Çıkış (TGÇÇ) ve Çoklu Giriş Tekli Çıkış (ÇGTÇ) dizin kazanımlarını inceler, ardından 5G YR FAYBPK ÇGÇÇ sisteminde verici ve alıcı çeşitliliklerini birleştirir. Dizin kazanımları, Tekil Değer Ayırıştırma (TDA) ile elde edilen ön kodlama ve birleştirme vektörlerini kullanılarak elde edilir. Çalışma sonuçlarına göre teorik dizi kazanımları baştan-uca 5G YR aşağı bağlantı kanallarında elde edilebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Dizine kazanç, 5G, ÇGÇÇ, TGÇÇ, ÇGTÇ

MIMO has been successfully deployed in various wireless communication systems such as IEEE 802.11n/ac [4, 5], IEEE 802.16 [6], Fourth Generation Long-Term Evolution (4G LTE) [7], Fifth Generation New Radio (5G NR) [8], etc. The first introduction of MIMO to mobile communication networks was with the 3rd Generation Project Partnership (3GPP) Release 7, where the Base Stations (BS) supported 2x2 MIMO but it had limited success [9]. The real benefits of MIMO were realised with the introduction of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) in 3GPP Release 8 for 4G LTE. MIMO in LTE also started as a 2x2 MIMO supported only by the base station, whereas the latest version of LTE, Release 14, supports 8x8 MIMO in the downlink and 4x4 MIMO in the uplink directions [7]. Following the success of LTE, 3GPP Release 15 specifies 5G NR, where the deployment of massive MIMO (mMIMO) antenna arrays of size 64 and upwards at the BS would facilitate the use of new MIMO algorithms. Furthermore, the increase in the frequency range decreases the wavelength leading to smaller antenna array size in the transceivers of the User Equipment (UE). The transition from limited MIMO in LTE to mMIMO will be the defining characteristic

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: uralmutlu@gmail.com (U. Mutlu)

Geliş / Received: 15.03.2022 Kabul / Accepted: 06.07.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1088264

of 5G NR. Therefore, there are lots of research projects focusing on MIMO techniques in 5G NR [10–12].

Most of the MIMO algorithms in wireless communications rely on the multipath nature of the wireless channel, which results in spatial diversity. It is generally assumed that independent and identically distributed multipath channels have low correlation and the likelihood that all the channels suffer deep fade at the same time is also low [1–3]. Therefore, coherent combination of multiple channels in a constructive manner at the transmitter and the receiver leads to the spatial processing gains of array gain and diversity gain [3, 11]. Array gain is defined as the increase in the ratio of the average Signal to Noise Ratio (SNR) obtained by combining multiple antenna signals in MIMO transmission to the SNR of a Single-Input-Single-Output (SISO) transmission. Whereas, diversity gain is the degree of increased reliability due to the use of independently fading paths.

[13] is one of the first studies to formulate capacities and error exponents of MIMO communication system. Since then, the capacity and the power gains of MIMO algorithms have been well-established [1–3, 11]. In MIMO transmission, the combination of the multiple signals is carried out by multiplying the signals of the antenna array elements with complex precoding and combining vectors at the transmitter and the receiver. Precoding and combining of the multiple paths at RF chain level is also termed as digital beamforming. The optimum precoding and combining algorithms for a Single User MIMO (SU-MIMO) are the Maximum Ratio Transmission (MRT) and the Maximum Ratio Combining (MRC) methods, both of which use Singular Value Decomposition (SVD) to obtain the precoding and combining vectors [11, 14].

In a comprehensive study, [15] compares various linear precoding techniques for Multi-User MIMO (MU-MIMO) transmission in 5G NR and the results show that in case of digital beamforming MRT performs better than Zero Forcing (ZF) at lower SNR values but worse than MMSE. This shows that the MRT is a viable solution for improving SNR when the power is minimal. In a similar study on energy efficiency for MU-MIMO transmission in 5G NR, [16] also confirms that the combination of MRT and MRC improves the energy efficiency at lower SNR values better than ZF and has a similar performance to MMSE. [17] is another study on energy efficiency for MU-MIMO transmission and the results show that MRT has a better energy efficiency than ZF when the number of antennas at the BS is not too high. [18] simulates a MU-MIMO with 32 transmit antennas and 110 moving receivers in order to compare MRC, Selection Combining, and Equal Gain Combining algorithms. The results of the study show that the combination of the MRT and MRC provides the best performance. Although, MRT and MRC are not 5G specific algorithms, the research on 5G NR MIMO confirms that MRT and MRC are applicable in transmissions where the number of users is not high [19], [20]. MRT and MRC also have the advantage of being the easiest to implement and deploy [21].

Despite the large body of research on MU-MIMO algorithms in 5G NR [15], not many studies investigate the

SNR improvements that can be achieved by MRT and MRC in 5G NR physical channels for a SU-MIMO scenario [22]. In 5G NR Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), for precoding without codebook, the requirement is that the precoding and combining are made transparent to the UE and BS [23]. From the BS's perspective, the PDSCH transmission is a Multiple-Input Single-Output (MISO) transmission and the receiver is not aware of the multiple transmit antennas. Similarly, the UE views the transmission as a Single-Input Multiple-Output (SIMO) transmission. Moreover, without a shared codebook, spatial multiplexing is not applicable. Thus, a simple PDSCH without codebook precoding can be thought as a single stream SU-MIMO transmission. Therefore, the aim of this study is to investigate the array gain improvements that can be achieved by the deployment of multiple antennas at the BS and the UE when codebooks are not used in 5G NR PDSCH transmission.

To this end, the study establishes 5G NR PDSCH channel with MRT precoding at the transmitter and MRC combining at the receiver. First, the effects of the precoding vector on the array gain in MISO transmission and the effects of combining vector on the array gain in SIMO transmission are investigated. Then, the transmit antenna and receive antenna diversities are combined and the array gain for MIMO transmission is examined. The study uses 3GPP specified Tapped Delay Line (TDL) channel model.

The rest of the paper is organised as follows, section 2 describes the processes of precoding and combining, and then it establishes the equations and the bounds for the array gains. Section 3 gives an outline of the 5G NR PDSCH specifications as well as the specifications for the TDL channel model. Section 4 shows the simulation results as Bit Error Rate (BER) plots for SIMO, MISO, and MIMO separately. Finally, the last section is the conclusion section summarising the experiences acquired during the project.

The notations and assumptions used in this paper are as follows. Matrixes are represented with capital letters, for example A . Vectors are given with small bold letters, e.g. \mathbf{a} . $(\cdot)^T$ and $(\cdot)^*$ are transpose and conjugate operations and $(\cdot)^H$ is the Hermitian matrix operation.

2 MIMO array gain analysis

Figure 1 shows the reference model for a SU-MIMO transmission. In this model, the transmitter is equipped with N_t antennas and the receiver, similarly, has N_r antennas.

$H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$, the channel matrix, describes the attenuations and the phase shifts of the air interface between transmitter and receiver antenna pairs. The elements of the channel matrix are given as h_{ij} , where i indexes the receiver antenna and j is the transmitter antenna index. Each channel is also assumed to be a multipath channel with different paths arriving at the receiver with different delays, attenuations, and phases. The analysis in this section are based on the assumption that channel estimation is carried successfully and that both the transmitter and receiver have almost perfect Channel State Information (CSI).

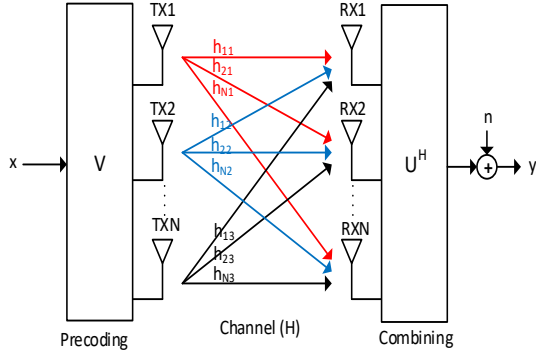


Figure 1. Reference model for single user MIMO transmission

2.1 Precoding and combining with SVD

Since, the aim of the study is to observe the power gains in SNR, the optimum algorithms of MRT and MRC were chosen for this study. MRT precoding and MRC combining methods are based on the principal right and left singular vectors of the SVD and the vectors can achieve full array gain in MISO and SIMO transmission modes regardless of the channel correlations. However, when the MRT and MRC are employed at the same time, the result would be dependent on the channel correlations. The SVD decomposes the channel matrix H as [1, 3]:

$$H = UDV^H \quad (1)$$

Where $D = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_i)$ is a diagonal matrix containing real valued singular values in order from the maximum to the minimum, $s_1 > s_2 > \dots > s_i$. The dimensions of D or the number of singular values is limited by the rank of H , given as $\text{rank}(H) = \min(N_r, N_t)$ assuming the correlation between the channels is relatively low. U and V are unitary matrixes of size $N_r \times N_r$ and $N_t \times N_t$, respectively. They are unitary matrixes in a sense that the multiplication of the matrix with its Hermitian is an identity matrix, as in $UU^H = I$ and $VV^H = I$. The vectors of the V matrix are employed as precoding vectors and the vectors of the U^H matrix are the combining vectors. V and U can be represented as $[\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_t]$ and $[\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_r]$. The \mathbf{v} and \mathbf{u} vectors are orthonormal vectors, in other words, their norms are 1 and the inner products of the \mathbf{v} and the \mathbf{u} vectors results in 0. For a single user, it is always the first vectors of the matrices and the first singular value that are used for precoding and combining.

The analyses for a single layer transmission are as follows. Given that x is the complex valued modulated symbol sent through the channel with the coefficients given in H , the received signal y with the noise added at the receiver is:

$$y = Hx + n \quad (2)$$

Where, n is Additive White Gaussian Noise (AWGN), $n \sim CN(0, \sigma^2)$ added at the receiver before applying the combining algorithm. The H matrix in Equation 2 can be replaced with SVD decomposed matrices to give:

$$y = UDV^H x + n \quad (3)$$

Mathematically speaking, by applying the precoding vector \mathbf{v}_1 at the transmitter, the effects of V^H are cancelled out. Likewise, at the receiver the combining vector \mathbf{u}_1^H would also cancel out the effects of the U matrix, leaving only the singular values in the equation. Applying the precoding and combining vector, the equation for the received signal becomes:

$$y = \mathbf{u}_1^H (UDV^H \mathbf{v}_1 x + \mathbf{n}) \quad (4)$$

By replacing both the V^H and U matrices with the vectors and using 2x2 MIMO as an example, Equation 4 can be rewritten as:

$$y = \mathbf{u}_1^H \left([\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2] \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^* \\ \mathbf{v}_2^* \end{bmatrix} \mathbf{v}_1 x + \mathbf{n} \right) \quad (5)$$

Thus the resulting received signal can simply be shown as:

$$y = s_1 x + \mathbf{u}_1^H \mathbf{n} \quad (6)$$

The \mathbf{u}_1^H multiplier in the noise term can be ignored as \mathbf{u}_1^H is orthonormal and would not have an effect on the expected value of noise. Equation 6 is the general equation for a single stream SU-MIMO. Equation 4 and 5 can also be applied for transmission of multiple streams or layers by using the other vectors and singular values of the SVD matrices. The equation for an i^{th} user or stream can be rewritten as:

$$y = s_i x_i + n \quad (7)$$

The equation shows that the received signal is the transmitted signal multiplied with the singular value of the channel coefficients matrix. This is the property of SVD that is used in spatial multiplexing, which is not in the scope of this study.

2.2 Array gain analyses

In order to calculate the array gain, first the SNR of SISO transmission is established and then MISO, SIMO, and MIMO transmission SNRs are given as ratio of SISO SNR. For simplicity of analysis, the average transmitted symbol energy and the expected value of the noise variance are assumed to be equal to 1.

2.2.1 SISO SNR

In SISO transmission, the transmitted signal goes through a multi-path fading channel with a channel coefficient of h and at the same time suffers AWGN noise, which is modelled as an addition at the receiver. The received signal y and its corresponding SNR are given as:

$$y = hx + n \quad (8)$$

$$SNR = |h|^2 \quad (9)$$

2.2.2 MISO Array Gain

Since, MISO is a $N_t \times 1$ transmission scheme, \mathbf{u}_1 is 1 and the channel decomposition is equal to $\mathbf{h} = s_1 \mathbf{v}_1^H$. The precoding vector and the resulting received signals after precoding and noise are added are:

$$\mathbf{v}_1 = \frac{\mathbf{h}^*}{s_1} \quad (10)$$

$$y = \mathbf{h}^T \frac{\mathbf{h}^*}{s_1} x + n \quad (11)$$

For a vector, its singular value is also its L_2 norm; therefore, Equation 11 can be rewritten as:

$$y = \mathbf{h}^T \frac{\mathbf{h}^*}{\|\mathbf{h}\|} x + n \quad (12)$$

$$y = \|\mathbf{h}\| x + n \quad (13)$$

Equations 12 and 13 are also the equations used to describe MRT precoding [24, 25]. From Equation 13, the SNR of MISO transmission can be simply calculated as:

$$SNR = \|\mathbf{h}\|^2 \quad (14)$$

Where, $\|\mathbf{h}\|^2$ is the sum of the squares of the channel coefficients of the individual SISO channels that make up the MISO transmission. Assuming h_i is the channel coefficient of the i^{th} SISO channel, the SNR of MISO becomes:

$$\|\mathbf{h}\|^2 = \sum_{i=1}^{N_t} |h_i|^2 \quad (15)$$

Provided channel gains are normalised and averaged, it can be assumed that $\|\mathbf{h}\|^2$ averages to $N_t \times |h|^2$. Therefore,

the SNR and the array gain of a MISO transmission would be:

$$SNR_{MISO} = N_t \times SNR_{SISO} \quad (16)$$

Thus, the array gain for MISO transmission is equal to the number of transmitter antennas, N_t .

2.2.3 SIMO array gain

The channel decomposition for a single layer SIMO, assuming $\mathbf{v}_1 = 1$, becomes $\mathbf{h} = \mathbf{u}_1 s_1$. By replacing s_1 with $\|\mathbf{h}\|$, the combining vector \mathbf{u}_1^H becomes:

$$\mathbf{u}_1^H = \frac{\mathbf{h}^H}{\|\mathbf{h}\|} \quad (17)$$

Since, there is no precoding in SIMO transmission, the received signal after applying the combining vector is given with:

$$y = \frac{\mathbf{h}^H}{\|\mathbf{h}\|} (\mathbf{h}x + \mathbf{n}) \quad (18)$$

$$y = \|\mathbf{h}\| x + \frac{\mathbf{h}^H}{\|\mathbf{h}\|} \mathbf{n} \quad (19)$$

The SNR of the received signal in Equation 19 can be calculated as in Equation 20:

$$SNR = \frac{\|\mathbf{h}\|^2}{\frac{\mathbf{h}^H \mathbf{h}}{\|\mathbf{h}\|^2}} = \|\mathbf{h}\|^2 \quad (20)$$

The equation for SNR for the received signal in SIMO is the same as Equation 16 and can be shown as:

$$SNR_{SIMO} = N_r \times SNR_{SISO} \quad (21)$$

From the Equation 21 the array gain for SIMO transmission is equal to the number of receive antennas, N_r .

2.2.4 MIMO array gain

The exact value of the array gain in MIMO depends on the nature of the channel coefficients and its analyses is not as straight forwards as in MISO and SIMO [11, 25]. However, it is possible to establish an upper bound for the array gain and understand the conditions that can lead to the upper bound.

For the MIMO SNR analysis, the received signal in Equation 6 is used and the equation shows that the

transmitted signal is simply multiplied by the first singular value. To get the upper bound, the analyses make use of the Frobenius norm of the channel coefficients matrix. The Frobenius norm of a channel coefficients matrix is the square root of the sums of the squares of absolute values of each matrix coefficient, shown in Equation 22. In other words, the square of the Frobenius norm can be thought as the sum of match filtered SISO channels [25, 26]. This would also denote the total power that can be transmitted using all the SISO channels available. If the average value of $|h_{ij}^* . h_{ij}|$ is assumed to be $|h|^2$, as in SISO transmission, the square of the Frobenius norm would be equal to the sum of $N_r \times N_t$ SISO channels, Equation 23:

$$\|H\|_F^2 = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} |h_{ij}^* . h_{ij}| \quad (22)$$

$$\|H\|_F^2 = N_r N_t |h|^2 \quad (23)$$

$$\|H\|_F^2 = \sum_{i=1}^{rank(H)} s_i^2 \quad (24)$$

Another property of the Frobenius norm is that the square of the Frobenius norm is the sum of the squares of the singular values, Equation 24. From Equation 7, the SNR of each stream or layer in spatially multiplexed MIMO is proportional to the square of its singular value. Therefore, the square of the Frobenius norm can be interpreted as sharing of the available power between multiple layers, where each layer's share is proportional to the square of its singular value. The SNR for a single layer SU-MIMO is thus:

$$s_1^2 = N_r N_t |h|^2 - \sum_{i=2}^{rank(H)} s_i^2 \quad (25)$$

In order to intuitively deduce an upper bound for the array gain for a single layer MIMO, the extreme case of a channel where all the coefficients are equal or $Rank(H)=1$ could be considered, as is the case in both SIMO and MISO. In this scenario, s_1 reduces to $s_1^2 = N_r N_t |h|^2$ and the resulting array gain bounds become [25]:

$$\max\{N_r, N_t\} \leq AG \leq N_r N_t \quad (26)$$

The upper bound of Equation 26 is not very realistic as it represents the array gain for MIMO transmission with highly correlated channels. In highly correlated channels, the square of the first singular value is much larger than the total of the squares of the other singular values. Therefore, the Frobenius norm would be dominated by the first singular value and the array gain would be close to $N_r \times N_t$. Using SVD based MRT and MRC to calculate precoding and combining

vectors is therefore also referred to as Dominant Eigenmode Beamforming or Maximum Eigenmode Beamforming.

In uncorrelated channels or in channels with lower correlation, the dominance of the first singular value would reduce, and the array gain for such uncorrelated channels has been shown to be upper bounded by [27]:

$$AG \leq \left(\sqrt{N_r} + \sqrt{N_t} \right)^2 \quad (27)$$

In summary, the array gain of a SU-MIMO would depend on the channel properties. The channel model used in this research is TDL channel model, where each channel is multipath fading channel and the correlation between the channels is low. Therefore, the upper bound for the array gain given in Equation 27 would be the expected result.

2.2.5 Zero forcing receiver

The analyses in the previous sub-sections are based on MRC, which is a Matched Filter (MF) receiver. In MF receivers, the received signal is multiplied with H^H and the output of the receiver is a scaled version of the received signal as given in Equation 13 and 19. However, the received signal needs to be normalised before further processing. The receiver implemented in this study is a ZF receiver, which is designed to eliminate the effects of the channel coefficients by multiplying the channel coefficients with the inverse of the channel, thus also eliminating the need for normalising the power. For the purposes of this study, ZF and MF would produce comparable results and the assumption that MRC produces optimum results for SU-MIMO is still satisfied.

The combining matrix for the ZF receiver can be shown with the pseudo-inverse of the channel coefficients:

$$W_{ZF} = \left(H^H H \right)^{-1} H^H \quad (28)$$

In Equation 28, the H matrix seen by the receiver is not the full channel coefficients matrix but the precoded version of the matrix. The channel coefficients matrix seen by the receiver is termed as the effective channel coefficients matrix, H_{eff} , and is given as:

$$H_{eff} = U D V^H V = U D \quad (29)$$

Replacing the matrices with vectors and singular values, such that $\mathbf{h}_{eff1} = \mathbf{u}_1 . s_1$, the combining vector for a ZF receiver can be rewritten as:

$$\mathbf{w}_{ZF} = \frac{\left(\mathbf{h}_{eff1} \right)^H}{\left(\mathbf{h}_{eff1} \right)^H . \mathbf{h}_{eff1}} \quad (30)$$

$$\mathbf{w}_{ZF} = \frac{\mathbf{u}_1^H}{s_1} \quad (31)$$

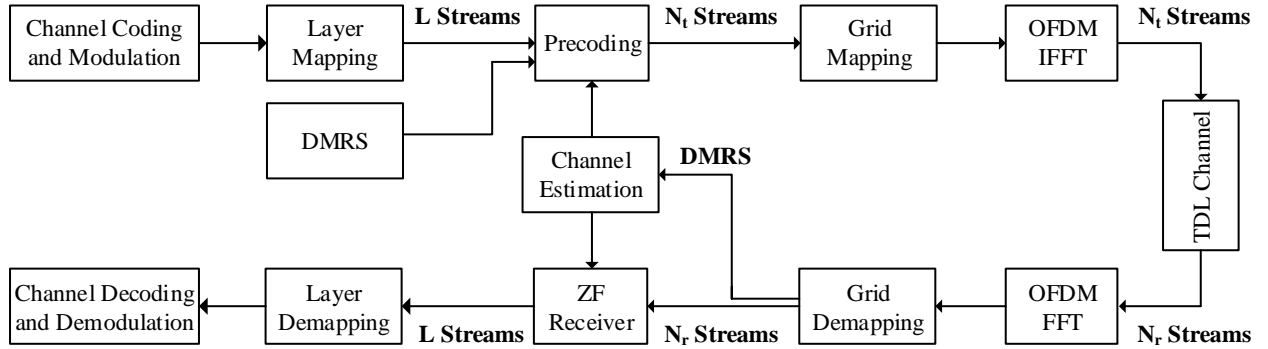


Figure 2. 5G NR PDSCH MIMO processing block diagram

As the Equation 31 shows, the ZF receiver vector is a scaled version of the MF combining vector. If ZF receiver is used instead of MF, Equation 6 would become:

$$y = x + \frac{\mathbf{u}_1^H}{s_1} \mathbf{n} \quad (32)$$

Incidentally, Equation 32 would give the same array gain results as in the previous analysis.

3 5G NR PDSCH processing chain and TDL channel model

Conceptually, the data processing procedures of PDSCH are divided into two stages; multiplexing and channel coding stage and physical channels and modulation stage which are defined in [28] and [23] respectively. Although, the simulations of the study implement all the procedures, the focus of the research is on the MIMO related steps, which start after channel coding and modulation. Figure 2 shows the block diagram for the procedures that are explained in this section.

The processes in the Channel Coding and Modulation block, shown in Figure 2, are applied to the data in the transport blocks arriving from the Medium Access Control (MAC) layer. These processes are in the following order: CRC Attachment, block segmentation, Low Density Parity Check (LDPC) encoding, Rate Matching and Interleaving, and Modulation. After modulation, MIMO related procedures of Layer Mapping, Precoding, Grid Mapping, and OFDM modulation are applied to the modulated code words.

3.1 Layer mapping

Layer Mapping is the process of splitting the modulated complex valued symbols into multiple streams and mapping each stream to a layer. In 5G terminology, the term layer refers to the number of streams that are spatially multiplexed to achieve higher spectral efficiency. The current study investigates a single layer transmission; therefore, data is not divided into multiple layers.

3.2 Precoding

Precoding is the step where modulated complex valued symbols are precoded and mapped to antenna. Precoding is a serial to parallel converter through which a single symbol for a given layer is mapped on multiple antennas with amplitude and phase determined by the precoding vector. According to [29], the requirement for the coherent combination of the antenna array outputs is that any precoding algorithm should be transparent to the UE. Therefore, the precoding method or matrix that is applied to the user data is also applied to the Demodulation Reference Signal (DMRS), Figure 2. The application of the precoding matrix to the DMRS hides the precoding matrix within the channel estimate. In other words, the channel seen by the receiver is the effective channel given with Equation 29.

3.3 Grid mapping and OFDM modulation

The precoded complex symbols are then mapped on to the resource elements in two stages. In the first stage, symbols are mapped onto “virtual resource blocks”, which is an array of blocks marked as available for transmission. The symbols are then mapped from the virtual resource blocks to “physical resource blocks”.

OFDM Modulation is the last step in the transmitter. OFDM Modulation is carried out separately for each transmitter antenna. For baseband analyses, the output of each individual OFDM Modulation is in effect a transmitter antenna signal. Since all the antennas transmit over the same frequency, a channel coefficient is applied to each signal and the signals are then simply superimposed onto one another.

3.4 Receiver and PDSCH decoding

The receiver and the decoding algorithms are the inverse of PDSCH transmitter algorithms, with the exception of channel estimation and MIMO receiver.

3.5 Channel estimation

Channel estimation in 5G NR is achieved through DMRS, which is based on Gold Sequences or Gold Codes [28, 30]. 5G NR specifications define how the DMRS is used by specifying its allocation, mapping type, position in the

resource grid, length, scheduling, etc. To obtain the coefficients, the transmitter assigns a unique DMRS sequence(s) at a unique PDSCH OFDM grid position(s) and each receiver uses the known DMRS sequence to calculate the amplitude and the phase of the received signal. The H matrix obtained through the DMRS would be an estimate rather than an exact matrix.

Moreover, it is generally assumed that MIMO beamforming algorithms use Time Division Duplexing (TDD) mode in which the channel reciprocity principle applies [31, 32]. The reciprocity principle is based on the fact that the channel properties are the same for both downlink and uplink and that channel coefficients can be estimated by the BS through the DMRS sent in the uplink.

3.6 Tapped delay line (TDL) channel model

Wireless communications channels are characterised as multipath fading channels that can cause fluctuations in the received signal's magnitude, phase, and angle of arrival. 3GPP has defined TDL channel models for the multipath environments for frequencies from 0.5GHz up to 100 GHz [32, 33].

The model employs a number of flat fading generators or taps. In the model the taps are independent of each other and generate flat fading Rayleigh distributed channel for Non-Line-of-Sight (N-LOS) paths and Ricean distributed channel for LOS paths. The channel impulse response of the multipath TDL model with N numbers of taps and $a_k(t)$ the amplitude at the τ_k delay for the k^{th} tap is implemented as an FIR filter with the following output:

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^N a_k(t) \delta(t - \tau_k) \quad (33)$$

The TDL channel model is described for SISO systems. For a MIMO model, $N_r \times N_t$ number of SISO channels and a level of correlation between the SISO channels can be defined.

4 Simulations and results

In this section, 5G NR PDSCH is simulated for various transmit and receive antenna configurations. The processing chain described in section 3 and shown in Figure 2 is implemented with the parameters in Table 1.

The channel estimation implemented in the simulations emulates the channel reciprocity principle. The channel coefficients are calculated by averaging the channel coefficients matrix of the received Physical Resource Block (PRB) and are used to calculate ZF receiver vectors. These coefficients are also used to precode the next transmitted PRB. In other words, precoding vectors are obtained from the previously received PRB's channel estimates. On the other hand, for the simulation purposes, the channel coefficients are taken directly from the channel model instead of using the DMRS. Therefore, the channel estimation is perfect. The polarisation mode in the TDL channel model was set to co-polar, which indicates that the antennas transmit with the same polarisation angle and are

independent from each other. Finally, the MIMO correlation was set to Low or 0.

Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Subcarrier Spacing	30kHz
Number of RBs	50
Sample Rate	30,720,000
Modulation	16QAM
LDPC Code Rate	1/2
Channel Estimation	Perfect
Channel Model	TDL-C
Delay Spread	100ns (Nominal DS)
MIMO Correlation	Low - 0
Polarisation	Co-Polar
Simulation Size	200 Frames (~6.10 ⁷ bits)

First, a benchmark BER simulation for SISO was carried out. Then, simulations for MISO, SIMO, and MIMO were run. For all the simulations, BER graphs are plotted and the results are compared.

4.1 MISO array gain results

A MISO transmission system using the parameters in Table 1 was set up and run for antenna configurations of 2x1, 4x1, and 8x1. The simulation results are plotted as BER graph together with the BER for the benchmark of SISO transmission in TDL channel. The results are displayed in Figure 3.

The BER improvements for 2x1 and 4x1 MISO transmission compared to SISO are approximately 3dB and 6dB, which correspond to array gains of 2 and 4 respectively. These results show that array gains are equal to the number of transmit antennas. On the other hand, the array gain for 8x1 MISO is slightly less than the expected 9dB. Overall, the BER simulations for MISO show that keeping all the parameters identical by changing the number of antennas at the transmitter, the required transmit power can be reduced linearly with the number of antennas.

4.2 SIMO array gain results

Similar to MISO, simulations were run for antenna configurations of 1x2, 1x4, and 1x8. BER simulation results are given in Figure 4.

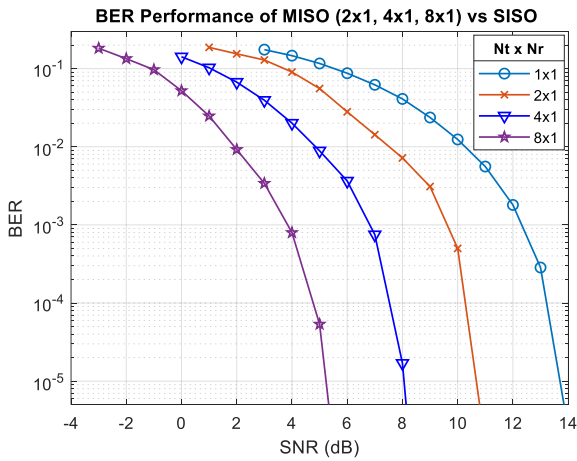


Figure 3. MISO BER simulation results

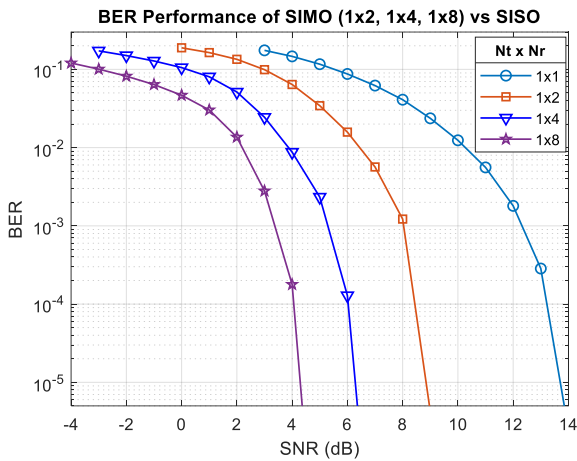


Figure 4. SIMO BER simulation results

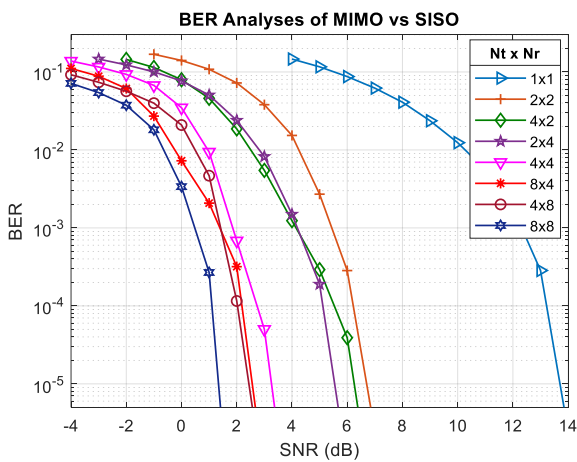


Figure 5. MIMO BER simulation results

The BER improvements for 1x2, 1x4, and 1x8 SIMO transmissions compared to SISO are 5dB, 7.7dB, and 9,8dB respectively, which correspond to array gains of 3.16, 5.88, and 9.54. These results are higher than expected. The results also show that there is a sudden increase in the array gain going from a single antenna to two antennas. Although, 1x4 and 1x8 still perform better than the theoretical values, the improvements for each doubling of the antenna numbers

reduces and with 1x8 transmission mode the array gain is closer to the expected value.

The performance difference between MISO and SIMO could be partly explained with the way channel estimation is used. As mentioned at the beginning of the section, MISO uses channel estimation of the previous PRB, while SIMO uses the current PRB's coefficients. Therefore, there is a small time delay in the channel estimates of MISO, which may explain why SIMO performs better than MISO. However, this does not explain why the array gain of SIMO is bigger than N_r .

In [34], Chen offers another reason why the array gain is higher than the number of receive antennas in SIMO. Chen states that SIMO diversity or receive beamforming tends to steer the received beam to the dominant path and spatially filters secondary paths arriving from other directions at later times. In other words, SIMO acts as if the delay spread for the stronger signals has been reduced and as if the coherence bandwidth has been increased. Chen also states that the reduced delay spread and the bandwidth effect have been experimentally verified.

In the array gain analysis of SIMO, it was assumed that the channel responses average over time and that they are equal. However, for SIMO with small number of antennas, it could also be a case where the rule of the averages does not converge. Why SIMO performs better than the theoretical algorithms for smaller number of antennas should be further investigated.

4.3 MIMO array gain results

The BER simulation results for MIMO are displayed in Figure 5 and the power gains compared to SISO transmission

are tabulated for better clarity. According to the results given in Table 2, all the array gains are within the bounds specified in Equation 26 and 27 except for 2x2 MIMO, whose upper bound for Equation 26 should be 4. This exception is due to the increase in the array gain for smaller arrays in the receiver side.

Table 2. MIMO simulation results as ratio

$N_t \times N_r$	dB	AG Ratio
2x2	7	5
4x2	7.5	5.6
2x4	8.5	7.1
4x4	10.5	11.2
8x4	11.2	13.2
4x8	11.4	13.8
8x8	12.5	17.8

Figure 5 shows that the array gain goes up with the increase in the number of antennas at the transmitter and the receiver, in other words the array gain of MIMO is affected by both precoding and combining vectors. Furthermore, when 2x4 and 4x2 are compared it is obvious that the number of

receive antennas has a higher effect on the array gain, the same argument can be made for 4x8 and 8x4 transmissions.

Finally, the array gain for the larger antenna array sizes does not increase as much as it does for the smaller arrays. The diminishing returns was also observed in MISO and SIMO transmission modes.

5 Conclusions

The aim of the study was to investigate and simulate the SNR improvements that can be achieved by applying precoding and combining vectors to 5G NR PDSCH. The study first established the theoretical equations for the array gains in MISO and SIMO, which are equal to the number of transmit and receive antennas respectively. Then, the upper bounds for array gain in MIMO scheme were given, which are based on the assumption that in MIMO transmission the correlation of the channels is relatively low.

Simulation of PDSCH for MISO confirmed that array gain improvements are as expected. However, when the same simulation was run for SIMO, the results were higher than the theoretical expectations. It was argued that this discrepancy might be a results of how SIMO modifies the channel properties and these claims should be further investigated. The higher than expected improvements in SIMO also affected MIMO results, where MIMO modes with higher number of receive antennas offered higher array gain. It was also observed that the increase in the array gain reduces as the number of antennas grows. The upper limit for the array gain should also be established in future research.

Finally, according to [35], the radio networks consume more than 60% of the electric power in the mobile networks and this consumption is expected to increase even further with the deployment of 5G NR. Therefore, any array gains would contribute to the reduction of the power consumption both at the base station and at the UE. In summary, the study showed that array gains are achievable for PDSCH in TDL channels.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] H. Kim, Design and Optimization for 5G Wireless Communications. Wiley-IEEE Press, 2020.
- [2] A. Goldsmith, Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [3] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press, 2005.
- [4] IEEE SA, "IEEE 802.11n-2009." <https://standards.ieee.org/ieee/802.11n/3952/>. Accessed March 2022
- [5] IEEE SA, "IEEE 802.11ac-2013." <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ac/4473/>. Accessed March 2022
- [6] IEEE, "IEEE 802.16-2017." <https://standards.ieee.org/ieee/802.16/6996/>. Accessed March 2022
- [7] 3GPP, "Release 14." <https://www.3gpp.org/release-14>. Accessed March 2022
- [8] 3GPP, "Release 15." <https://www.3gpp.org/release-15>. Accessed March 2022
- [9] 3GPP, "Release 7." <https://www.3gpp.org/specifications/releases/73-release-7>. Accessed March 2022
- [10] Y. Kabalci, 5G Mobile Communication Systems: Fundamentals, Challenges, and Key Technologies, Smart Grids and Their Communication Systems, Springer (2019), pp. 329-359
- [11] A. Zaidi, F. Athley, J. Medbo, X. Chen, and G. Durisi, 5G physical layer: Principles, models and technology components, Academic Press, 2018.
- [12] U. Mutlu, Y. Kabalci, Effects of Antenna Array on Throughput in 5G NR PDSCH, III. International Turkic World Congress on Science and Engineering (TURK-COSE), pp. 98-108, 2021
- [13] E. Telatar, Capacity of multi-antenna Gaussian channels, Eur. Trans. Telecommun., vol. 10, no. 6, pp. 585–595, 1999, doi: 10.1002/ett.4460100604.
- [14] M. A. Albreem, A. H. Al Habbash, A. M. Abu-Hudrouss, and S. S. Ikki, Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO, IEEE Access, vol. 9, pp. 60764–60801, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3073325.
- [15] T. Kebede, Y. Wondie, J. Steinbrunn, H. B. Kassa, and K. T. Kornegay, Precoding and Beamforming Techniques in mmWave-Massive MIMO: Performance Assessment, IEEE Access, vol. 10, pp. 16365–16387, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149301.
- [16] R. M. Asif, J. Arshad, M. Shakir, S. M. Noman, and A. U. Rehman, Energy Efficiency Augmentation in Massive MIMO Systems through Linear Precoding Schemes and Power Consumption Modeling, Wirel. Commun. Mob. Comput., vol. 2020, pp. 1–13, Sep. 2020, doi: 10.1155/2020/8839088.
- [17] D. Kadhim, Promising Gains of 5G Networks with Enhancing Energy Efficiency Using Improved Linear Precoding Schemes, Int. J. Intell. Eng. Syst., vol. 14, no. 3, pp. 139–149, Jun. 2021, doi: 10.22266/ijies2021.0630.13.
- [18] J. Kaur, O. R. Popoola, M. Ali Imran, Q. H. Abbasi, and H. T. Abbas, Improving Throughput For Mobile Receivers Using Adaptive Beamforming, in 2021 1st International Conference on Microwave, Antennas & Circuits (ICMAC), Dec. 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICMAC54080.2021.9678216.
- [19] N. Fatema, G. Hua, Y. Xiang, D. Peng, and I. Natgunanathan, Massive MIMO Linear Precoding: A Survey, IEEE Syst. J., vol. 12, no. 4, pp. 3920–3931, 2018, doi: 10.1109/JSYST.2017.2776401.
- [20] X. Qiao, Y. Zhang, and L. Yang, Conjugate Gradient Method Based Linear Precoding with Low-Complexity for Massive MIMO Systems, in 2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Dec. 2018, pp. 420–424, doi: 10.1109/CompComm.2018.8780818.
- [21] B. Lee, Simplified Antenna Group Determination of RS Overhead Reduced Massive MIMO for Wireless Sensor Networks, Sensors, vol. 18, no. 2, p. 84, Dec. 2017, doi: 10.3390/s18010084.

- [22] V. Ivanov, A. Medvedev, I. Bondareva and V. Grigoriev, Performance of 5G SU-MIMO Employing OFDM Bandwidth and Per-Subcarrier Precoding, Editors: O. Galinina, S. Andreev, S. Balandin, Y. Koucheryavy, Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2020, ruSMART 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65729-1>
- [23] ETSI TS 138 211 - V16.2.0, 5G NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16), ETSI 2020
- [24] M. Vu and A. Paulraj, MIMO wireless linear precoding, IEEE Signal Process. Mag., vol. 24, no. 5, pp. 86–105, 2007, doi: [10.1109/MSP.2007.904811](https://doi.org/10.1109/MSP.2007.904811).
- [25] B. Clerckx and C. Oestges, MIMO Wireless Networks, Academic Press, 2013.
- [26] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to space-time wireless communications, Cambridge University Press, 2003.
- [27] J. B. Andersen, Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 18, no. 11, pp. 2172–2178, 2000, doi: [10.1109/49.895022](https://doi.org/10.1109/49.895022).
- [28] ETSI TS 138 212 - V16.2.0, “5G NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 16.2.0 Release 16), ETSI 2020
- [29] ETSI TS 138 300 - V16.2.0, 5G; NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2 (3GPP TS 38.300 version 16.2.0 Release 16), 2020.
- [30] U. Mutlu, Y. Kabalci, Deep Learning Aided Channel Estimation Approach for 5G Communication Systems, 2022 4th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), pp. 655-660, 2022, doi: [10.1109/GPECOM55404.2022.9815811](https://doi.org/10.1109/GPECOM55404.2022.9815811)
- [31] T. Dubois, M. H elard, M. Cruss iere, and C. Germond, Performance of time reversal precoding technique for MISO-OFDM systems, Eurasip J. Wirel. Commun. Netw., vol. 2013, no. 1, pp. 1–16, 2013, doi: [10.1186/1687-1499-2013-260](https://doi.org/10.1186/1687-1499-2013-260).
- [32] G. Barb and M. Otesteanu, On the Influence of Delay Spread in TDL and CDL Channel Models for Downlink 5G MIMO Systems, 2019 IEEE 10th Annu. Ubiquitous Comput. Electron. Mob. Commun. Conf. UEMCON 2019, pp. 0958–0962, 2019, doi: [10.1109/UEMCON47517.2019.8992982](https://doi.org/10.1109/UEMCON47517.2019.8992982).
- [33] ETSI TR 138 900, LTE; 5G; Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz (3GPP TR 38.900 version 15.0.0 Release 15), 2018
- [34] X. Chen, “Throughput Modeling and Measurement in an Isotropic-Scattering Reverberation Chamber,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 62, no. 4, pp. 2130–2139, Apr. 2014, doi: [10.1109/TAP.2014.2301850](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2301850).
- [35] D. Borges, P. Montezuma, R. Dinis, and M. Beko, “Massive MIMO Techniques for 5G and Beyond—Opportunities and Challenges,” Electronics, vol. 10, no. 14, p. 1667, Jul. 2021, doi: [10.3390/electronics10141667](https://doi.org/10.3390/electronics10141667).





KKG kullanılan hız algılayıcısız SMSM için AYK ve DMK'nin karşılaştırılması

Comparison of FOC and DTC for speed sensorless PMSM using

Barış Çavuş^{1,*} , Mustafa Aktaş² 

^{1,2} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun Türkiye

Öz

Bu çalışmada hız sensörsüz sabit mıknatıslı senkron motorun (SMSM) doğrudan moment kontrolü (DMK) ve alan yönlendirmeli kontrol (AYK) benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Kontrol yöntemleri için gerekli olan hız sinyali kayan kipli gözlemci (KKG) ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda SMSM'nin akım, hız (ölçülen ve tahmin edilen) ve moment sinyalleri elde edilmiştir. DMK ve AYK performansının değerlendirilebilmesi için elde edilen sinyallerin toplam harmonik bozunum (THB) ve ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ölçülen ve tahmin edilen hız sinyalleri için hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK) kriteri kullanılarak DMK ve AYK karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışma ile DMK ve AYK yöntemlerinin birbirlerine göre üstün ve eksik oldukları durumlar belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: SMSM, DMK, AYK, KKG, THB, ADD, HKOK

1. Giriş

Sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM), endüstride olduğu kadar otomotiv ve robotik gibi uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. SMSM'nin yaygın olarak kullanılmasının nedenleri arasında küçük boyut olması, yüksek hızlı tepki vermesi, düşük atalet momenti ve bakım gerektirmemesi gibi özellikler sayılabilir [4]. Diğer makinelerle karşılaştırıldığı zaman, gelişmiş kontrol yöntemlerinin SMSM'ye uygulanması daha kolaydır [5].

SMSM'nin kontrolsüz olarak doğrudan sürülmesi durumunda başlangıç akımının yüksek olması, dinamik tepkilerinin düşük olması ve çalışma hatasının yüksek olması gibi olumsuzluklarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle daha yüksek dinamik performans ve verim elde edilebilmesi için vektör kontrol yöntemleri kullanılmalıdır [5, 6]. Bu şekilde SMSM, Doğru Akım (DA) motoruna benzetilerek motorun akısı ve momenti birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir [7]. Vektör kontrol yöntemlerinden biri olan alan yönlendirmeli kontrol (AYK), 1971 yılında F. Blaschke tarafından önerilmiştir [8]. AYK'de, park dönüşümü kullanılarak motorun 3 faz değişkenleri 2 faz değişkenlerine dönüştürülür. Dönüşüm sonucunda elde edilen fazlardan biri akı diğeri ise moment kontrolünde kullanılır. Böylece 3 fazlı SMSM DA motor gibi kontrol edilebilir [9]. Düşük anahtarlama frekansı, moment ve

Abstract

In this study, direct torque control (DTC) and field oriented control (FOC) simulation study of a speed sensorless permanent magnet synchronous motor (PMSM) is carried out. The speed signal required for the control methods was obtained with a sliding mode observer (SMO). As a result of the study, current, speed (measured and estimated) and torque signals of PMSM were obtained. Total harmonic distortion (THD) and discrete wavelet transform (DWT) analysis of the obtained signals were performed to evaluate the performance of DTC and FOC. In addition, DTC and FOC comparisons were made using the root mean square error (RMSE) criterion for the measured and estimated speed signals. In this study, it was determined that the DTC and FOC methods are superior and deficient compared to each other.

Keywords: PMSM, DTC, FOC, SMO, THD, DWT, RMSE

akıdaki dalgalanmanın az olması, yüksek kararlılıkta çalışma AYK'nin en belirgin avantajlarıdır. Fakat AYK'nin dinamik tepkisi hızlı değildir ve sistem değişkenlerine bağımlılığı daha fazladır [10]. Ayrıca bu kontrolde tüm motor değişkenlerine "park dönüşümü" uygulanır ve bu durum sistemin karmaşıklaşmasına ve yavaşlamasına neden olur [11]. Diğer bir vektör kontrol yöntemi olan doğrudan moment kontrolü (DMK), 1985 yılında Takahashi ve Noguchi tarafından önerilmiştir [12]. DMK'de, moment ve akı doğrudan motor değişkenleri kullanılarak hesaplanır. Devamında akı ve moment, referans değerleri ile karşılaştırılarak doğrudan kontrol edilir [13, 14]. DMK'nin avantajları arasında koordinat sistemi dönüşümünün ve akım kontrolörlerinin olmaması, yüksek dinamik tepki, motor parametrelerine bağımlılığın az olması, gösterilebilir [15, 16]. Ayrıca eksen dönüşümü olmadığı için DMK algoritmasının çalışması hızlıdır. Fakat DMK ile kontrol edilen motorun akı ve momentinde dalgalanma çok fazladır ve anahtarlama sinyalinin frekansı oldukça değişkendir [17, 18].

Vektör kontrolü uygulayabilmek için konum ve hız bilgisine ihtiyaç vardır [19, 20]. Kontrol için gerekli olan hız bilgisi, motora bağlanacak hız sensörü vasıtasıyla ölçülebileceği gibi motor değişkenleri kullanılarak ta hesaplanabilir [21-23]. Motor kontrolünde sensör kullanılması uygulananabilirliğinin zorluğu, maliyeti ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: baris.cavus@omu.edu.tr (B. Çavuş)

Geliş / Received: 09.05.2022 Kabul / Accepted: 16.07.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1114082

gürültülü çalışmaya sebep olması gibi dezavantajları vardır [24, 25]. Bu nedenle motor modeli kullanılarak hız kestiriminin yapıldığı sensörsüz motor kontrol yöntemleri önerilmiştir [26, 27]. Bu yöntemlerden biri farklı kontrol uygulamalarında başarısını ortaya koymuş olan kayan kipli gözlemcidir (KKG) [28, 29].

Bu çalışmada KKG ile sensörsüz çalıştırılan SMSM'nin en çok kullanılan motor kontrol yöntemleri olan DMK ve AYK performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Şekil 1, 2 ve Denklem (1)-(6) kullanılarak MATLAB m-file ortamında sistem modellemesi yapılmıştır. Her iki kontrol yöntemi, için motor üç faz akımı, momenti, kestirilen ve gerçek motor hız sinyalleri elde edilmiştir. Her iki kontrol yönteminde elde edilen hız sinyalleri ile hız hatası elde edilmiştir. Bunun yanı sıra elde edilen sinyaller kullanılarak Toplam Harmonik Bozunum (THB) ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) standart sapma değerleri elde edilmiş ve iki yöntemin performansı değerlendirilmiştir. Böylece DMK ve AYK yöntemlerinin birbirlerine göre üstün ve eksik oldukları durumlar belirlenmiştir.

2. Sürekli mıknatıslı senkron motor

Sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) iki parçadan (bir rotor ve üç fazlı stator sargıları) oluşur. Stator sargılarına üç fazlı gerilim uygulanır ve bu sargılar tarafından dönel manyetik alan oluşturulur. Ayrıca rotorda kalıcı mıknatıslar bulunur ve bu mıknatıslar rotor manyetik alanı üretir. Rotor manyetik alanı, stator sargıları tarafından üretilen dönel manyetik alanı takip eder ve böylece SMSM çalışır [30].

2.1. SMSM'nin matematiksel modeli

SMSM'nin dinamik denklemleri aşağıdaki verilmiştir [31].

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d}i_d + \frac{\omega_r L_q i_q}{L_d} + \frac{V_d}{L_d} \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q}i_q - \frac{\omega_r L_d i_d}{L_q} - \frac{\psi_m}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d I_d + \psi_m \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q I_q \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3p}{2}(\psi_m I_q + (L_d - L_q)I_d I_q) \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B\omega_r - T_L) \quad (6)$$

Yukarıda verilen denklemlerde V_d ve V_q stator geriliminin d ve q bileşenleri, I_d ve I_q stator akımının d ve q bileşenleri, ψ_d ve ψ_q stator akısının d ve q bileşenleri, ψ_m kalıcı mıknatısın akı değeridir, T_e indüklenen moment, T_L yük momenti ve ω_r rotor hızıdır. Bu çalışmada kullanılan SMSM'nin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. SMSM parametreleri

Motor gücü	1.1 kW
Nominal moment	3 Nm
Nominal hız	3000 rpm
Kutup sayısı	8
Stator direnci	2.875 Ω
d eksenli indüktansı	8.5 mH
q eksenli indüktansı	8.5 mH
Mıknatıs akısı	0.175 Wb
Eylemsizlik momenti	0.0008 kgm ²

2.2. Doğrudan moment kontrol

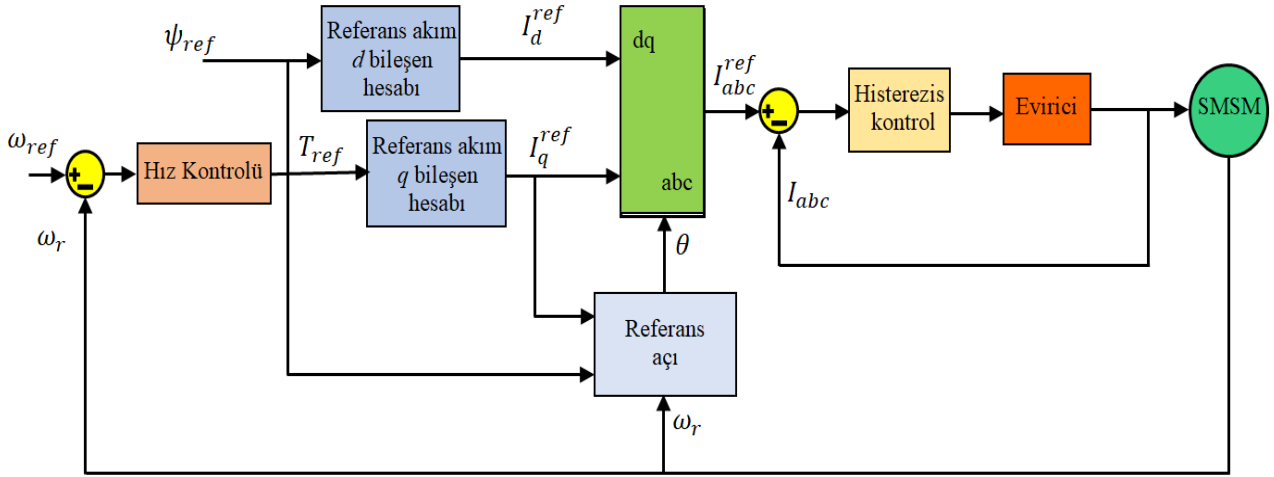
Geleneksel DMK modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu yöntemde SMSM'nin akımı ve gerilimi ölçülür. Ölçülen değerler kullanılarak motorun akı, moment ve akı sektörü hesaplanır. Tahmini ve referans akı arasındaki fark kullanılarak elde edilen akı hatası, iki seviyeli histerezis kontrolöründen geçirilir. Benzer şekilde, tahmini ve referans moment arasındaki fark kullanılarak elde edilen moment hatası, üç seviyeli histerezis kontrolöründen geçirilir. Histerezis kontrol birimlerinden elde edilen sinyaller ve tahmin edilen akı sektörü kullanılarak motorun eviricisine uygulamak üzere gerekli olan anahtarlama sinyalleri üretilir.

2.3. Alan yönlendirmeli kontrol

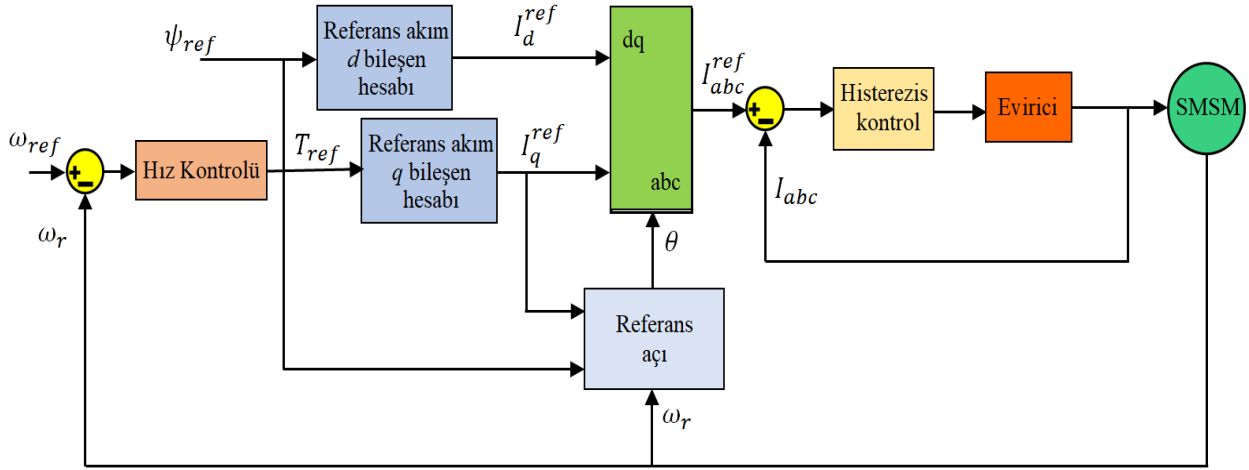
SMSM'nin kontrolü için en başarılı yöntemlerden biri AYK'dir. Şekil 2, geleneksel AYK'nin blok şemasını göstermektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi moment referansı, Oransal-Integral kontrolörü ve referans hız ile gerçek motor karşılaştırılarak elde edilen hız hatası kullanılarak hesaplanır. Referans akımının d bileşeni, referans akı ve moment kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca bu iki referans değeri kullanılarak referans akımının q bileşeni ve dönüşüm açısı hesaplanır. Üç fazlı referans akımları, referans akımların d ve q bileşeni ve Park dönüşümü kullanılarak hesaplanır. Park dönüşümü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

Stator sargılarında akan akımlar ile referans akımlar karşılaştırılır ve her faz için akım hata sinyalleri elde edilir. Anahtarlama sinyalleri, akım hata sinyali ve histerezis kontrolörü kullanılarak elde edilir. Sonuç olarak, anahtarlama sinyalleri eviriciye uygulanır ve SMSM istenen hız ve momentte çalıştırır [12].



Şekil 1. DMK blok şeması



Şekil 2. AYK blok şeması

2.4. Kayan kipli gözlemci

Kayan kip değişken yapılı bir sistemdir ve kullanıldığı yapının parametrelerine bağımlılığı oldukça azdır. Bu nedenle sistem içindeki belirsizlikler ve bozucu etkiler kayan kipli sistemin çalışmasını etkilemez. Alternatif akım motorları çalıştığı zaman rotor zaman sabiti ve stator direnci gibi parametreler zamanla değişir. Kayan kip yapısı, motor kontrolü sırasında bu değişikliklerin olumsuz etkilerinden kaçınmak ve daha dayanıklı kontrol için çok uygundur.

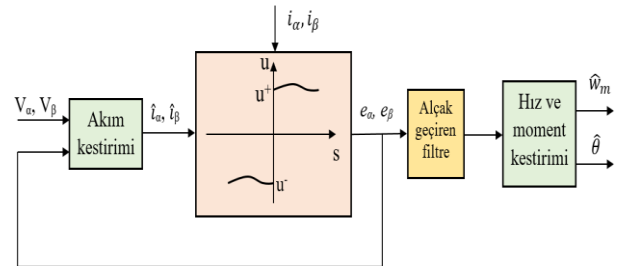
Kayan kip, değişken yapılı sistemler için kullanılan alternatif bir yoldur. Değişken yapılı bir sistem aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Burada durum değişken matrisi, \dot{x} ise x 'in türevi anlamına gelir.

$$\dot{x} = f(x, t, u), x \in R^n, u \in R^m \quad (10)$$

$$u = \begin{cases} u^+(x, t) & \sigma(x) > 0 \\ u^-(x, t) & \sigma(x) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma^T = (\sigma_1, \dots, \sigma_m) \quad (10)$$

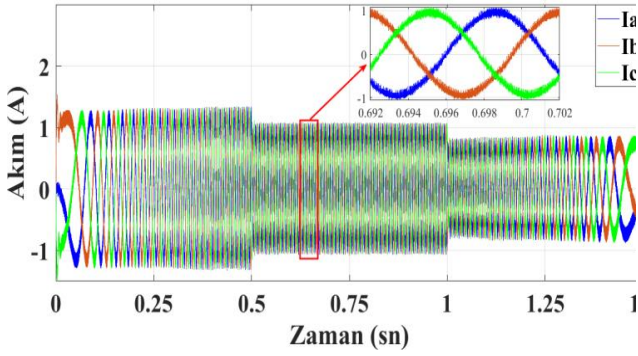
Bu sistem için durum uzayında $\sigma = 0$ için süreksiz kontrol girişi, kayan yüzeyler oluşturur. KKG kullanılarak hız kestirimi, Şekil 3 ve yukarıda verilen (8), (9) ve (10) eşitlikleri kullanılarak yapılabilir.



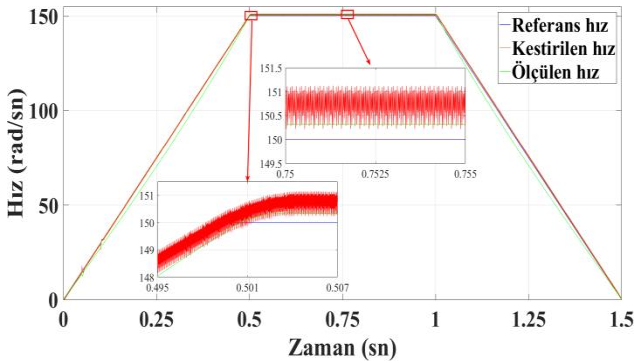
Şekil 3. KKG blok şeması

3. Simülasyon sonuçları

Bu çalışmada parametreleri Tablo 1'de verilen SMSM'nin KKG ile sensörsüz DMK ve AYK kontrolünün simülasyonu gerçekleştirilmiştir. SMSM'nin AYK kontrol uygulaması sonucu elde edilen üç faz stator akımı grafiği Şekil 4, hız grafiği ise Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 4. AYK için stator akımı

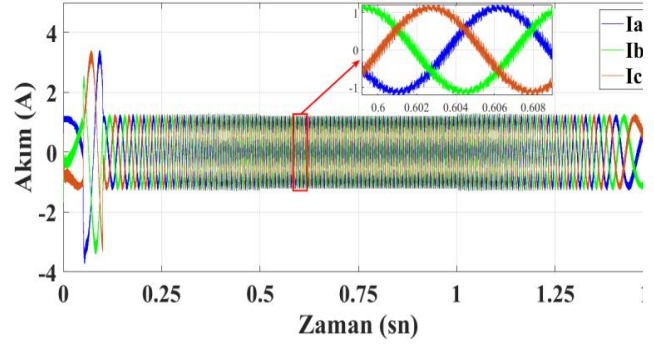


Şekil 5. AYK için motor hızı

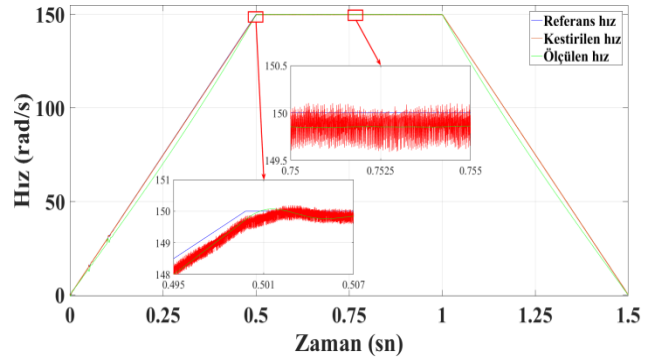
SMSM'nin DMK kontrol uygulaması sonucu elde edilen üç faz stator akımı grafiği Şekil 6, hız grafiği ise Şekil 7'de görülmektedir. Her iki kontrol yöntemi sonucu elde edilen moment grafiği ise Şekil 8'de görülmektedir. AYK ve DMK uygulaması sonucu elde edilen akım, hız ve moment sinyallerinin toplam harmonik bozunum (THB) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca AYK ve DMK yöntemlerinin hız kontrol performansını değerlendirebilmek için referans hız ile ölçülen motor hızı arasındaki hız hata sinyali için hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK) kriteri uygulanmış ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Son olarak iki kontrol yönteminin geçici durumu (ilk sürekli duruma oturma süreci) ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) ile incelenmiş ve akım, moment ve hız sinyallerinin standart sapması hesaplanmıştır. ADD, bir işaretin zaman-frekans analizi için kullanılan bir dönüşüm türüdür. Sinyallerin birbirleri ile karşılaştırılmasında ADD dönüşümünden elde edilen dalgacıklar kullanılmaktadır. Her iki kontrol yöntemi için hız sinyali ADD analizi Şekil 9'da görülmektedir. Tüm sinyallerin ADD analizi sonucu elde edilen standart sapma değerleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

SMSM'nin AYK ve DMK simülasyon sonucu elde edilen akım grafikleri (Şekil 4 ve Şekil 6) incelendiği zaman AYK kontrolü sonucu akımdaki dalgalanmanın daha az olduğu görülmektedir. Aynı zamanda hem sürekli duruma geçiş, hem de sürekli durum süreci incelendiği zaman, referans hızı takip etme DMK yöntemi ile daha başarılıdır. Benzer şekilde Tablo 2'de verilen I_a , I_b ve I_c faz akımlarının THB değerleri incelendiği zaman AYK kontrolünün daha düşük THB değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca indüklenen moment (T_e) ve motor hızı (ω) için AYK kontrolünün THB

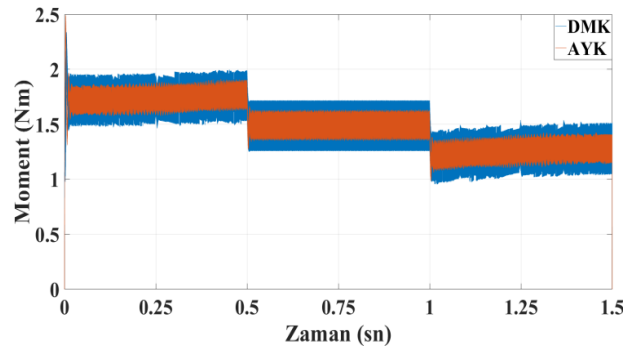
değerleri daha düşüktür. Ancak AYK ve DMK kontrolü sonucu elde edilen hız grafikleri (Şekil 5 ve Şekil 7) ve Tablo 3'te verilen HKOK değerleri incelendiği zaman DMK'nın daha az hata ile çalıştığı görülmektedir. ADD analizi sonuçları incelendiği zaman geçici durumlarda DMK kontrolü sonucu daha az standart sapma olduğu görülmüştür. DMK yöntemi AYK yöntemine göre geçiş durumlarında daha hızlı ve daha az hata ile tepki gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6. DMK için stator akımı



Şekil 7. DMK için motor hızı



Şekil 8. AYK ve DMK için moment

Tablo 2. THB değerleri

	I_a	I_b	I_c	T_e	ω
AYK	38.395	38.046	38.9287	7.132	10.6955
DMK	70.5011	72.1492	69.9132	7.223	10.8937

Tablo 3. Referans hız ile ölçülen hız farkı için HKOK değerleri

	HKOK
AYK	2.8627
DMK	2.6171

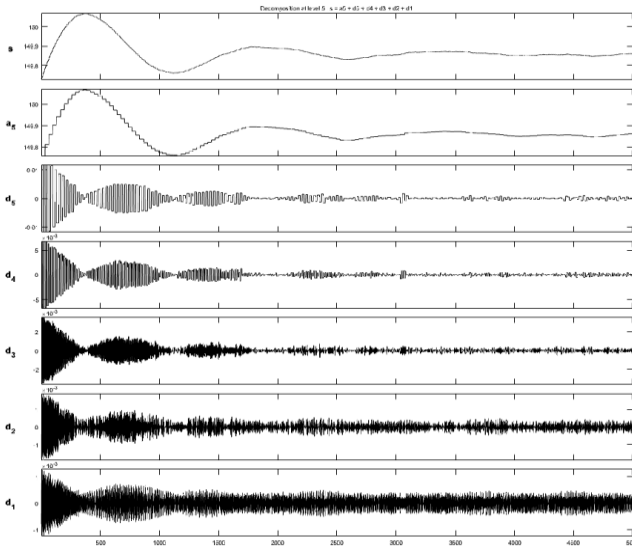
Tablo 4. ADD standart sapma değerleri

	Ia	Ib	Ic	Te	ω
AYK	3.478	5.063	4.556	3.362	2.3
DMK	3.633	4.978	4.138	3.383	2.08

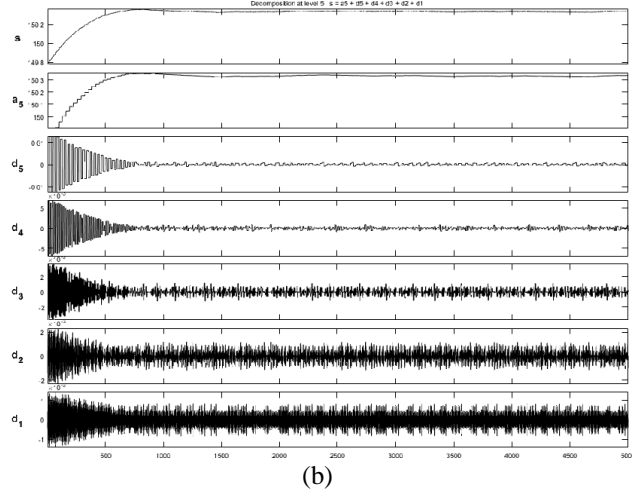
4. Değerlendirme

Bu çalışmada SMSM'nin hız sensörsüz olarak AYK ve DMK kontrolü simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Kontrol yöntemlerinde gerekli olan hız bilgisi ise KKG ile kestirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen akım, moment ve hız grafikleri incelendiği zaman, AYK uygulanması sonucunda bu grafiklerin daha az dalgalanmaya sahip olduğu görülmektedir. Örneğin moment grafiğindeki dalgalanma AYT için 0.2 Nm iken DMK için 0.3 Nm'dir. Ancak DMK uygulanması durumunda hız hatasının daha düşük olduğu görülmüştür. Sürekli durumda hız hatası AYK için 0.3 rad/s iken DMK için 0.2 rad/s'dir. Benzer durum ADD analizi sonucunda da görülmüştür. Hız, akım ve moment grafiklerinin standart sapması DMK için daha düşüktür.

İleriki çalışmalarda hem DMK hem de AYK'nin KKG ile sensörsüz çalışma performansı daha geniş hız aralığı için değerlendirilebilir. Ayrıca, diğer hız gözlemcileri kullanılarak SMSM'nin sensörsüz çalışması durumunda hem DMK'nin hem de AKY'nin ayrıntılı karşılaştırması yapılabilir.



(a)



(b)

Şekil 9. Motor hızı ADD analizi (a) AYK (b) DMK

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

- [1] Saadaoui, O., A. Khlaief, A. Chaari and M. Boussak. A new approach rotor speed estimation for PMSM based on sliding mode observer. in 2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2014.
- [2] L. Harnfors, S.E. Saarakkala, and M. Hinkkanen, Speed control of electrical drives using classical control methods. IEEE Transactions on Industry Applications, 49 (2), 889-898, 2013. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2914647>.
- [3] D.-W. Seo, Y. Bak, and K.-B. Lee, An improved rotating restart method for a sensorless permanent magnet synchronous motor drive system using repetitive zero voltage vectors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67 (5), 3496-3504, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2914647>.
- [4] M. Abassi, A. Khlaief, O. Saadaoui, A. Chaari and M. Boussak. Performance analysis of FOC and DTC for PMSM drives using SVPWM technique. in 2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). 2015.
- [5] A. Kronberg, Design and simulation of field oriented control and direct torque control for a permanent magnet synchronous motor with positive saliency. Master Thesis, Uppsala University, 2012.
- [6] G. Chandaka and G. Prasanth, Direct torque control and field oriented control of PMSM using SVPWM Technique. Int. J. Adv. Res. Sci. Eng, 3 (11), 2014.
- [7] Z. Boulghasoul, A. Elbacha, E. Elwarraki and D. Yousfi. Combined vector control and direct torque control an experimental review and evaluation. in 2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems. 2011.

- [8] F. Blaschke A new method for the structural decoupling of AC induction machines. in Conf. Rec. IFAC. 1971.
- [9] D. Casadei, et al., FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control. IEEE transactions on Power Electronics, 17 (5), 779-787, 2002. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.802183..>
- [10] S. Rezgui, A. Mehdi, S. Legrioui, H. Meddouce, A.M. Boulahia and H. Benalla. IRFOC vs DTC performance comparison analysis. in 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. 2013.
- [11] S. Zaid, O. Mahgoub, and K. El-Metwally, Implementation of a new fast direct torque control algorithm for induction motor drives. IET Electric Power Applications, 4 (5), 305-313, 2010. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2009.0059>.
- [12] I. Takahashi and T. Noguchi, A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. IEEE Transactions on Industry applications, (5), 820-827, 1986. <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504799>.
- [13] Z. Zhang, R. Tang, B. Bai and D. Xie, Novel direct torque control based on space vector modulation with adaptive stator flux observer for induction motors. IEEE transactions on Magnetics, 46 (8) 3133-3136, 2010. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2051142>.
- [14] G.S. Buja and M.P. Kazmierkowski, Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey. IEEE Transactions on industrial electronics, 51 (4), 744-757, 2004. <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.831717>.
- [15] Y. S. Lai and J.-H. Chen, A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction. IEEE Transactions on Energy Conversion, 16 (3), 220-227, 2001. <https://doi.org/10.1109/60.937200>.
- [16] K. -K. Shyu, J. -K. Lin, V. -T. Pham, M. -J. Yang and T. -W. Wang, Global minimum torque ripple design for direct torque control of induction motor drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57 (9) 3148-3156, 2009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2038401>.
- [17] Y. Li, Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Machine 2010, Universitat München.
- [18] L. Yaohua, D. Gerling, and L. Weigu. A novel switching table to suppress unreasonable torque ripple for the PMSM DTC drives. in 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. 2008.
- [19] A. Khlaief, et al. Field-oriented control of interior permanent magnet synchronous motor with a space vector modulation. in Conference international STA'2008. 2008.
- [20] B. ÇAVUŞ and M. Aktaş, Direct torque control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 9 (2), 58-65, 2020. <https://doi.org/10.18245/ijaet.633252>
- [21] M. Aktaş and B. Çavuş, A computer-aided educational tool for vector control of AC motors in graduate courses. Computer Applications in Engineering Education, 28 (3), 705-723, 2020. <https://doi.org/10.1002/cae.22241>.
- [22] G. Shahgholian, M. H. Rezaei, A. Etesami and M. R. Yousefi. Simulation of speed sensor less control of PMSM based on DTC method with MRAS. Conference Proceedings IPEC. 2010.
- [23] L. Yongdong and Z. Hao. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor—a survey. in 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008.
- [24] V. Dutt and R. Dhiman, Comparative study of direct torque control of induction motor using intelligent techniques. Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, 2 (11), 550-556, 2011.
- [25] M. S. Basar, M. M. Bech, T. O. Andersen, P. Scavenius and T. T.-Basar. Comparison of sensorless FOC and SVM-DTFC of PMSM for low-speed applications. in 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2013.
- [26] M.C. Paicu, I. Boldea, G.-D. Andreescu and F. Blaabjerg, Very low speed performance of active flux based sensorless control: interior permanent magnet synchronous motor vector control versus direct torque and flux control. IET electric power applications, 3 (6), 551-561, 2009. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2008.0290>.
- [27] D. Xiao, S. Nalakath, S. R. Filho, G. Fang, A. Dong, Y. Sun, J. Wiseman, and A. Emadi, Universal full-speed sensorless control scheme for interior permanent magnet synchronous motors. IEEE Transactions on Power Electronics, 36 (4), 4723-4737, 2020. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3023140>.
- [28] S. Ye, Fuzzy sliding mode observer with dual SOGI-FLL in sensorless control of PMSM drives. Isa Transactions, 85, 161-176, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.10.004>.
- [29] M. Ghanes and G. Zheng, On sensorless induction motor drives: Sliding-mode observer and output feedback controller. IEEE transactions on industrial electronics, 56 (9), 3404-3413, 2009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2026387>.
- [30] Y. Yue, et al. Direct torque control method of PMSM based on fractional order PID controller. in 2017 6th Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS). 2017.
- [31] D. Y. Ohm, J.W. Brown, and V.B. Chava. Modeling and parameter characterization of permanent magnet synchronous motors. in Proceeding of the 24th Annual Symposium of Incremental Motion Control Systems and Devices, San Jose. 1995.





Aralık değerli tip-2 bulanık denetleyici ile negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin denetimi

Control of negative voltage output elementary series Luo converter via interval type-2 fuzzy controller

Ahmet Gani^{1,*} 

¹ Kayseri Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye.

Öz

Bu çalışmada, sürekli iletim modunda çalışan negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin gerilim mod denetimi için aralık değerli tip-2 Takagi-Sugeno-Kang (TSK) bulanık denetleyici önerilmiştir. Önerilen denetleyici ile negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin dinamik cevabının farklı denetim senaryoları ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin devre modeli analiz edilmiş ve sürekli iletim modunda çalışma için devre eleman sınır değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra önerilen denetim yapısının dinamik performansı referans gerilim değişimi, giriş gerilimi değişimi ve yük değişimi gibi bozulmalara karşı Matlab/Simulink benzetim ortamında tip-1 TSK bulanık denetleyici ile karşılaştırılabilir olarak incelenmiştir. Benzetim çalışmasından elde edilen karşılaştırmalı denetim başarımları değerlendirildiğinde bütün denetim durumları için yerleşim zamanları bakımından önerilen denetleyicinin tip-1 TSK bulanık denetleyiciye kıyasla daha iyi iyileştirme değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çevirici, Aralık değerli tip-2 TSK bulanık denetim, Tip-1 TSK bulanık denetim

1 Giriş

Negatif gerilim çıkışlı Luo çeviriciler gerilim dönüşüm oranını sınırlayan parazitik etkilerin üstesinden gelerek pozitif doğru akım (DA) giriş geriliminden negatif doğru akım (DA) çıkış gerilimine az gerilim dalgalanmalı ters çıkış gerilimi sağlamaktadırlar [1]. Negatif gerilim çıkışlı Luo çeviricilerin doğrusal olmayan yapılarından ötürü bu çevirici yapılarının denetiminde klasik oransal-integral (PI), oransal-türevsel (PD) ve oransal-integral-türevsel (PID) denetleyiciler arzu edilen başarımları sağlayamamaktadır. Bu durumdan dolayı bulanık mantık gibi akıllı denetleyici yapıları geliştirilmektedir [2]. Bulanık mantık uzman kişinin kestirimlerini referans alan doğrusal olmayan ve birçok sistemde kullanılan bir denetim yapısıdır [3]. Bulanık mantık denetim sistemleri tip-1 ve tip-2 olmak üzere iki ayrı denetim yapısı olarak incelenmektedir. Tip-1 bulanık denetim sistemi tasarımında uzman kişi bulanık denetim sistemlerinin en önemli tasarım özelliklerinden biri olan üyelik fonksiyonlarının keskin değerlerini belirleme ve dilsel

Abstract

The present study proposes an interval type-2 Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy controller for voltage mode control of an elementary series Luo converter with negative output voltage and operating at continuous conduction mode. Under different controlling scenarios, the proposed controller aims to improve dynamic response of elementary series Luo converter with negative voltage output. To this end, the circuit model of elementary series Luo converter with negative voltage output was analyzed, and circuit element boundary values were calculated for continuous conduction mode. The dynamic performance of the proposed controlling structure was later analyzed using type-1 TSK fuzzy controller against various disturbances such as changing reference and input voltage and load in Matlab/Simulink environment. When the comparative control performance values obtained from the simulation study are examined, it was observed that the proposed controller has better improvement values compared to the type-1 TSK fuzzy controller in terms of settling times for all control situations.

Keywords: Negative voltage output elementary Luo converter, Interval type-2 fuzzy controller, Type-1 TSK fuzzy controller

değişkenlerin seçimi gibi bazı kritik seçimler yapmak zorundadır [4-6]. Tip-1 bulanık denetim sistemlerindeki bu problemler, denetleyicinin çalışma koşullarında değişikliklere yol açmakta ve belirsiz durumlar oluşmaktadır. Tip-2 bulanık denetim ile belirsizlikler etkin bir şekilde modellenerek sistemin çalışma noktasında daha kararlı bir sistem cevabı elde edilmektedir [7-9].

Araştırma literatüründe negatif gerilim çıkışlı Luo çeviricilerin modellenmesi ve denetimi için bazı çalışmalar yapılmıştır [1,10-19,22]. Bu çalışmada ise önceki çalışmalardan farklı olarak negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin Matlab/Simulink ortamında benzetim modeli oluşturulmuştur. Çeviricinin gerilim mod denetimi referans gerilimi, giriş gerilimi ve yük direnci gibi zamanla değişen bozucu sistemsel parametrelere karşı tip-2 bulanık denetleyicinin özel bir hali olan aralık değerli tip-2 bulanık denetleyici ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın araştırma literatürüne katkılarından bahsedilecek olursa; negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahmetgani@kayseri.edu.tr (A. Gani)

Geliş / Received: 18.07.2022 Kabul / Accepted: 22.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1144875

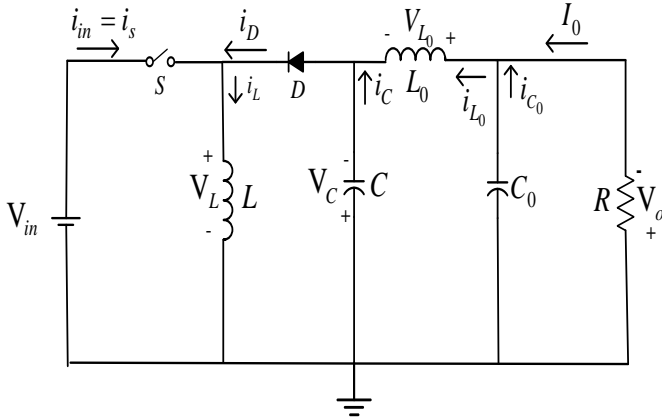
çeviricinin gerilim mod denetimi için bulanık mantık esaslı denetim yöntemlerinin başarımlarının incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum çalışmanın özgünlüğünü yansıtmaktadır.

Çalışmanın takip eden bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: ikinci bölümde negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çevirici modeli ve önerilen aralık değerli tip-2 bulanık denetim yapısı materyal ve metot kısmında, detaylı benzetim çalışmaları bulgular ve tartışma kısmında, çalışmadan elde edilen temel çıkarımlar ise sonuçlar kısmında verilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Negatif gerilim çıkışlı temel seri luo çevirici

Luo çeviriciler, DA/DA çeviricilerin yeni serisi olan gerilim yükseltici çeviricilerdir. Luo çeviriciler gerilim yükseltme yönteminden faydalanılarak geliştirilmiştir. Bu çeviricilerin klasik çeviricilerden temel farkı yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik ve düşük salınımlı yüksek çıkış gerilimidir [20]. Yüksek kazançlı Luo çeviriciler için aritmetik ve geometrik olmak üzere iki tür gerilim yükseltme yöntemi vardır. Çıkış geriliminin aritmetik şekilde yükseltilmesi gerilim yükseltmeli Luo çeviriciler için mümkün olmaktadır [21]. Gerilim yükseltmeli çeviriciler iki alt seriden oluşmaktadır. Birincisi temel seri, diğeri de ek seri olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan çevirici temel seriden oluşan negatif çıkışlı gerilim yükseltmeli Luo çeviricidir. Temel seri bir anahtar S ; 2 adet indüktör L ve L_o ; 2 adet kapasitör C , C_o ; 1 adet diyot ve yük direncinden (R) oluşmaktadır. Temel seri devre Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Temel Seri Devre

Negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin çalışması pozitif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviriciye benzemektedir. Devre yapısı incelenecek olursa pozitif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviriciye göre diyotların yeri değiştirilerek devreden geçen akımın yönü değiştirilmektedir. Şekil 1’deki temel seri devrede S anahtarı kapalı durumda iken kaynak akımı $i_{in} = i_s$ olur. İndüktör (L), kaynaktan enerji çeker ve i_L akımı doğrusal olarak artar. Aynı zamanda, D diyotu ters yönlü olduğu için bloke olur. L_o indüktörü, I_o çıkış akımını sürekli tutar ve enerjiyi C kondansatöründen R yük direncine aktarır. S anahtarı açık

durumda iken, i_L akımı C kondansatörünü şarj etmek için D diyotu üzerinden akar ve i_{L_o} akımı artırır. L indüktörü, depolanan enerjisini C kapasitörüne aktarır ve R yük direncini indüktör L_o aracılığıyla yükler [22-23]. Çeviricinin sürekli iletim modu için gerilim kazancı,

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{D}{1-D} \quad (1)$$

olur. L indüktöründen geçen akımın değişim oranı ve C kapasitörü üzerindeki gerilimin değişim oranı sırasıyla Denklem 2 ve 3’teki gibi hesaplanır.

$$\xi = \frac{\Delta i_L}{i_L} = \frac{D(1-D)R}{MfL} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\Delta V_C}{V_C} = \frac{D}{fRC} \quad (3)$$

Benzer şekilde L_o indüktöründen akan akımın değişim oranı ve C_o kapasitörü üzerindeki gerilimin değişim oranı sırasıyla Denklem 4 ve 5’teki gibi hesaplanabilir.

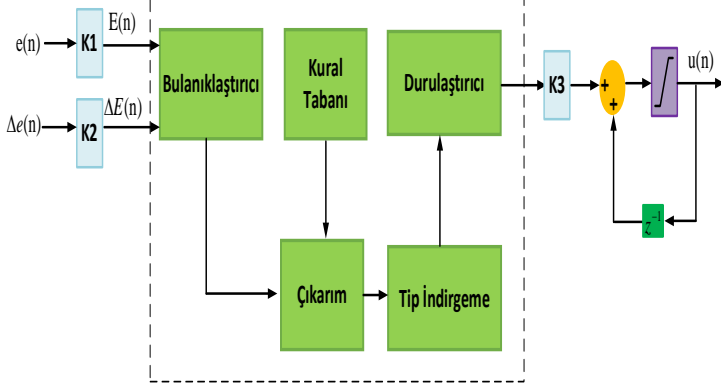
$$\xi_o = \frac{\Delta i_{L_o}}{i_{L_o}} = \frac{D}{8f^2 L_o C} \quad (4)$$

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta V_{C_o}}{V_{C_o}} = \frac{D}{64f^3 L_o C C_o R} \quad (5)$$

2.2 Önerilen aralık değerli tip-2 bulanık denetleyici

Doğrusal olmayan negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin referans gerilim değişimi, giriş gerilimi değişimi ve yük değişimi gibi bozulmalara karşı dayanıklı ve kararlı bir dinamik performans göstermesi çok önemlidir. Bu nedenle çeviricinin doğrusal olmayan devre topolojisine uygun bir denetleyiciye ihtiyaç vardır [24]. Bulanık küme topolojisinin mimarı Lotfi Zadehtir. Tip-2 bulanık kümeler dilsel değişkenlerdeki belirsizliklerden doğan durumların modellenmesinde tip-1 bulanık kümelerle göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Belirsizliklerin etkilerinin yok edilmesi için tip-2 bulanık kümeler etkili bir yöntem olarak sunulmuş ve birçok denetim sisteminde sıklıkla kullanılmaktadır. Tip-2 bulanık denetleyicilerin hesaplama yükü daha az olan aralıklı tip-2 bulanık denetim yapısı bulunmaktadır. Bu denetim yapısının çıkarım alt biriminde doğrusal bir fonksiyon ile ifade edilebilen Takagi-Sugeno-Kang (TSK) çıkarım yöntemi kullanılmaktadır [25]. Bu çalışmada aralık değerli tip-2 TSK bulanık denetim yapısı önerilmiştir. Şekil 2’de önerilen denetim yapısı, bulanıklaştırma birimi, kural tabanı, çıkarım birimi, tip indirgeme ve durulaştırıcı alt birimlerinden oluşmaktadır. Önerilen denetleyicinin girişleri hata $e(n)$ ve hata değişimi $\Delta e(n)$ olarak belirlenmiştir. Bu girişler K_1 ve K_2 ve K_3

kazançları ile ölçeklendirilme yapılarak bulanıklaştırıcı bloğuna uygulanmaktadır.



Şekil 2. Aralık değerli Tip-2 TSK bulanık denetleyicinin temel blok şeması

$$E(n) = K_1 \quad (6)$$

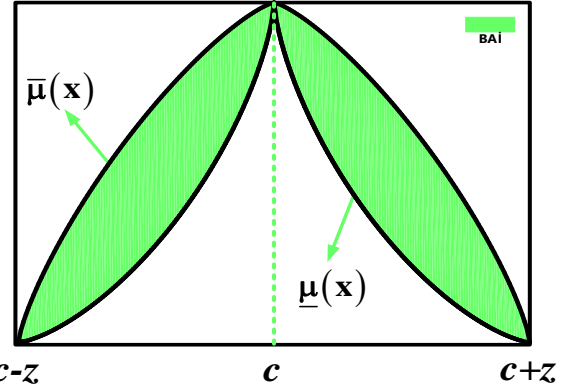
$$\Delta E(n) = K_2 [e(n) - e(n-1)] \quad (7)$$

Bulanık girişler çıkarım mekanizması ve kural tabanının birlikte kullanılmasıyla tip-2 bulanık çıkışların eldesini sağlamaktadır. Tip-2 bulanık mantık sisteminde tip-1 bulanık mantık sistemine ek olarak tip indirgeyici bulunmaktadır. Tip-2 bulanık kümeler tip indirgeyici yardımıyla tip-1 bulanık kümelere dönüştürülmektedir. Tip indirgeyici bloğunun çıkışı tip-1 bulanık kümedir. Elde edilen tüm tip-1 bulanık kümeler durulaştırıcı alt birimi ile kesin çıkışlara dönüştürülürler. Bu çalışmada her bir bulanık giriş için tip-2 elipsoidal üyelik fonksiyonu kullanılmış ve Denklem 8 ve 9 ile ifade edilmiştir.

$$\bar{\mu}(x) = \begin{cases} \left(1 - \left|\frac{x-c}{z}\right|^{a_1}\right)^{\frac{1}{a_1}} & \text{if } c-z < x < c+z \\ 0 & \text{ise} \end{cases} \quad (8)$$

$$\underline{\mu}(x) = \begin{cases} \left(1 - \left|\frac{x-c}{z}\right|^{a_2}\right)^{\frac{1}{a_2}} & \text{if } c-z < x < c+z \\ 0 & \text{ise} \end{cases} \quad (9)$$

Burada, x elipsoidal üyelik fonksiyonu giriş değişkenidir. c ve z ise sırasıyla elipsoidal üyelik fonksiyonunun merkezini ve genişliğini temsil eder. a₁ ve a₂ parametreleri, elipsoidal üyelik fonksiyonundaki belirsizliğin genişliğini belirler [26]. Şekil 3'te bu çalışmada kullanılan elipsoidal üyelik fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 3. Elipsoidal üyelik fonksiyonu

Şekil 3'te belirsizliğin ayak izi (BAİ) ve ona ait elipsoidal alt ve üst üyelik fonksiyonları verilmiştir. Elipsoidal alt üyelik fonksiyonu (AÜF) ile üst üyelik fonksiyonu (ÜÜF) arasında kalan bölge BAİ olarak adlandırılmaktadır. BAİ, elipsoidal AÜF ve ÜÜF bir aralık değerli tip-2 bulanık kümeyi oluşturmaktadır [27]. Aralık değerli Tip-2 TSK bulanık denetleyicinin kural tabanı;

$$K^i : \text{Eğer } E(n) \tilde{A}_1^i \text{ ve } \Delta E(n) \tilde{A}_2^i \text{ ise,} \quad (10)$$

$$\text{O halde } u_n = a_1^i E(n) + a_2^i \Delta E(n)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, i (i=1,...,25) kural sayısını ifade etmektedir. a₁ⁱ ve a₂ⁱ ise soncul parametrelerdir. i. kural için hesaplanan elipsoidal AÜF ve ÜÜF kural çıkarımları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\bar{f}^i = \bar{\mu}_{\tilde{A}_1^i}(E(n)) * \bar{\mu}_{\tilde{A}_2^i}(\Delta E(n)) \quad (11)$$

$$\underline{f}^i = \underline{\mu}_{\tilde{A}_1^i}(E(n)) * \underline{\mu}_{\tilde{A}_2^i}(\Delta E(n)) \quad (12)$$

Burada *, t-norm operatörünü temsil eder. $\bar{\mu}_{\tilde{A}_1^i}$ ve $\underline{\mu}_{\tilde{A}_1^i}$ i. kuralın elipsoidal AÜF ve ÜÜF ifade etmektedir. Normalizasyon işlemi ise Denklem 13 ve 14 ile yapılmaktadır.

$$\bar{F}^i = \frac{\bar{f}^i}{\sum \bar{f}^i} \quad (13)$$

$$\underline{F}^i = \frac{\underline{f}^i}{\sum \underline{f}^i} \quad (14)$$

Tip indirgeme ve durulaştırmada daha az hesaplama yükü gerektirdiği için Biglarbegian-Melek-Mendel [28] yöntemi kullanılmıştır.

$$u_L(n) = \frac{\sum_i^M \bar{F}^i u_i(n)}{\sum_i^M \bar{F}^i} \quad (15)$$

$$u_R(n) = \frac{\sum_i^M \underline{F}^i u_i(n)}{\sum_i^M \underline{F}^i} \quad (16)$$

$$u(n) = qu_L(n) + (1-q)u_R(n) \quad (17)$$

Burada, q kullanıcının isteğine bağlı ayarlanabilen bir parametredir. Bu çalışmada en uygun sistem cevabını verdiği için 0.6 değeri tercih edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Negatif gerilim yükseltmeli temel seri Luo çevirici devresinin gerilim mod denetimini gerçekleştirebilmek için, anahtarlama frekansının, devrede kullanılan elemanların sınır değerlerinin ve devrenin giriş-çıkış gerilim değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

3.1 Benzetim çalışmaları

Benzetim çalışmaları için kullanılacak olan negatif gerilim yükseltmeli temel seri Luo çeviriciye ait devrenin; yük değeri, giriş-çıkış gerilimi ve anahtarlama frekansı değerleri **Tablo 1**'de belirtilmiştir.

Tablo 1'den görüldüğü üzere indüktörlerin alabileceği sınır değerler **Denklem 2-4**'ten yararlanılarak sırasıyla 1.7mH ve 10mH olarak hesaplanmıştır. Kapasitörlerin alabileceği sınır değerler **Denklem 3-5**'ten yararlanılarak sırasıyla 25 μ F ve 20.16 μ F olarak hesaplanmıştır. Çalışmada indüktörlerden akan akımların ve çıkış akımının sürekli olmasını sağlamak için indüktör değerleri sınır değerlerinden yeterince yüksek seçilmiştir. Yük üzerindeki gerilim dalgalanmasının düşük olması ve kapasitörler üzerindeki gerilimlerin sürekli olması için, devredeki kapasitör değerleri sınır değerlerinden yeterince yüksek seçilmiştir. Önerilen denetleyici yapısı ile negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin blok diyagramı **Şekil 4**'te verilmiştir.

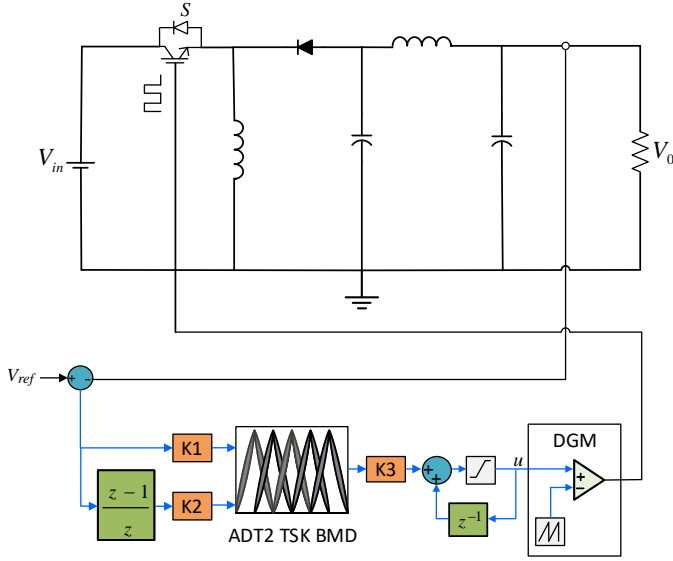
Şekil 4'ten görüldüğü gibi giriş ve çıkış değişkenlerini ölçeklendirmek için kazanç katsayıları (K_1 , K_2 , K_3) kullanılmıştır. Böylece önerilen denetleyici için üyelik fonksiyonlarının hangi aralıkta olacağı daha kolay bir şekilde ayarlanabilmektedir. V_{ref} negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çevirici çıkışının getirilmek istenen referans gerilim değeridir. V_0 ise çeviricinin çıkış gerilimidir. u ise önerilen denetleyicinin denetim işareti olup aynı zamanda da çeviricinin anahtarlama oranıdır. u denetim işareti darbe genişlik modülasyonu (DGM) bloğu aracılığıyla anahtarlama elemanına uygulanmaktadır. Ayrıca K_3 kazanç bloğundan sonra denetleyici yapısının çıkışına anti-wind-up integratör bloğu bağlanarak kalıcı durum hatasının önlenmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda önerilen denetim yapısında elipsoidal üyelik fonksiyonları kullanılmış olup hata (e) ve hata değişimi (de) için üyelik fonksiyonları [-1,+1] değer aralığında seçilmiştir. Benzetim çalışmalarında

ilk olarak önerilen denetleyicinin ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin basamak fonksiyonu şeklinde verilen referans gerilimi takip edebilme başarımı incelenmiştir. Basamak fonksiyonu şeklindeki referans gerilim değeri $t=1.5s$ anında (-36V)'dan (-24V)'a düşürülmüştür. Değişen referans gerilim değişimi için önerilen denetleyici ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin cevapları **Şekil 5**'te verilmiştir.

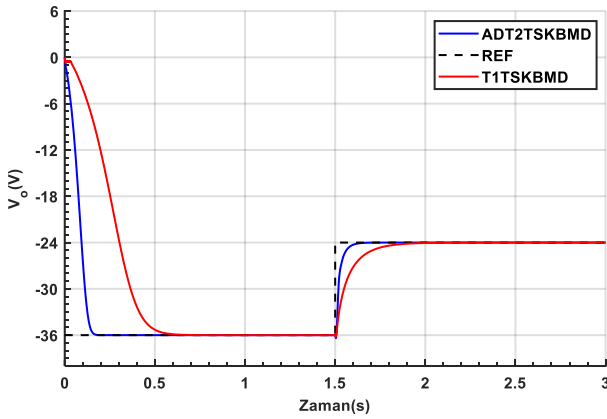
Tablo 1. Benzetim çalışması için belirlenen ve hesaplanan değerler

Belirlenen değerler		
Giriş Gerilimi	V_{in}	12V
Yük Direnci	R	20 Ω
Yük Gerilimi	V_0	36V
Anahtarlama Frekansı	f	50Khz
L indüktöründen akan akımın değişim oranı	ξ	0.0064
L_0 indüktöründen akan akımın değişim oranı	ξ_0	0.00015
C kapasitörünün üzerindeki gerilimin değişim oranı	ρ	0.03
C_0 kapasitörünün üzerindeki gerilimin değişim oranı	ε	0.00000093
Hesaplanan Sınır Değerler		
İndüktör	L_K	1.7mH
İndüktör	L_{0K}	10mH
Kapasitör	C_K	25 μ F
Kapasitör	C_{0K}	20.16 μ F
Seçilen Değerler		
İndüktör	L	5mH
İndüktör	L_0	15mH
Kapasitör	C	47 μ F
Kapasitör	C_0	100 μ F

Şekil 5'te görüldüğü gibi önerilen denetleyici (0V) \rightarrow (-36V) basamak referans gerilim değişiminde 0.16s sonra referans gerilim değerine ulaşırken, tip-1 TSK bulanık denetleyici 0.58s sonra referans gerilim değerine ulaşmıştır. (-36V) \rightarrow (-24V) basamak referans gerilim geçişinde ise önerilen denetleyici 1.65s sonra referans gerilimi yakalarken tip-1 TSK bulanık denetleyici 1.95s sonra referans gerilimi yakalamıştır. Önerilen denetleyici ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin basamak geçişlerindeki yerleşme zamanları **Tablo 2**'de verilmiştir.



Şekil 4. Önerilen denetleyici yapısı ile negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin blok diyagramı



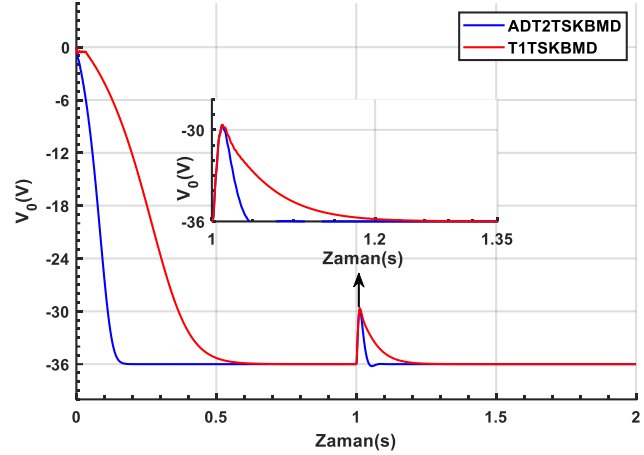
Şekil 5. Değişen referans gerilim değişikliği için önerilen denetleyici ve tip-1 TSK bulanık denetleyici cevapları

Tablo 2. Önerilen denetleyici ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin basamak geçişlerindeki yerleşme zamanları

(0V) → (-36V)		(-36V) → (-24V)	
ADT2TSKBMD	T1TSKBMD	ADT2TSKBMD	T1TSKBMD
0.16s	0.58s	1.65s	1.95s

Tablo 2’de denetleyicilerden elde edilen yerleşme zamanlarına ait bilgiler özetlenmiştir. Tablodan da görüleceği üzere önerilen denetleyici yapısı tip-1 TSK bulanık denetleyiciye karşı üstün denetim performansları vermiştir. İkinci olarak önerilen denetleyicinin ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin basamak şeklinde değişen giriş gerilimine karşı denetim performansları incelenmiştir. Bu amaçla basamak fonksiyonu şeklinde değişen giriş gerilimi $t=1s$ anında 12V değerinden 10V değerine düşürülmüştür. Basamak fonksiyonu şeklindeki giriş gerilim

değişimi için önerilen denetleyicinin ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin cevabı Şekil 6’da verilmiştir. Gerilim değişimlerini daha iyi analiz edebilmek için değişimin olduğu anda detaylı gösterim belirli aralıklar seçilerek yapılmıştır.



Şekil 6. Basamak fonksiyonu şeklindeki giriş gerilim değişikliği için önerilen denetleyicinin ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin cevabı

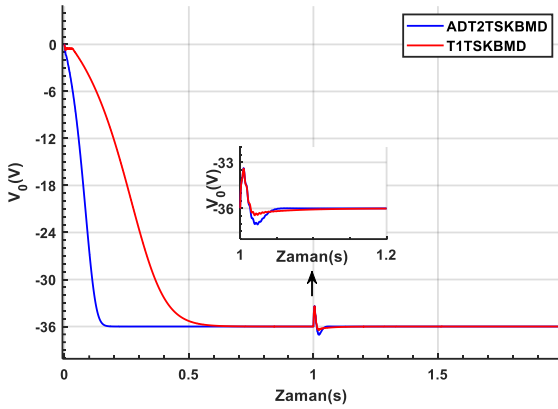
Şekil 6’da görüldüğü gibi giriş geriliminin $t=1s$ anında değiştirilmesiyle denetim sisteminde kısa süreli aşımalar meydana gelmiştir. Basamak fonksiyonu şeklinde değişen giriş gerilim değişikliği için denetleyicilerin yerleşim zamanı değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Basamak fonksiyonu şeklinde değişen giriş gerilim değişikliği için denetleyicilerin yerleşim zamanı değerleri

Parametre	ADT2TSKBMD	T1TSKBMD
Yerleşme Zamanı	0.045s	0.25s

Tablo 3’te görüldüğü önerilen denetleyicinin giriş gerilimi 10V değerine düşükten sonra tip-1 TSK bulanık denetleyiciye kıyasla daha kısa sürede referans gerilimi yakalayıp takip etmeyi başarmıştır. Son olarak sabit giriş geriliminde çalışan negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin yük değerinin değişiminde önerilen denetleyicinin ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin performansı incelenmiştir. Yük değeri $t=1s$ anında 20 Ω değerinden 18 Ω değerine düşürülerek %10 oranında yük değişikliği yapılmıştır. Önerilen denetleyicinin ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin yük değişikliği cevapları Şekil 7’de verilmiştir. Denetleyicilerin yük değişikliği cevaplarını detaylı gözleyebilmek için değişimin olduğu anda belirli aralıklar belirlenerek detaylı performans incelemesi yapılmıştır.

Şekil 7 incelendiğinde $t=1s$ anında %10 oranında yük değişikliği yapıldığında denetim sisteminde kısa süreli aşımalar oluşmuştur. Yük değişikliği için denetleyicilerin yerleşim zamanı değerleri Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 7. Önerilen denetleyicinin ve tip-1 TSK bulanık denetleyicinin yük değişimi cevapları

Tablo 4. Yük değişimi için denetleyicilerin yerleşim zamanı değerleri

Parametre	20Ω-18Ω	
	ADT2TSKBMD	T1TSKBMD
Yerleşme Zamanı	0.05s	0.15s

Tablo 4'te görüldüğü gibi önerilen denetleyici yük değişiminden sonra tip-1 TSK bulanık denetleyiciye kıyasla daha kısa sürede referans gerilimi yakalayıp takip etmeyi başarmıştır. Aynı zamanda bütün durumlar için önerilen denetleyicinin diğer denetleyicinin yerleşme zamanını ne kadar iyileştirdiği belirlenmiştir. Değişen referans gerilim değişimi için azalan basamak değişiminde önerilen denetleyici yerleşme zamanını %72.41 oranında iyileştirirken, artan basamak değişiminde %15.38 oranında iyileştirmiştir. Benzer şekilde basamak fonksiyonu şeklinde değişen giriş gerilim değişimi için önerilen denetleyici % 20.5 oranında iyileştirme sağlarken, yük değişimi için ise %10 oranında iyileştirme sağlamıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada sürekli iletim modunda çalışan negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çevirici tasarlanmış ve çeviricinin gerilim mod denetimi için aralık değerli tip-2 TSK bulanık denetleyici önerilmiştir. Aynı zamanda çeviriciden elde edilen dinamik cevapların tüm çalışma durumları için en optimum seviyede olması amaçlanmıştır. Bu amaçla önerilen denetleyicinin referans gerilim takibi ve bozucu girişlere (giriş gerilimi ve yük değişimi gibi) karşı dinamik performansı detaylı benzetim çalışmalarıyla tip-1 TSK bulanık denetleyici ile karşılaştırılarak iyileştirme oranları benzetim çalışmalarıyla detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Önerilen denetleyici bütün çalışma durumlarında tip-1 TSK bulanık denetleyiciye kıyasla daha hızlı ve kararlı bir dinamik performans sergilemiştir. Bu durum önerilen denetleyici yapısının negatif gerilim çıkışlı temel seri Luo çeviricinin gerilim mod denetim biriminde performans iyileştirilmesi için kullanılabileceğini doğrulamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

Kaynaklar

- [1] O. F. Kececioğlu, A. Gani, E. Kilic. Investigation on dynamic performance of type-2 neuro-fuzzy controller in control of negative output high gain Luo converter. 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress, pp. 462-466, Alanya, Turkey, 25-27 April 2019.
- [2] H. Açıkgöz, Ö. F. Kececioğlu. Aralıklı tip-2 bulanık mantık denetleyici tabanlı yükseltilen tip DA-DA çevirici yapısının denetimi ve deneysel analizi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 1061-1074. 2020. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.735757>.
- [3] A.Gani, H.R.Özçalık, H. Açıkgöz, Ö.F. Kececioğlu, E. Kılıç. Farklı kural tabanları kullanarak PI-bulanık mantık denetleyici ile doğru akım motorunun hız denetim performansının incelenmesi. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 2(1), 16-23.2014. <https://doi.org/10.5505/apjes.2014.92408>.
- [4] L. A. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. Information sciences, 8(3), 199-249.1975. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5).
- [5] O. F. Kececioğlu, A. Gani, M. Sekkeli, Design and hardware implementation based on hybrid structure for MPPT of PV system using an interval type-2 TSK fuzzy logic controller. Energies, 13(7), 1842. 2020. <https://doi.org/10.3390/en13071842>.
- [6] H. Acikgoz, O. F. Kececioğlu, A. Gani, M. Tekin, M. Sekkeli. Robust control of shunt active power filter using interval type-2 fuzzy logic controller for power quality improvement. Tehnički vjesnik, 24(2), 363-368.2017. <https://doi.org/10.17559/TV20161213004749>.
- [7] O.F.Kececioğlu, A.Gani, M. Sekkeli. Improved hybrid intelligent controller design for MPPT of stand-alone PV System. Turkish Journal of Engineering, 5(1), 20-28, 2021. <https://doi.org/10.31127/tuje.652229>.
- [8] O.F.Kececioğlu, A.Gani, E.Kilic. Dynamic performance comparison of PI and interval type-2 takagi-sugeno-kang fuzzy controller on positive output Luo converter. 2nd Cilicia International Symposium on Engineering and Technology, pp.35-39, Mersin, Turkey 10-12 October 2019.
- [9] O.F.Kececioğlu, A.Gani, E.Kilic. Robust control of boost converter using interval type-2 TSK fuzzy logic controller. 2nd Cilicia International Symposium on Engineering and Technology. pp.391-395, Mersin, Turkey, 10-12 October 2019.
- [10] B. Achiammal, R. Kayalvizhi. Genetic algorithm based PI controller for negative output elementary Luo converter. IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing

- Technologies, pp.1099-110, Ramanathapuram, India, 8-10 May 2014.
- [11] U. Chi-Wa, C. S. Lam, M. K. Law, S. W. Sin, M.C. Wong, U.Seng-Pan, R.P. Martins. CCM operation analysis and parameters design of negative output elementary Luo converter for ripple suppression. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4867-4871, Beijing, China, 29 October-01 November 2017.
- [12] D. S S, M. Selvan N B and U. Subramaniam. Power conditioning of standalone photo-voltaic system with BLDC motor by negative-output Luo Converter, International Conference on Power Electronics and Renewable Energy Applications (PEREA). pp. 1-6, Kannur, India, 27-28 November 2020.
- [13] V. Mahesh, S. Saravanan. Evolutionary algorithm tuned PID controller based nosllc-sc converter for PV application. International Journal of Control and Automation, 13(2), 105-115.2020.
- [14] H. J., Motlak, A.S. Rahi. Performance comparison of different control strategies for the regulation of DC-DC negative output super-lift Luo-converter. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 10(6), 5785-5792.2020. <http://doi.org/10.11591/ijece.v10i6.p5785-5792>
- [15] M. L., Devi, P., Abirami, M. R. F. Banu. Design and hardware implementation of self lift negative output Luo converter using MPPT for PV applications. International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems, pp.253-257, Chennai, India, 22-23 February 2018.
- [16] S.,Anandhi,V.Chamundeeswari. Implementation of photo voltaic based improved negative output self-lift Luo converter using particle swarm optimization.2nd International Conference on Science Technology Engineering and Management, 2016, pp.349-354.
- [17] S., Muthukaruppasamy, A. Abudhahir. Design and implementation of sliding mode controller plus fuzzy logic controller for discontinuous conduction mode operation of negative output elementary super lift Luo converter. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience,13(11),8505-8521.2016. <https://doi.org/10.1166/jctn.2016.6005>.
- [18] K. Ramash Kumar, S. Jeevananthan. Design and implementation of reduced-order sliding mode controller plus proportional double integral controller for negative output elementary super-lift Luo-converter. IET Power Electronics, 6(5), 974-989. 2013. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0602>.
- [19] K. Ramash Kumar, S. Jeevananthan. Modelling and implementation of fixed switching frequency sliding mode controller for negative output elementary super lift Luo-converter. IET Power Electronics, 5(8), 1593-1604.2012.<https://doi.org/10.1049/iet-pel.2011.0442>.
- [20] F. L Luo. Positive output Luo converters: voltage lift technique. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 146(4), 415-432, 1999.
- [21] F. L. Luo. Negative output Luo converters: Voltage lift technique. IEE Proceedings: Electric Power Applications.146(2),208-224,1999.
- [22] A. Cocor, A. Baescu, A. Florescu, D. A. Stoichescu. Elementary and self-lift negative output Luo dc-dc converters used in hybrid cars. UPB Sci. Bull., Series C, 77(4), 179-190, 2015.
- [23] O. F. Kececioğlu, A. Gani, H. Acikgoz. M.Sekkeli. Robust control of buck converter using PI-Fuzzy controller. International Congress on Engineering and Architecture, pp.1919-1928, Alanya/Turkey, 14-16 November 2018.
- [24] S. Bereketoğlu, H. Açıkgoz, M. Şekkeli. Fırçasız doğru akım motorunun aralıklı tip-2 bulanık mantık denetleyici tabanlı hız denetimi. EMO Bilimsel Dergi, 10(2), 31-40,2020.
- [25] A. Gani, Improving dynamic efficiency of photovoltaic generation systems using adaptive type 2 fuzzy-neural network via EN 50530 test procedure. International Journal of Circuit Theory and Applications, 49(11), 3922-3940,2021.<https://doi.org/10.1002/cta.3126>.
- [26] H. Acikgoz, M. Sekkeli. Improving control of SST using type-2 neuro-fuzzy controller with elliptic membership function. International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), 2019, pp.1-6.
- [27] J. M. Mendel. Advances in Type-2 Fuzzy Sets and Systems. Information Sciences,177(1), 84-110, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.05.003>.
- [28] M. Biglarbegian, W.W. Melek, J.M. Mendel, On the stability of interval type-2 TSK fuzzy logic control systems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,40, pp. 798-818, 2010. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2009.2029986>.





FRT capability enhancement of wind turbine based on DFIG using machine learning

Makine öğrenimi kullanarak ÇBAG'a dayalı rüzgâr türbininin FRT yeteneğinin iyileştirilmesi

Altan Gencer^{1,*} 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Electrical and Electronics Engineering Department, 50300, Nevşehir, Turkey

Abstract

The doubly fed induction generator (DFIG) is very sensitive to the high voltage and current harmful effects that occur during the grid fault. A capacitive bridge type fault current limiter (CBFCL) based on the support vector machine (SVM), which is one of the machine learning (ML) methods, is presented to improve the fault ride-through (FRT) performance of in three phase-to-ground (3LG) symmetric grid fault that may occur in a wind turbine based on DFIG working under normal operating conditions in this study. The machine learning algorithm based on SVM has been implemented in both the control systems of DFIG converters and a control system of CBFCL. Four different SVM classifier algorithms are applied to generate the switching signals of electronic switching elements used in rotor side, grid side converter, and circuit topology of CBFCL. Fine Gaussian, Quadratic, Cubic and Linear kernel functions are preferred in the training of SVM classifiers. The developed SVMs have been suitably trained to true predict and decide behaviours of converters during normal and grid fault conditions. The performance of Fine Gaussian and Linear types of SVM is compared to the effectiveness of training efficiency for a wind turbine based on DFIG. The accuracy rate of the Fine Gaussian of SVM is 100 %, while the accuracy rate of Linear SVM is 22 %. The simulation results show that the Fine Gaussian SVM protects more efficiently from the harmful effects of 3LG grid fault compared to the Linear SVM for a wind turbine based on DFIG.

Keywords: Doubly fed induction generator (DFIG), Machine learning (ML), Capacitive bridge type fault current limiter (CBFCL), Wind turbine (WT),

1 Introduction

In recent years, due to the fluctuations in oil prices, the importance of wind power plants has increased day by day. Several generator types are used in wind power plants such as direct current, permanent magnet synchronous, and double feed induction generator (DFIG) [1,2].

Grid code is a technical specification, which must meet to ensure proper operation, defining parameters like the electrical system is safe, secure, and economical. All countries have not a common grid code and each country has

Öz

Çift beslemeli asenkron generatörü (ÇBAG), şebeke arızası sırasında meydana gelen yüksek gerilimin ve akımın zararlı etkilerine karşı çok hassastır. Makine öğrenmesi (ML) yöntemlerinden biri olan destek vektör makineye (DVM) dayalı bir kapasitif köprü tipi arıza akım sınırlayıcısı (KKTAAS), üç fazlı arızada geçiş (FRT) performansını iyileştirmek için önerilmiştir. Bu çalışmada, normal şebeke koşullarında çalışan ÇBAG tabanlı bir rüzgâr türbininde oluşabilecek faz-toprak (3LG) simetrik şebeke hatası DVM' ye dayalı makine öğrenimi algoritması hem ÇBAG dönüştürücülerin kontrol sistemlerinde hem de KKTAAS' in bir kontrol sisteminde uygulanmıştır. Rotor tarafında, şebeke tarafında dönüştürücüde ve KKTAAS' in devre topolojisinde kullanılan elektronik anahtarlama elemanlarının anahtarlama sinyallerini üretmek için dört farklı DVM sınıflandırıcı algoritması uygulanmıştır. DVM sınıflandırıcılarının eğitiminde İnce Gauss, Kuadratik, Kübik ve Doğrusal kernel fonksiyonları tercih edilmiştir. Geliştirilen DVM' ler, normal ve şebeke arızası koşulları sırasında dönüştürücülerin davranışlarını doğru tahmin etmek ve karar vermek için uygun şekilde eğitilmiştir. İnce gauss ve Doğrusal DVM türlerinin performansı, ÇBAG' ye dayalı bir rüzgâr türbini için eğitim verimliliğinin etkinliği ile karşılaştırılmıştır. DVM' in İnce Gaussian' in doğruluk oranı %100'dür, Doğrusal DVM' in doğruluk oranı ise %22'dir. Simülasyon sonuçları, İnce Gaussian DVM' in, ÇBAG tabanlı bir rüzgâr türbini için Doğrusal DVM' ye kıyasla 3LG şebeke hatasının zararlı etkilerinden daha verimli bir şekilde koruduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG), Makine öğrenmesi (ML), Kapasitif köprü tipi arıza akım sınırlayıcı (KKTAAS), Rüzgâr türbini (RT),

a different grid code [3]. Requirements of the grid code are divided into two categories as dynamic and static requirements. All electricity generating facilities, including independent energy producers such as wind turbines and photovoltaic power plants, must comply with the grid code [4]. A grid code will determine the required behaviour of a connected generator during grid faults. These include reactive power supply, power factor limits, and voltage regulation [5]. In literature, there have been many studies that electricity-generating facilities and consumers remain

continuously connected to the electrical power grid system during grid fault such as the crowbar system [6-8], static synchronous compensator (STATCOM) [9,10], static VAR compensator (SVC) [11], series dynamic braking resistor (SDBR) [12], dynamic voltage restorer (DVR) [13,14]. Recently, new modified [15] and new structure [16] models have been proposed for the bridge type fault current limiter (BFCL). The capacitive-BFCL (CBFCL) method has started to be used among the stability methods of electrical power grid systems. The CBFCL produces a practical solution to protect the wind turbine system from the harmful effects of high-level fault currents [17]. The CBFCL has zero impedance in the normal operation of the power grid and high impedance in the case of a grid fault. There is no power loss of grid system during normal operation due to CBFCL. In addition, CBFCL has superior features compared to other methods such as rapid recovery after fault elimination and operating immediately after the fault occurs [18].

According to a literature review, traditional control methods are predominantly used in control systems of the CBFCL and WT. Traditional control methods provide a performance suited to a given output. However, traditional control systems remain weak in solving complex systems such as WT based on DFIG compared to machine learning (ML). Recently, ML control system has been applied in many renewable energy fields such as wind energy [19], solar energy [20-24], and power grid [25,26]. However, the ML algorithms have been carried out in a limited number of studies in wind turbine protection systems, especially for grid faults. Some studies presented in the literature have been carried out for the WT's protection system based on ML algorithms. Yun et al. [27] proposed the ice detection of WT using a novel adaptive inductive transfer learning. This study applied the 5 methods, which are the most general classification methods. These methods are Fully-connected Neural Networks, Random Forest, AdaBoost, Quadratic, and k-Nearest Neighbors (kNN) classifiers. The accuracy value of Autoencoder and TrAdaBoost is 0.94. This value is near the normal operating value. Hsu et al. [28] applied a statistical program control to define the four faults of a WT using two machine learning algorithms, such as hydraulic oil systems, generators, gearboxes, and rotary blades. The data of WT are obtained from normal and abnormal conditions of the wind turbine operation. The accuracy rate of the machine learning algorithm is higher than 92%. Zhang et al. [29] implemented the diagnosis method of the gearbox bearing fault of WT using deep learning methods. The bearing fault diagnosis method consists of a support vector machine (SVM) classifier and a one-dimensional convolutional neural network. The above methods in the literature have been suggested for different protection systems of WT such as ice detection, and gearbox bearing fault. Also, these studies are related to outdoor working conditions and the reduction of mechanical negative effects. However, indoor working conditions of wind turbine based on DFIG have a more complex structure than outdoor working conditions. Therefore, a CBFCL based on an ML system is proposed to protect DFIG from the harmful effects of grid fault in this

study. In this respect, the subject dealt with is quite different and original from the related literature studies.

This paper introduces a novelty control algorithm using machine learning to performance enhance DFIG based on WT during 3LG grid fault. A machine learning method based on the SVM classifier algorithm is designed to enhance the FRT capability of the DFIG based on WT during normal and fault operation conditions. SVM has advantages such as being productive in multidimensional data analysis, solving complex problems with kernel solution functions, and producing optimum output even if there is not enough information data. Due to these advantages, a performance analysis of various SVM techniques has been made to protect more efficiently from the harmful effects of 3LG grid fault of WT based on DFIG in this study. The main contributions of the article work can be summarized as:

- 1) Unlike previous studies in the literature, a machine learning algorithm is implemented in the control systems of both CBFCL and DFIG converters.
- 2) Proposed machine learning algorithm has been suitably trained to true predict and decide behaviours of converters during normal and fault operation conditions.
- 3) The accuracy rate of Fine Gaussian of SVM is 100 %, while the accuracy rate of Linear SVM is 22 %.
- 4) The Fine Gaussian of SVM more efficiently protects DFIG based on WT from the harmful effect of 3LG grid fault compared to Linear SVM.

2 Wind turbine and mathematical model of DFIG

WT is a device that converts wind energy into electrical energy. WT is designed considering factors such as cost, energy output, and low fatigue life. A wind turbine needs to achieve the maximum theoretical power output in order to effectively generate electrical power. It has been emphasized that the different parameters of a WT have different effects on the output power of WT in literature studies. If a wind speed is represented by v , the conversion coefficient is represented C_p , the air density is represented ρ , and the swept area is represented by A , the output power of the WT is obtained in Equation 1 [30].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

If the wind speed is depicted by v and an angular velocity of a WT is represented by ω_m , λ is obtained as the type speed ratio in Equation 2 [30].

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v} \quad (2)$$

where, λ depict a rate between wind speed and angular speed of WT. R depict the radius of wind turbine blade in Equation 2 [30].

DFIG is the most commonly used type of generator in WT due to its flexibility and ability to control reactive and active power. A mathematical model of DFIG is stated to be very useful for analyzing its electrical properties under both

normal and fault conditions. The general and widely used mathematical model of DFIG has been obtained using the transformation model of the Park model. The rotor and stator voltages of DFIG are given in a suitable d-q reference frame as follows [31,32]:

$$v_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_e \psi_s \quad (3)$$

$$v_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_e - \omega_r)\psi_r \quad (4)$$

where, v_r and v_s are the voltages of the rotor and stator, respectively. R_s and R_r depict resistances of rotor and stator, respectively. L_r and L_s depict inductances of the rotor and stator, respectively. ω_e and ω_r depict the electrical angular velocity and the angular velocity of the rotor, respectively. ψ_r and ψ_s depict the inductances of the rotor and stator, respectively. The flux components of rotor and stator are expressed by [31,32]:

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (5)$$

$$\psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (6)$$

where, L_r and L_s depict inductances of rotor and stator, respectively. i_r and i_s depict currents of rotor and stator, respectively [31,32].

3 The design of the proposed system

A single-line diagram of WT based on DFIG is illustrated in Figure 1. Rotor side converter regulates reactive and active

power of the generator by means of IGBT gate signals, while grid side converter regulates DC Link voltage amplitude (V_{dc}) by means of IGBT gate signals. A proportional-integral (PI) controller is usually used to obtain the control signal of the IGBT gate signal in the literature. The PI controller generates optimum output for a given operating condition. The conventional control systems are not capable of dealing with some challenges in complex systems such as WT based on DFIG. The PI control system does not give effective results in varying operating conditions such as grid fault due to the fact that its parameters have been fixed. The PI has difficulty controlling a WT with uncertain operating conditions. However, the proposed control technique has overcome the uncertainties of a WT based on the DFIG system [33]. Therefore, the machine learning control system has been applied separately for grid and rotor side converter control systems in the study. Machine learning, which is considered a part of artificial intelligence, is defined as a computer algorithm that improves automatically with the use of data and experience. The machine learning algorithm has different types due to the fact that each system has a different type of task and data or the solve methods of problem. The machine learning algorithm has two methods: classifying data according to the developed models and making predictions for future results based on these models. Machine learning algorithm has several types of learning methods such as reinforcement, unsupervised and supervised learning.

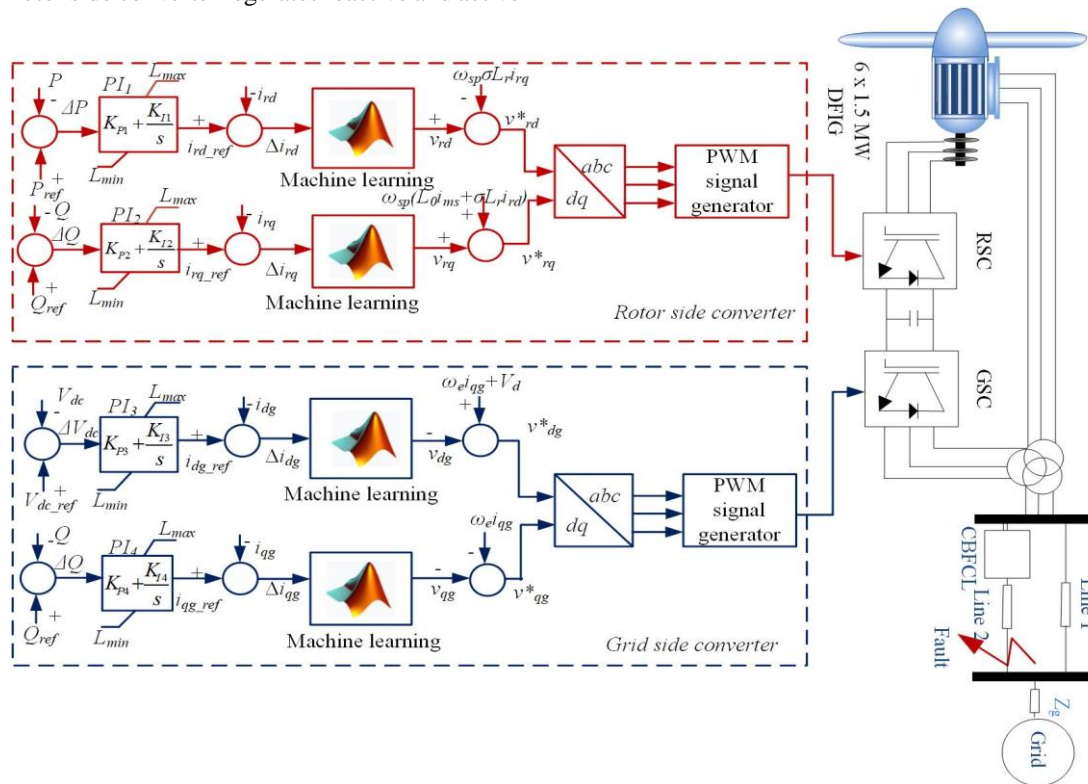


Figure 1. A single line diagram of WT based on DFIG using machine learning.

Classification Learner Toolbox in Matlab has various classifier types such as SVM, kNN, and ensemble. SVM is one of several classification algorithms in the machine learning models and is one of the most widely used in the supervised learning models that analyze for classification and regression. The classifier techniques of the SVM are Coarse Gaussian, Medium Gaussian, Fine Gaussian, Cubic, Quadratic, and Linear in the Matlab. A support vector machine, which is a supervised learning model, is used in this study [19].

4 Capacitive bridge type fault current limiter based on machine learning control

The circuit topology of the CBFCL based on machine learning control is given in Figure 2. CBFCL consists of two parts, called the bridge and shunt parts. A shunt part includes of Capacitor (C_{sh}) and resistor (R_{sh}). A shunt part has a high impedance. In this study, the best results of the system are obtained by choosing the values of capacitance and resistance as $C_{sh} = 50 \mu F$ and $R_{sh} = 10 \Omega$. The bridge part consists of four bridge diodes, a small resistor, an inductor and a freewheeling diode. The resistor (R_{dc}) and inductor (L_{dc}) are connected in series and this is called dc reactor. Dc reactor is in the middle of four bridge diodes. In this study, the best results of the system are obtained by choosing the values of inductor and resistance as $L_{dc} = 0.015 H$ and $R_{dc} = 0.015 \Omega$. A freewheeling diode discharges the energy stored in the DC reactor when the IGBT switching signal turns on [2].

5 Simulation Results

The model of WT based on DFIG is simulated in the Matlab/Simulink. Machine learning control method is implemented to control system of a 9-MW, 690V DFIG based on WT. The wind speed is 15 m/s and DC Link voltage is 1150 V. CBFCL based on ML system is applied to protect from the harmful effects of overcurrent during a grid fault.

A comparison of four SVM classification methods is given in Table 1. The accuracy rates of Cubic SVM, Quadratic SVM, and Fine Gaussian SVM are 100 %. This value of the proposed system indicates that the model is more effective in classifying the wind turbine. The accuracy rate of Linear SVM is 22%. Each type of SVM has 1000 test samples in the test set. However, 10 of these test examples are given in the confusion matrix in Figure 3.

Table 1. Comparison of different SVM classification methods

SVM Classification Method	Accuracy Rate (%)
Fine Gaussian SVM	100%
Quadratic SVM	100%
Cubic SVM	100%
Linear SVM	22%

The 3LG grid fault, which is called a symmetrical grid fault, is the most serious type of grid fault. Therefore, it is vital to control this type of grid fault. The 3LG grid fault is applied at $t = 4$ s and cleared after 4.5 s in the study.

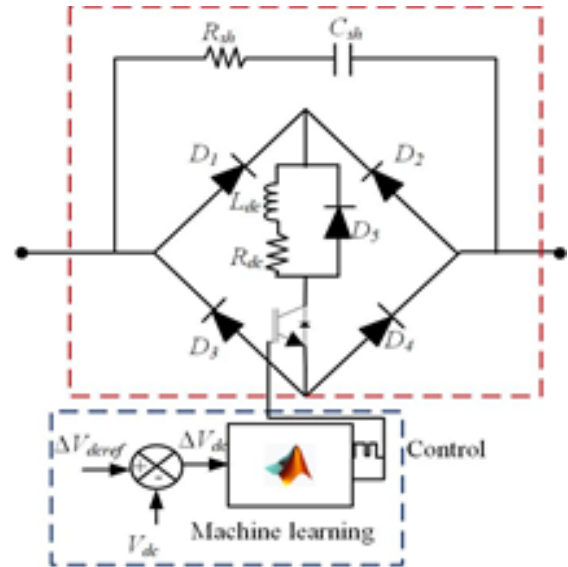


Figure 2. Circuit topology of the CBFCL based on machine learning control.

Table 2. Comparison of tracking the performance of two SVM methods for the 3LG grid fault in time $t=4.5$

Signal	Method	Peak value	Lowest value	Settling time	Steady state error
P(MW)	Fine Gaussian SVM	9.717	8.78	4.75	0.002
	Linear SVM	12.73	1.058	7	0.3
Q(MVAR)	Fine Gaussian SVM	0.393	-0.24	4.8	0.001
	Linear SVM	3.535	-2.22	4.9	0.39
Vdc(V)	Fine Gaussian SVM	1171	1145	4.605	0.02
	Linear SVM	1343	1107	4.62	4
Te (p.u.)	Fine Gaussian SVM	-0.616	-0.95	4.65	0
	Linear SVM	0.3	-2.7	7	0.06
PCC (p.u.)	Fine Gaussian SVM	1	0.91	4.75	0
	Linear SVM	1.0125	0.18	4.9	0.01

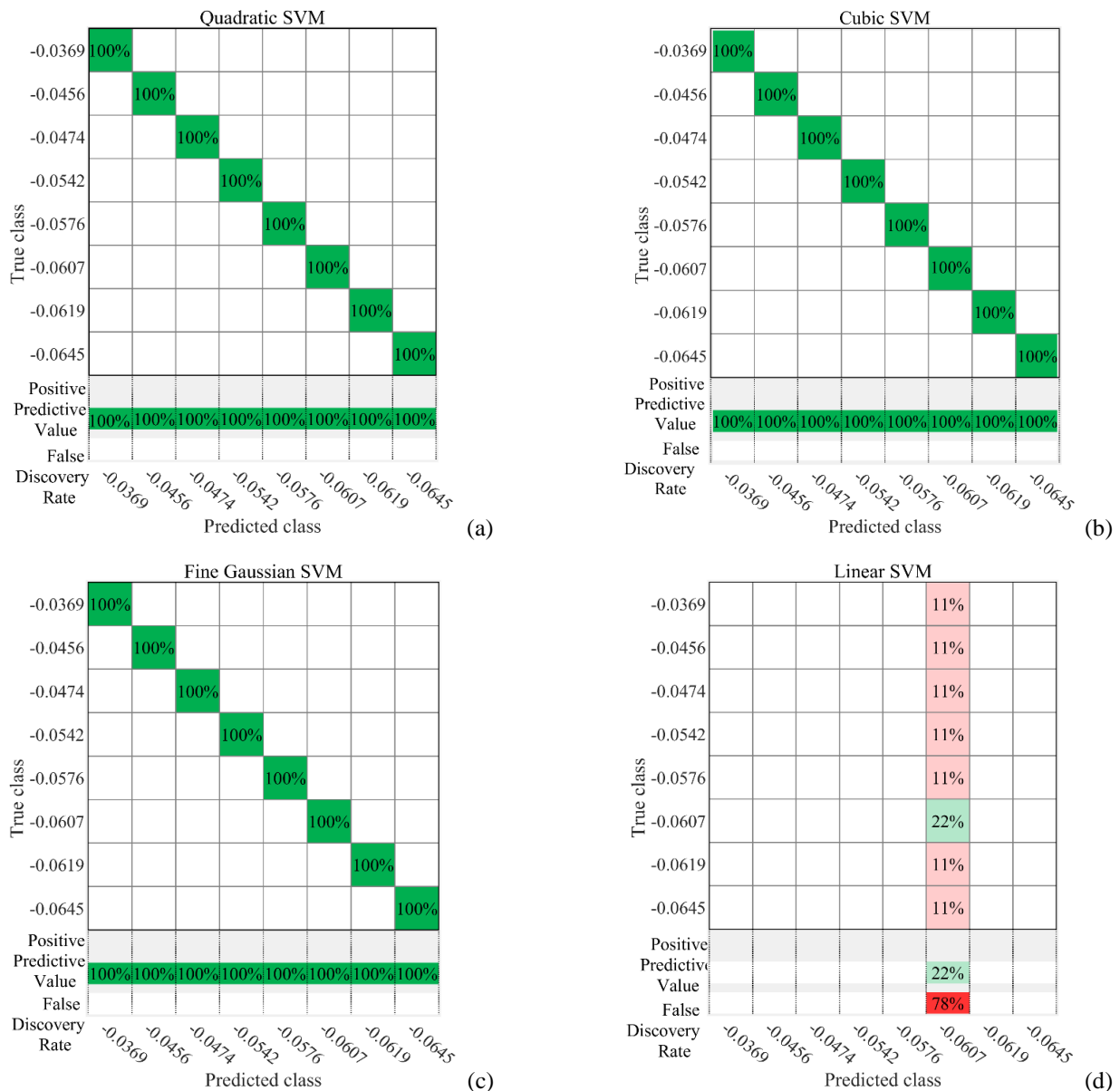


Figure 3. Confusion matrix of different SVM models

The numerical results in terms of peak value, lowest value settling time, and steady-state error are illustrated in Table 2. Figure 4(a) illustrates the variations in active power of WT with both protection methods. The active power peak value of WT with the proposed control algorithm is 9.717 MW and the active power lowest value of WT with the proposed control algorithm is 8.78 MW during the 3LG grid fault. Settling time and steady-state error of power of WT with the proposed control algorithm are very low compared to Linear SVM control algorithm results. Figure 4(b) illustrates the variations in the reactive power value of WT. The rated value of reactive power is 0 MVAR during normal operation. The settling time of the Linear SVM is 0.1 s longer than presented control system and then value of reactive power returns to the rated value nearly. However, the steady-state error of the Linear SVM is 0.39. Figure 4(c) illustrates

the variations in DC link voltage of WT with both protection methods. The rated value of DC link voltage is 1150V during normal operation. The peak value of DC link voltage with the Linear SVM is 1343 V. The electronic switching elements can be damaged due to the fact that this value is more than the nominal value. Figure 4(d) and (e) illustrate the variations in the electromagnetic torque (p.u.) and voltage (p.u.) of the PCC, respectively. The lowest value voltage of the PCC with the Linear SVM algorithm is 0.18 p.u. The wind turbine cannot stay connected with the grid during 3LG grid fault because the voltage value of PCC with the Linear system is significantly reduced. According to simulation results, the proposed method is fully capable of controlling to 3LG grid fault.

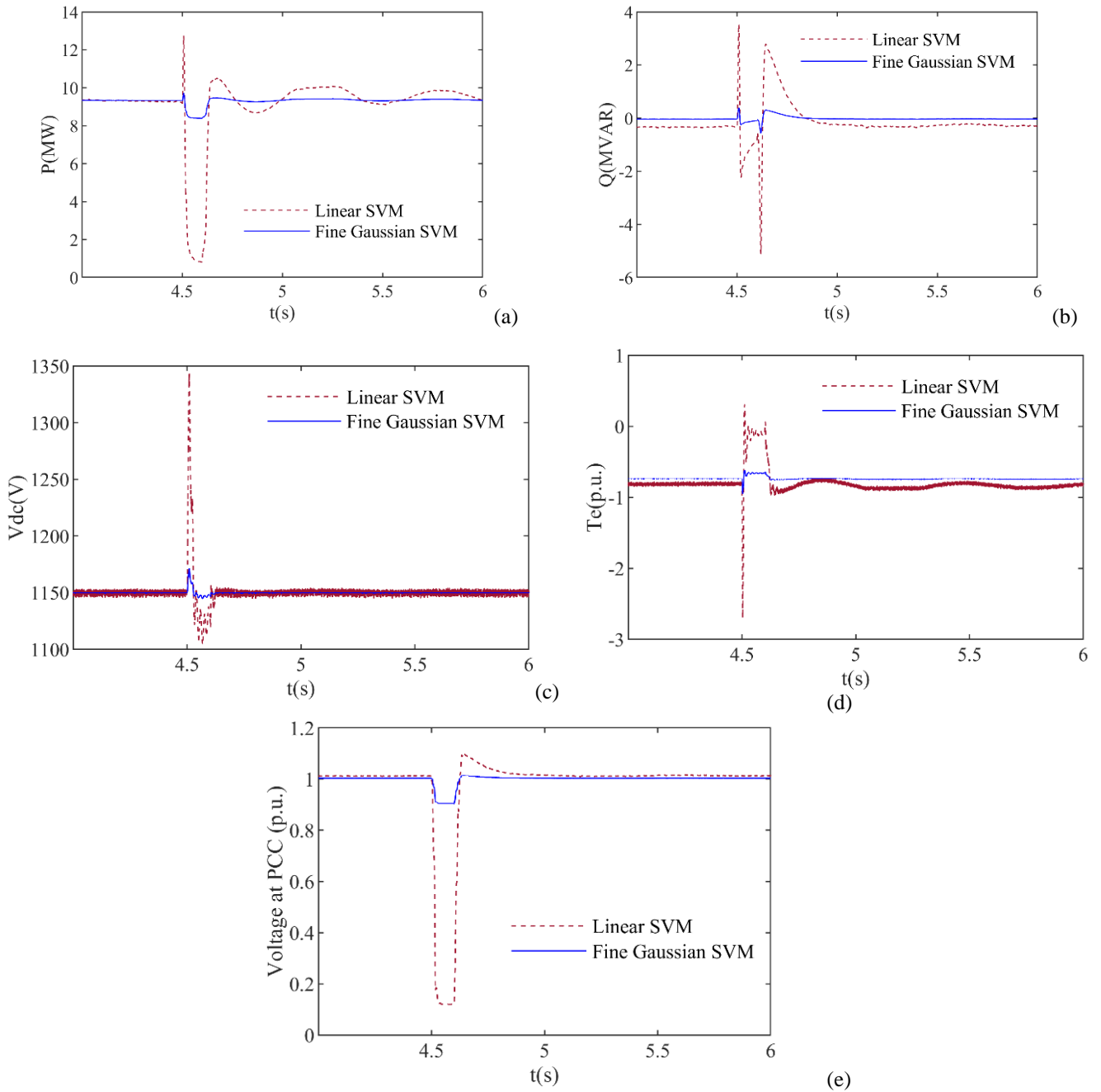


Figure 4. Dynamic response of a 9MW DFIG with machine learning methods during a 3LG symmetrical fault.

6 Conclusion

The model of wind turbine based on DFIG is simulated in Matlab/Simulink. The simulation results are obtained in real-time. In this paper, a CBFCL based on a machine learning algorithm is presented to enhance the FRT capability of the wind turbine based on DFIG during normal operation conditions and grid fault. The machine learning control method is applied to both the control systems of DFIG converters and the control system of the CBFCL.

Fine Gaussian SVM, Quadratic SVM, Cubic SVM, and Linear SVM are applied to generate the switching signals of electronic switching elements used in the rotor side, grid side

converter, and circuit topology of the CBFCL. The performance of these types of SVM is compared to the effectiveness of training efficiency for a wind turbine. The accuracy rates of Cubic SVM, Quadratic SVM, and Fine Gaussian SVM are 100 % in Table 1. This value of the proposed system indicates that the model is more effective in classifying the wind turbine. Peak value, lowest value, settling time and steady-state error values of WT with the proposed control algorithm are very low compared to Linear SVM control algorithm results during the 3LG grid fault. WT with presented control system can stay connected with the grid during the 3LG grid fault due to the fact that the

voltage value of the PCC with the proposed control system is reduced to an acceptable range. According to simulation results, the proposed method has fully capable of controlling the 3LG grid fault. The simulation results show that presented type of SVM is more efficiently protects the DFIG based on wind turbine from the harmful effect of 3LG grid fault compared to the other types.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 14

References

- [1] M. Samiei Sarkhanloo, H. Bevrani and R. Mirzaei, A comprehensive coordinated frequency control scheme for double-fed induction generator wind turbine, battery, and diesel generators in islanded microgrids, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 23, 1556-7036, 2021 <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1868623>.
- [2] A. Gencer, Analysis of fault ride through capability improvement of the permanent magnet synchronous generator based on WT using a BFCL, 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), pp. 353-357, Nevsehir, Türkiye, 2019. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778624>.
- [3] A. Rini Ann Jerin, P. Kaliannan, and U. Subramaniam, Improved fault ride through capability of DFIG based wind turbines using synchronous reference frame control based dynamic voltage restorer, *ISA Transactions*, 70, 465-474, 2017. <https://doi.org/doi:10.1016/j.isatra.2017.06.029>.
- [4] K. Kim, Y. Jeung, D. Lee and H. Kim, LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(5), 2376-2384, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2171999>.
- [5] M. R. Islam, J. Hasan, M. R. R. Shipon, M. A. H. Sadi, A. Abuhussein and T. K. Roy, Neuro fuzzy logic controlled parallel resonance type fault current limiter to improve the fault ride through capability of DFIG based wind farm, in *IEEE Access*, 8, 115314-115334, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000462>.
- [6] A. M. A. Haidar, K. M. Muttaqi and M. T. Hagh, A coordinated control approach for DC link and rotor crowbars to improve fault ride-through of DFIG-based wind turbine, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 4073-4086, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2686341>.
- [7] S. Yang, T. Zhou, D. Sun, Z. Xie, and X. Zhang, A SCR crowbar commutated with power converter for DFIG-based wind turbines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, 87-103, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.039>.
- [8] A. Gencer, Analysis and control of fault ride through capability improvement PMSG based on WECS using active crowbar system during different fault conditions. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 24, 64-69, 2018. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.24.2.20637>.
- [9] J. Qi, W. Zhao and X. Bian, Comparative study of SVC and STATCOM reactive power compensation for prosumer microgrids with DFIG-based wind farm integration, in *IEEE Access*, 8, 209878-209885, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033058>.
- [10] H. Geng, L. Liu and R. Li, Synchronization and reactive current support of PMSG-based wind farm during severe grid fault, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(4), 1596-1604, 2018. <https://doi.org/10.1109/TSSTE.2018.2799197>.
- [11] L. Wang and D. Truong, Stability enhancement of a power system with a PMSG-based and a DFIG-based offshore wind farm using a SVC with an adaptive-network-based fuzzy inference system, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60, 7, 2799-2807, 2013. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2218557>.
- [12] S. Yan, A. Zhang, H. Zhang, J. Wang and B. Cai, Transient stability enhancement of DC-connected DFIG and its converter system using fault protective device, in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(6), 887-896, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0333-9>.
- [13] F. Jiang, C. Tu, Q. Guo, Z. Shuai, X. He and J. He, Dual-functional dynamic voltage restorer to limit fault current, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(7), 5300-5309, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.28682>.
- [14] A. O. Ibrahim, T. H. Nguyen, D. Lee and S. Kim, A fault ride-through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(3), 871-882, 2011. <https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2158102>.
- [15] H. Tseng, W. Jiang and J. Lai, A modified bridge switch-type flux-coupling nonsuperconducting fault current limiter for suppression of fault transients, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(6), 624-2633, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2820428>.
- [16] H. Nourmohamadi, M. Nazari-Heris, M. Sabahi and M. Abapour, A novel structure for bridge-type fault current limiter: capacitor-based nonsuperconducting FCL, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(4), 3044-3051, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2710018>.
- [17] M. A. H. Sadi, A. AbuHussein and M. A. Shoeb, Transient performance improvement of power systems using fuzzy logic controlled capacitive-bridge type fault current limiter, in *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(1), 323-335, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3003294>.
- [18] M. Firouzi and G. B. Gharehpetian, LVRT performance enhancement of DFIG-based wind farms by capacitive bridge-type fault current limiter, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(3), 1118-1125, 2018. <https://doi.org/10.1109/TSSTE.2017.2771321>.
- [19] N. Rezaei, M. N. Uddin, I. K. Amin, M. L. Othman, M. B. Marsadek and M. M. Hasan, A novel hybrid machine learning classifier-based digital differential protection scheme for intertie zone of large-scale

- centralized DFIG-based wind farms, in IEEE Transactions on Industry Applications, 56(4), 3453-3465, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2990584>.
- [20] H. S. Jang, K. Y. Bae, H. Park and D. K. Sung, Solar Power prediction based on satellite images and support vector machine, in IEEE Transactions on Sustainable Energy, 7(3), 1255-1263, 2016. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2535466>.
- [21] S. Edun et al., Finding faults in PV systems: supervised and unsupervised dictionary learning with SSTDR, in IEEE Sensors Journal, 21 (4), 4855-4865, 2021. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3029707>.
- [22] S. Asaly, L. -A. Gottlieb and Y. Reuveni, Using support vector machine (SVM) and ionospheric total electron content (TEC) data for solar flare predictions, in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, 1469-1481, 2021. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3044470>.
- [23] T. Gunda et al., A Machine Learning evaluation of maintenance records for common failure modes in PV inverters, in IEEE Access, 8, 211610-211620, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039182>.
- [24] T. Hai et al., Global solar radiation estimation and climatic variability analysis using extreme learning machine based predictive model, in IEEE Access, 8, 12026-12042, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965303>.
- [25] D. Upadhyay, J. Manero, M. Zaman and S. Sampalli, Gradient boosting feature selection with machine learning classifiers for intrusion detection on power grids, in IEEE Transactions on Network and Service Management, 18(1), 1104-1116, 2021. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3032618>.
- [26] Z. Li, H. Liu, J. Zhao, T. Bi and Q. Yang, Fast power system event identification using enhanced LSTM network with renewable energy integration, in IEEE Transactions on Power Systems, 36 (5), 4492-4502, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3064250>
- [27] H. Yun, C. Zhang, C. Hou and Z. Liu, An adaptive approach for ice detection in wind turbine with inductive transfer learning, in IEEE Access, 7, 122205-122213, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926575>.
- [28] J. Hsu, Y. Wang, K. Lin, M. Chen and J. H. Hsu, Wind turbine fault diagnosis and predictive maintenance through statistical process control and machine learning, in IEEE Access, 8, 23427-23439, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968615>.
- [29] X. Zhang, P. Han, L. Xu, F. Zhang, Y. Wang and L. Gao, Research on bearing fault diagnosis of wind turbine gearbox based on 1DCNN-PSO-SVM, in IEEE Access, 8, 192248-192258, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032719>.
- [30] S. Tohidi, P. Tavner, R. McMahon, H. Oraee, MR. Zolghadri, S. Shao S, et al. Low voltage ride-through of DFIG and brushless DFIG: similarities and differences Electric Power System Research, 110, 64-72, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.12.018>.
- [31] S. Bayhan, S. Demirbas and H. Abu-Rub, Fuzzy-PI-based sensorless frequency and voltage controller for doubly fed induction generator connected to a DC microgrid, in IET Renewable Power Generation, 10(8), 1069-1077, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0504>.
- [32] S. Demirbas, Self-tuning fuzzy-PI-based current control algorithm for doubly fed induction generator, in IET Renewable Power Generation, 11(13), 1714-1722, 2017. <https://doi.org/10.1049/ietrpg.2016.0700>.
- [33] A. Gencer, Comparison of t-type converter and NPC for the wind turbine based on doubly-fed induction generator", Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, 9(2), 123-128, 2021, <https://doi.org/10.17694/bajece.826624>.





Endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilir alan tabanlı çap ölçüm algoritması

Area based diameter measurement algorithm for industrial machine vision applications

Ahmet Gökhan Poyraz^{1,*} , Hasan Melih Kınacı² , Semih Alan³ , Mehmet Atak⁴ 

^{1,2,3,4} Doğu Pres R&D Center. Minareliçavuş, Manolya Cd. No:8, 16140 Nilüfer/Bursa, Türkiye

¹ Bursa Technical University, Electrical and Electronics Engineering Department, 16310 Bursa, Turkey

Öz

Pul tipli seri üretim parçalarının çap kontrollerinde hız avantajı sayesinde kameralı sistemler tercih edilmektedir. Bu sistemlerin başarısı kullanılan görüntü işleme algoritmasına ve ortam şartlarına bağlıdır. Ortam şartlarının elverişli olmaması sebebiyle alan tabanlı yaklaşımlar endüstriyel makine görmesi uygulamalarında tercih edilmemektedir. Bu makalede endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilir sanayi şartlarına dayanıklı alan tabanlı bir çap ölçüm algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemin başarısı, alt hesaplama metriği baz alınarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemde ilk olarak elde edilen görüntünün üzerindeki gürültüler bağlı bileşen analizine göre temizlenir. Ardından elde edilen en büyük bileşenden iç ve dış bölgeler belirlenerek çaplar alan hesabına göre bulunur. Tasarlanan deney düzeneğinde lensleri değişebilen bir kameranın alt tarafına yüzeyel bir aydınlatma cihazı yerleştirilmiştir. Kameranın görüş alanında 3 farklı konumlamaya tipine göre toplamda 4 türden 40 adet pul, 3 farklı lens ile 20'şer defa ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre parçanın kamera altındaki konumunun tekrarlanabilirlik ölçümlerine büyük ölçüde etki ettiği gözlemlenmiştir. Rastgele konulamada alt hesaplama metriğinin (C) 2 olduğu gözlemlenmiştir. Endüstriyel şartları sağlayan sınırlı konulamada ise bu değer 5'e kadar çıktığı tespit edilmiştir. Yapılan testler, önerilen yöntemin hassas toleransa sahip iş parçalarının çaplarının endüstriyel ortamda ölçülebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Görüntü işleme, Çap ölçümü, Kamera, Pul, Hassasiyet

1 Giriş

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte hassas kesme işlemi endüstride yapılabilir hale gelmiş ve yaygınlaşmıştır. Mikron mertebelerinde hassasiyete sahip parçalar artık yeni nesil kalıp ve tornalar sayesinde rahatlıkla üretilebilmektedir. Bu durum üretilen hassas parçaların boyutsal kontrollerini yapabilecek sistemlerin gelişmesine öncülük etmiştir. Hassas ölçüm sistemleri genel olarak optik kameralı ölçüm ve dokunsal ölçümler olarak ikiye ayrılabilir. Dokunsal ölçüm sistemlerinde hassas problemler parça üzerinde gezdirilerek prob üzerindeki basınç farkına

Abstract

Measurements of serial production workpieces in the industry are performed by camera-controlled systems thanks to the advantage of speed. The measurement success of camera systems largely depends on the measurement algorithm and ambient conditions. Area-based approaches are not preferred in industrial machine vision applications due to the undesired environmental conditions. In this paper, an area-based diameter measurement algorithm that can be used in industrial machine vision applications is proposed. The success of the proposed method is demonstrated based on the sub-computation metric. In the proposed method, firstly, the noise on the obtained image is cleaned according to the connected component analysis. Then, the inner and outer diameters of the largest component are determined according to the area calculation. In the designed experimental setup, a back lighting illumination has been preferred. According to 3 different positioning types in the field of view of the camera, a total of 40 stamps of 4 types were measured 20 times with 3 different lenses. According to the test results, it has been observed that the position of the part on the field of view greatly affects the repeatability measurements. Also, sub-computation metric (C) is measured 2 in random positioning. This value increases up to 5 in the limited positioning that meets the industrial conditions. Tests have shown that the proposed method can measure the diameters of workpieces with precise tolerances in an industrial setting.

Keywords: Image processing, Diameter measurement, Camera, O-ring, Sensitivity

göre ölçüm yapılmaktadır. Bu sistemlerde problemlerin ölçülen mesafe boyunca hareket etmesi gerekliliğinden ölçüm için belirli bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla seri üretim hassas parçaların kontrolü yapılırken dokunsal sistemler yerine optik kameralı sistemler daha avantajlıdır. Optik sistemlerin temelinde ise iş parçasının bir kamera yardımıyla görüntüsü alınarak ölçülecek büyüklüğü (çap, kalınlık vb.) yazılan algoritma ile tahmin edilmektedir. Kameralı sistemlerin en büyük avantajı ölçüm süresinin birkaç saniye veya daha da az olmasıdır. Kameralı ölçüm konusunda birçok uygulama ve yazılım bulunmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: agpoyraz@gmail.com (A. G. Poyraz)

Geliş / Received: 07.01.2022 Kabul / Accepted: 17.09.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1069442

Malamas vd. [1], kameralı endüstriyel görüş konusunda dünyadaki uygulamaları ve yazılımları irdelemiştir. Yaptıkları araştırmada yalnızca boyutsal değil, aynı zamanda yüzeysel ve yapısal özelliklerin kontrollerini de yapabilen sistemleri anlatmışlardır. Bazı araştırmacılar malzemelerin boyutsal ölçülerini kameralı kontrol sistemleri kullanarak tespit etmişlerdir (Öztürk vd. [2] ve Bal [3]). Moru vd. [4] üretilen dişli parçalarının kontrollerini kameralı sistemle ölçmeyi hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri robotik tabanlı yazılım sistemi ile dişli parçasının birçok ölçüsünü bulabilmektedir. Wei vd. [5] shaft yarıçapını ölçmek için kameralı bir sistem kullanmışlardır. Yuvarlak tipteki halka, yüzük vb. parçaların en önemli ölçüsü yarıçaplarıdır. Birçok araştırmacı üretilen parçaların yarıçaplarını kameralı kontrol sistemleriyle ölçmüşlerdir (Eldessouki vd. [6]). Yarıçap ölçümünde Chunyang vd. [7] çizgi tabanlı bir algoritma benimsemiştir. Üretilen top mermisinin yarıçapını ölçerken istenen bölgeye düz bir çizgi çekmiş ve yarıçapı görüntü işleme teknolojisini kullanarak tahmin etmişlerdir. Araştırmacılar görüntüler üzerindeki parçaların yarıçap ölçümünü yapabilmek için genel olarak 2 temel algoritma kullanmışlardır. Bayram vd. [8] metal sektöründeki hatalı ürünlerin tespiti için dairesel hough dönüşümü kullanmışlardır. Üzerinde dairesel halkalar içeren metal levhaların halka çaplarını kontrol etmek için kamera kontrollü bir sistem tasarlamışlardır. Telepatil vd. [9] metal kütüklerin yarıçap ölçümlerini yaparken gradyan tabanlı dairesel hough dönüşümünü tercih etmişlerdir. Dairesel hough dönüşümünün yanında pikselleri saymaya dayanan alan tabanlı yarıçap ölçüm algoritmaları bulunmaktadır. Cömert vd. [10] ve Kadhun vd. [11] meyve resimleri üzerinden çap tahmini için alan tabanlı görüntü işleme algoritması kullanmışlardır. Öncelikle kenar bulma ve morfolojik işlemler uygulanarak şeklin sınırları belirlenmiş, ardından ikili resim elde edilerek alan tabanlı yöntem ile meyvelerin yarıçapları ölçülmüştür. Heydari vd. [12], 9-16 mm boyutlarındaki demir topakların çaplarını alan tabanlı algoritma kullanarak ölçmüşlerdir. Bununla birlikte, dar toleransa sahip parçaların kontrolü için oldukça hassas ölçüm yapabilen sistemler gerekmektedir. Shim vd. [13] ve Tan vd. [14] dar toleranslı parçalar için makine görmesi tabanlı yarıçap ölçüm sistemi kullanmışlardır. Haibing vd. [15] ring tipli parçalar için kübik interpolasyon tabanlı ölçüm algoritması geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada öncelikle kenar tespiti için gürültüye dayanıklı matematiksel morfolojik işlem tabanlı bir yöntem kullanmışlardır. Sundukları sonuçlara göre kablo çapı için ölçüm hatası yaklaşık $\pm 15 \mu\text{m}$ 'dir. Xie vd. [16] endüstriyel parçaların boyutsal ölçümleri için Zernike moment tabanlı yöntem benimsemişlerdir. İlk olarak Robert kenar bulma metodunu kullanarak kenar noktalarını kabaca belirleyip ardından Zernike moment ile bu noktaları hem yön hem de pozisyon açısından daha da hassaslaştırarak ölçüm gerçekleştirmişlerdir. Yan vd. [17] tüp şeklindeki iş parçasının iç çapını kenar tespiti yaptıktan sonra interpolasyon yaparak ölçmeyi hedeflemişlerdir. Yaptıkları çalışmada 0.3 piksel ölçüm belirsizliğine erişmişlerdir. Haibing vd. [18] kübik interpolasyon tabanlı bir çap ölçüm yöntemi önermiştir. Uyguladığı yöntemde $\pm 100\mu\text{m}$

belirsizlik elde etmiştir. Liu vd. [19] bulanık kenarlara sahip görüntülerde çember tespit eden bir yöntem önermiştir.

Kameralı ölçüm sistemlerinde sistemin başarısı tekrarlanabilirlik testleriyle ölçülebilir. Seçilen iş parçası sistem üzerinde tekrar tekrar ölçülür. Yapılan ölçümlerin birbirlerine yakın olması beklenen durumdur. Aynı iş parçası için ölçüm değerlerinin birbirlerine yakın olması sistemin başarısını göstermektedir. Farklı kamera-lens kombinasyonlarında mm türünden aynı ölçüm hassasiyeti elde edilebilir. Ancak parçanın gerçek değerinin bulunması için kalibrasyon yapılması gerekmektedir. Bu da beraberinde kalibrasyon hatasını getirir. Değişmeyecek olan metrik ise yarıçapın piksel türünden karşılığıdır. 1 pikselin karşılık geldiği mm uzunluğu bilindiği müddetçe mm türünden ölçüm hassasiyeti bulunabilir. Dolayısıyla ölçümlerin lensten ve kameradan bağımsız olabilmesi adına milimetre türünden uzunluk yerine piksel türünden uzunluk tercih edilebilir. Bu çalışmada önerilen yöntemin başarısı ölçülürken kalibrasyondan gelebilecek hatalardan ötürü piksel cinsinden uzunluk baz alınmıştır. Böylelikle sistemin başarısı daha net bir şekilde ortaya konulmuştur. Alan tabanlı algoritmalarda ölçüm hassasiyeti bütün alana bakıldığından 1 pikselden küçük olabilmektedir. Hassasiyetin 1 pikselin ne kadar altında olduğu alt hesaplama metriği ile gösterilebilir. Alt hesaplama metriğinin yüksek olması sistemin başarısını göstermektedir.

Endüstriyel ortamda üretilen iş parçaları üzerinde üretim süreçlerinden kaynaklı olarak yağ, su, çapak vb. gibi ölçüme olumsuz etki edebilecek gürültüler bulunabilmektedir. Bu etkenler yıkama işlemleriyle giderilmeye çalışılsa da her parça istenen temizlikle olmamaktadır. Ayrıca parçaların tozlu olması ya da dışarıdan gelebilecek ışık gürültüsü ölçüm sonuçlarını saptırabilmektedir. Bu makalede endüstriyel görüntü işleme alanında kullanılacak ortam şartlarına dayanıklı alan tabanlı bir çap ölçüm algoritması önerilmektedir. Önerilen yöntem ile dışarıdan gelebilecek gürültüler giderilerek ölçümler daha doğru bir şekilde yapılmaktadır. Geliştirilen yöntem için 1 adet yüzeysel aydınlatma, üç farklı görüş alanına sahip telesentrik lensler ve bir adet 10 megapiksel endüstriyel tipli bir kamera kullanılarak deney sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan sistemde 4 farklı çapa sahip 40 adet pul parçası önerilen algoritma ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları piksel türünden hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin başarısı, alt hesaplama metriği baz alınarak gösterilmiştir. Ek olarak ölçüm parçalarının görüş alanındaki konumunun çap ölçüm hassasiyetine etkisi 3 farklı deneyle incelenmiştir. Önerilen yöntem, hem ham görüntüdeki istenmeyen gürültülerin giderilmesini sağlaması açısından hem de alan tabanlı yaklaşımı endüstriyel makine görmesi uygulamasında kullanması açısından yenilik barındırmaktadır.

2 Materyal ve metot

2.1 Deneysel kurulum

Oluşturulan yöntemin testleri için gerçek endüstriyel ekipmanlar kullanılarak deney düzeneği tasarlanmıştır. (Şekil 1). İş parçalarının toleransları oldukça dar olduğundan (0.1-0.025 mm aralığında) gerekli hassasiyete erişebilmek için elde edilen görüntünün net olması ve dış ortamdaki

gürültülerden etkilenmemesi gerekmektedir. Klasik kamera ve lensler ile elde edilen görüntülerde balıkgözü etkisi oluşabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada en düzgün görüntüyü alabilmek için endüstriyel tipte bir kamera ve telesentrik lens kullanılmıştır (Şekil 1). Telesentrik lensler ile görüntülerde oluşan balıkgözü etkisi ve dışarıdan gelebilecek gürültüler elimine edilmektedir. İş parçasının sınırlarını belirleyebilmek için parçanın alt tarafına yüzeyel bir ışık kaynağı konulmuştur. Bu ışık kaynağı ile aynı zamanda dışarıdan gelen ışık gürültüleri de engellenmiştir.

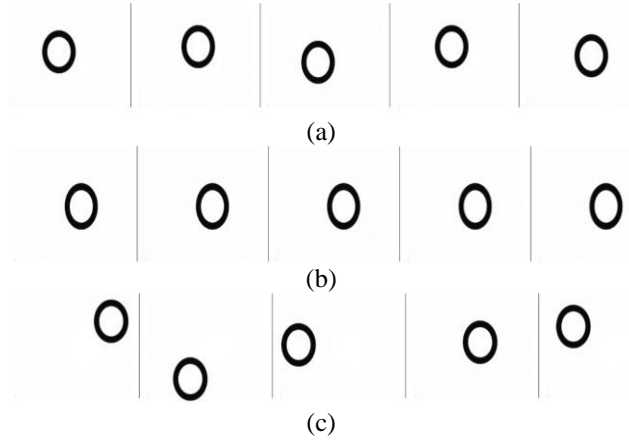
Tasarlanan sistem ile elde edilen görüntülerde ölçüm pulları tamamen siyah diğer bölgeler ise tamamen beyaz olmaktadır. Böylelikle yapılan eşikleme işlemi yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Parça ile kamera arasındaki mesafe kameraya takılı olan telesentrik lensin çalışma özelliğine göre değişiklik göstermektedir. Işık kaynağı ise her test için sabit konumda duracak şekilde tasarlanmıştır. Kamera ile ışık kaynağı arasına yerleştirilen parçaların görüntüsü MATLAB programı vasıtasıyla elde edilip işlenmiştir. Kamera olarak 3840x2748 piksel çözünürlüklü ve "rolling shutter" özellikli IDS marka kamera kullanılmıştır. Kameraya uyumlu olarak 3 farklı görüş alanına sahip telesentrik lensler deneylerde kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Kullanılan telesentrik lenslerin özellikleri

Lens Adı	Lens 1	Lens 2	Lens 3
Görüş Alanı (mm)	36.16 × 27.12	42.54 × 31.94	25.10 × 18.82

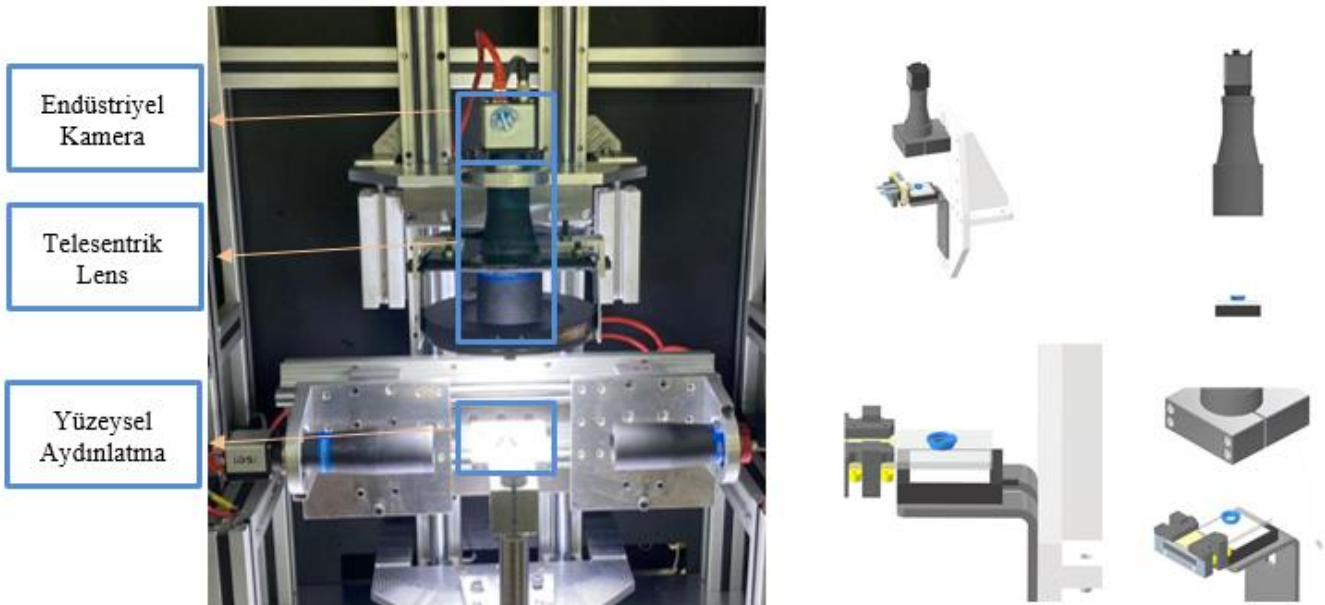
Sistemin ölçüm hassasiyetini belirlemek ve parça konumunun ölçüm hassasiyetine etkisini bulabilmek için iş

parçalarının sabit, rastgele ve sınırlı bölgede konumlandırıldığı üç ana deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

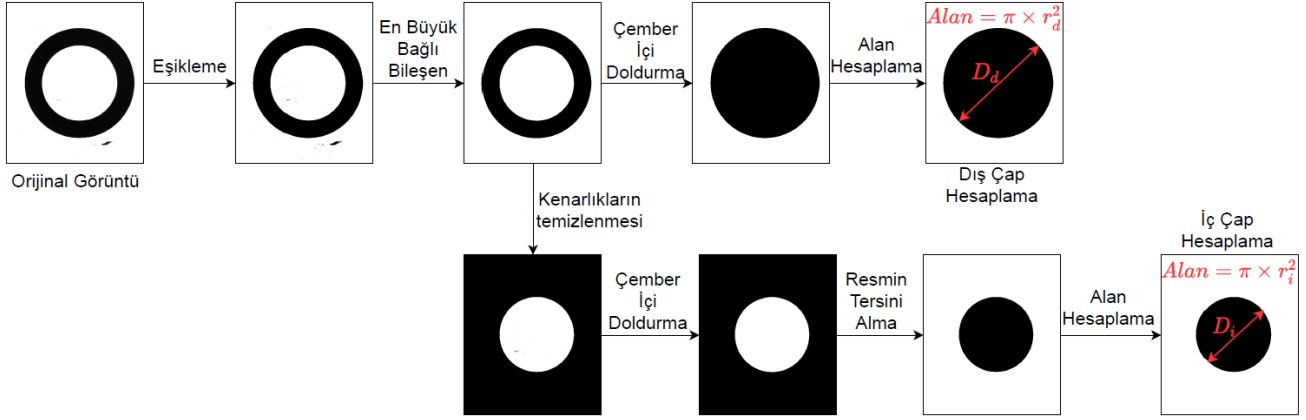


Şekil 2. Konumlanma durumlarına göre aynı pul için tekrar eden örnek test resimleri (a) sınırlı alan, (b) sabit (c) rastgele

Endüstriyel ölçüm uygulamalarında kullanılan ve iş parçasını ölçüm bölgesine yönlendiren piston veya iticilerin konumsal hassasiyeti nedeniyle, iş parçaları her seferinde aynı noktaya konumlandırılmamaktadır. Bu sebepten iş parçalarını tamamen aynı noktada konumlandırmak çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Yapılan deneylerin gerçekçi olabilmesi açısından sabit konumlanmanın yanı sıra rastgele konumlanma ve sınırlı bölgede konumlanma deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile parçanın az ve fazla hareket ettiği gerçek uygulamalar incelenmiştir



Şekil 1. Deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneği tasarımı



Şekil 3. Görüntü işleme adımları

Her üç deney için de dört farklı tipteki toplam 40 adet pulun her biri için 20 tekrarlı olacak şekilde ölçümler gerçekleştirilmiştir (Tablo 2). Her bir görüntüdeki pulun çap uzunlukları piksel türünden hesaplanmıştır. Elde edilen bütün görüntülerde parçaların hem iç hem de dış çapı görüş alanında olmasından ötürü aynı görüntüler kullanılarak hem iç hem dış çap hesabı gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan pulların adetleri ve özellikleri

İsim	Pul 1	Pul 2	Pul 3	Pul 4
Adet	10	10	10	10
İç Çap Ölçüsü (mm)	9.50	6.20	4.52	11.57
Dış Çap Ölçüsü (mm)	13.92	11.06	7.65	19

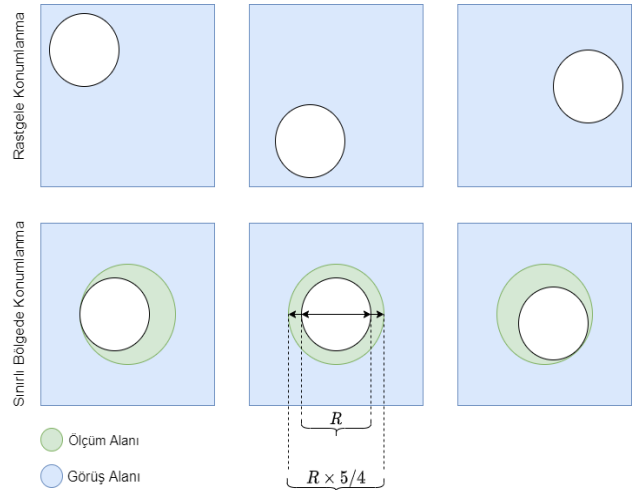
Parçanın kamera altında bulunduğu konuma göre Sabit Konumlama, Rastgele Konumlama ve Sınırlı Bölgede Konumlama olmak üzere üç tipte test gerçekleştirilmiştir. Sabit konumlama testinde kamera altına konulan parça yerinden hiç hareket ettirilmeden aralarında 1'er saniyelik bekleme ile 20 adet görüntüsü alınmıştır. Rastgele konulamada parça, kameranın görüş alanında rastgele konumlarda olacak şekilde görüntüsü alınmıştır.

Sınırlı alanda konulamada ise parça, kendisinin çapından 5/4 kadar büyüklükte bir çapa sahip alanda konumlandırılmıştır (Şekil 4). Bu testler sayesinde yüzeyel ışık kaynağı kullanıldığı zaman parça konumunun ölçüme ne kadar etki ettiği tespit edilmiştir. Sınırlı Bölgede Konumlama testinde amaç parçanın tanımlanan alan içerisinde olduğu durumdaki ölçüm sonuçlarını gözlemlemektir. Bunu sağlayabilmek adına ölçülecek parçanın çapının 5/4 kadar büyüklükte bir çapa sahip sanal daire oluşturulmuştur. İş parçası, oluşan bu sanal daire içerisinde yer değiştirilerek ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle parçanın konumu her seferinde birbirlerine yakın olmakta ve endüstriyel koşullar sağlanabilmektedir

Deney Prosedürü:

1. Lens takılır,

2. Parçaya göre lensin uzaklığı ayarlanır ve sabitlenir,
3. Parça kameranın görüş alanında olmak üzere:
 - 3.1 Test-1 için rastgele konumlanarak,
 - 3.2 Test-2 için sabit konumlanarak,
 - 3.3 Test-3 için sınırlı bölgede konumlanarak 20'şer adet görüntüsü alınır,
- 4 Görüntü işleme algoritması uygulanarak çap değeri piksel türünden elde edilir,



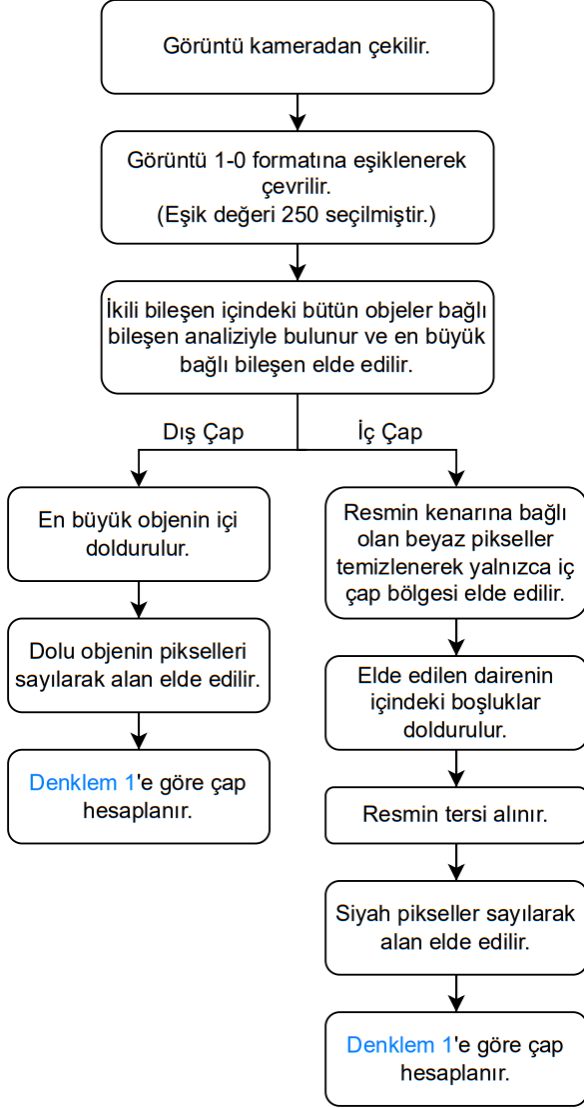
Şekil 4. Rastgele konumlama ve sınırlı bölgede konumlama için ölçüm alanları

- 5 Aynı parça için elde edilen 20 adet çaptan maksimum ve minimum arasındaki fark belirlenir.
- 6 Bu işlem seçilen 4 türden toplam 40 adet parçanın her birinin iç ve dış çapı için uygulanır.

2.2 Alan tabanlı ölçüm algoritması

Oluşturulan düzener ile elde edilen görüntüler her ne kadar görüntüsüz beklense de resim üzerinde ölçüm camının kirli olmasından, tozdan ya da kamera sensörünün hatasından ötürü bazı ufak boyutlarda (1-25 piksel) siyah bölgeler oluşmaktadır. Bu sebeple nihai bir ürün oluşturulduğunda camın sürekli temiz kalması

beklenmemelidir. Dolayısıyla etraftaki tozdan, kirden ya da öngörülemeyecek gürültülerden kaynaklanan hataları giderebilmek için bütün-bağlı bileşen analizine dayalı ön bir görüntü işleme adımı benimsenmiştir (Şekil 3).



Şekil 5. Görüntü işleme algoritması akış diyagramı

Resimdeki bütün bağlı bileşenler eşikleme işleminden sonra belirlenir. Ardından iç ve dış çap için ayrı olacak şekilde en büyük bağlı bileşen seçilerek istenen daire seçilmiş olunur. Elde edilen görüntülerde en büyük bağlı bileşenin iş parçası olduğu varsayılmıştır. Elde edilen görüntüden hem iç hem de dış çap için çap ölçümü alana bakılarak tahmin edilebilmektedir. Görüntü işleme algoritması akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 3'te verilen D_i parçanın iç çapını, D_d ise parçanın dış çapını göstermektedir. Görüntü üzerindeki yuvarlak bir parçanın çapı D tahmin edilirken, Denklem 1'de verilen alan A ve pi sayısı kullanılmaktadır. 1 denklemindeki değerler piksel cinsindedir.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (1)$$

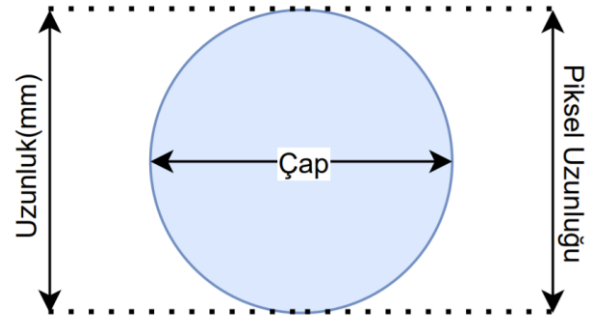
Alan tabanlı yaklaşım tercih edilerek ölçüm hassasiyetinin 1 pikselin altına inmesi amaçlanmıştır. Böylelikle hem iki nokta arası ölçüme göre daha hassas ölçüm yapılabilmekte hem de iş parçasının bölgesel değişkenliklerinden etkilenmemektedir. Ayrıca ön işleme adımıyla ham görüntüdeki istenmeyen etkilerden büyük oranda sıyrılmaktadır. Bu çalışmada siyah-beyaz özellikli bir kamera kullanıldığından RGB renk kanallarından gri seviyeye çevirme adımı eklenmemiştir. Araştırmacılar renkli kamera tercih etmesi durumunda gri seviyeye çevirerek ölçüm gerçekleştirebilir. Önerilen yöntem, resimdeki istenmeyen gürültüleri bağlı bileşen analiziyle gidermesi ve endüstriyel şartlara uygun olması açısından yenilik barındırmaktadır. Araştırmacılar, önerilen yaklaşımdaki ön işleme adımlarını kendi yöntemlerini geliştirmek için de tercih edebilirler

2.3 Kamera-lens ikilisinin ölçüm belirsizliği

Bir objenin boyutunu kameralı sistemlerde ölçerken genellikle gerçek boyutu bilinen bir referans parçasına ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçek boyutu bilinen bir parça görüntüsünün resim üzerinde kaç adet piksel karşılık geldiği bir eşikleme işlemiyle bulunabilmektedir. Bu değer kullanılarak mm/piksel değeri Denklem 2'deki gibi hesaplanmaktadır. Kameranın görüş alanı ve çözünürlüğü en temelde ölçüm hassasiyetini mm türünden belirlemektedir. Bu hassasiyet 1 piksel karşılık gelen mm türünden ifade edilecek olursa şu şekilde yazılabilir:

$$mm/piksel = \frac{Uzunluk}{Piksel Sayısı} \quad (2)$$

Buradaki *Uzunluk*, değeri bilinen parçanın mm türünden çapı, *Piksel Uzunluğu* ise mm değeri bilinen parçanın piksel türünden uzunluğudur (Şekil 6). Örneğin 20 mm lik çapa sahip bir parçanın karşılık gelen piksel değeri 2000 piksel olduğunda *mm/piksel* değeri $20 / 2000 = 0.01$ mm yani 10 mikrondur. Bu değer sistemin 1 pikselde değiştiği uzunluk ve kamera-lens ikilisinin 1 pikseldeki değişimini verir.



Şekil 6. Değeri bilinen parça ile mm/pikselin hesaplanması

Ayrıca parça boyutundan bağımsız, kamera çözünürlüğüne ve kameranın görüş alanına bağlıdır. **Denklem 2** kullanılarak 1 piksele karşılık gelen mm mesafesi bulunmaktadır. $mm/piksel$ değeri bulunduktan sonra eğer kamera ile obje arasındaki mesafe sabitse gerçek boyutu bilinmeyen bir nesnenin boyutu tahmin edilebilmektedir. **Denklem 2**'deki $mm/piksel$ oranı bilindiği durumda mm cinsinden gerçek ölçüm **Denklem 3** kullanılarak tahmin edilmektedir.

$$Tahmini\ mm = D \times \frac{mm}{piksel} \quad (3)$$

Burada D değeri, algoritmanın tahmin ettiği piksel türünden uzunluğu, $mm/piksel$ kamera-lens ikilisinde 1 piksele karşılık gelen mm değerini ve Tahmini mm bulunan tahmini gerçek ölçüm sonucunu göstermektedir. $mm/piksel$ oranı donanım özelliğinden, D değeri yazılımdan gelmektedir. Dolayısıyla sabit bir donanımda D değerinin hassaslaştırılması algoritmanın başarısını arttırmaktadır. Önerilen alan tabanlı yöntemde bütün pikseller hesaba katıldığından ölçüm hassasiyetinde 1 pikselin altına inmemize olanak sağlamaktadır. Algoritmanın ne oranda 1 pikselden daha hassas belirsizliği olduğunu bulabilmek için alt hesaplama metriği baz alınmıştır.

2.4 Alt hesaplama metriği

Makine görmesi uygulamalarında ölçüm gerçekleştirilirken genellikle kullanılan yaklaşım iki nokta arasındaki mesafenin ölçülmesidir. Dolayısıyla ölçüm hatası 1'er piksel artar ya da azalır. Bu durumda ölçüm belirsizliği 1 pikseldir. Birim piksele karşılık gelen gerçek ölçüm değeri ise seçilen lens ve kameraya bağlı olarak **Denklem (2)**'deki gibi hesaplanabilmektedir. Ancak sistemin yaklaşık ölçüm hatasını tespit edebilmek için gerçek ölçüsü bilinen birçok parça ile tekrarlanabilirlik testi yapılması gerekmektedir. Bu durum her kamera-lens ikilisinde tekrarlanmalıdır. Ölçüm hassasiyeti gelişmiş algoritmalarda 1 pikselin altına inebilmektedir. Ölçüm hassasiyetinin ne oranda 1 pikselin altına indiğini gösteren metrik alt hesaplama metriği C olarak tanımlanabilir. C değeri tekrarlanabilirlik testleriyle belirlenmektedir (**Şekil 7**). Aynı iş parçasının tekrarlı ölçümlerindeki piksel türünden ölçüm farkı, bize $1/C$ değerini vermektedir (**Denklem 4**).

$$Maksimum\ Ölçüm - Minimum\ Ölçüm = \frac{1}{C} \quad (4)$$

Dolayısıyla alt hesaplama metriğinin 5 olduğu bir yöntemde ölçüm hassasiyeti 0.2 pikseldir. Alt hesaplama metriği C olmak üzere sistemin ölçüm belirsizliği mm cinsinden şu şekilde yazılabilir:

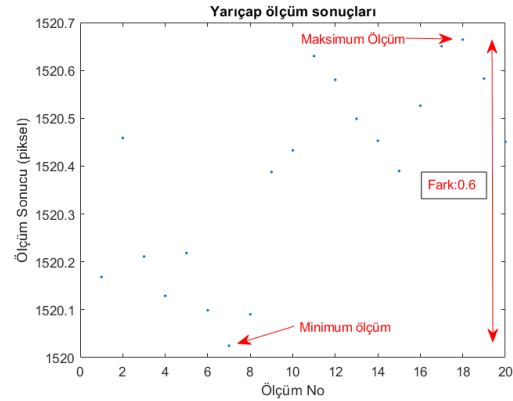
$$Belirsizlik = \frac{mm}{piksel} \div C \quad (5)$$

C değeri kameradan ve lensten bağımsız olarak sadece ölçüm algoritmasına bağlıdır. Bu değer bize sistemin ölçüm

belirsizliğini direkt olarak piksel türünden verecektir. C değeri, ölçüm algoritmasının ne oranda 1 pikselin altına inemediğini göstermektedir. Ayrıca bu değer kullanılarak, oluşturulacak yeni bir makine görmesi sisteminde olması gereken $mm/piksel$ oranını önceden belirlemek mümkündür. Bu durum seçilecek kamera-lens ikilisinin uygun maliyetlerde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, ± 0.050 mm toleranslara sahip 20 mm çapındaki yuvarlak bir pul parçası için belirsizliğin en az ± 0.005 mm (onda biri) olması gerekir. Donanım özelliğinden gelen $mm/piksel$ oranının 0.025 olması durumunda istenen toleransın ölçülebilmesi için C değerinin 5 olması gerekir.

3 Bulgular ve tartışma

Seçilen her bir pul parçasının 20'şer kez Sabit Konumlama, Rastgele Konumlama ve Sınırlı Bölgede Konumlama olmak üzere görüntüleri alınmıştır. Önerilen yöntem bu görüntüler üzerinde çalıştırılarak çap değerleri piksel türünde üretilmiştir. Örnek ölçüm sonucu **Şekil 7**'de gösterilmiştir. Her bir pul parçasının ölçümünde elde edilen maksimum ve minimum çap ölçümleri arasındaki fark hesaplanmıştır. Bu fark ölçümün tekrarlanabilirlik hatasını göstermektedir.



Şekil 7. Piksel cinsinden örnek çap ölçüm sonuçları (20 tekrar)

Örneğin **Şekil 7**'de verilen ölçümler için çap maksimum 1520.6 iken minimum ölçülen çap 1520.0 pikseldir. Yirmi ölçüm için sistemin ölçüm hatası 0.6 piksel olarak belirlenebilir. Çünkü aynı sistemle benzer konumda çekilen aynı pul için 0,6 piksellik bir fark oluşmuştur. Örneği verilen bu test toplamda 4 türden 40 adet pul için gerçekleştirilip sonuçları elde edilmiştir (**Tablo 3-4-5-6-7-8**). Parça isimleri Tip1, Tip2, Tip3 ve Tip4 olarak isimlendirilmiştir. **Tablo 3-4-5-6-7-8**'de 20 tekrarlı ölçümler için aralarında en çok ölçüm farkı bulunan parçanın fark değeri koyu olarak belirtilmiştir.

Ölçüm sonuçlarına göre iç ve dış çap ölçümlerinde özellikle rastgele konumlama büyük bir farklılık bulunmaktadır. Gerçekleştirilen deneylerde yüzey ışık kaynağı kullanılması nedeniyle kameraya gelen gölgenin boyutu konuma bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim ölçüm farklarına sebep olmaktadır. Parçaların iç çapları doğal olarak dış çaplarından küçük olduğu için parça hareket miktarı değişmektedir

Tablo 3. Rastgele konumlamada iç çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.59	0.23	0.65	0.40	0.24	0.35	0.42	0.79	0.43	0.24	0.29
2	0.42	0.42	0.43	0.43	0.50	0.36	0.40	0.64	0.34	0.33	0.28
3	0.43	0.34	0.29	0.51	0.45	0.37	0.28	0.79	0.31	0.26	0.26
4	0.37	0.36	0.36	0.49	0.46	0.21	0.34	1.02	0.45	0.24	0.25
5	0.41	0.46	0.69	0.39	0.36	0.24	0.37	0.72	0.34	0.21	0.26
6	0.57	0.47	0.48	0.50	0.36	0.24	0.41	1.15	0.36	0.30	0.34
7	0.58	0.50	0.65	0.35	0.66	0.36	0.31	0.80	0.28	0.31	0.80
8	0.31	0.44	0.70	0.35	0.56	0.35	0.44	1.03	0.27	0.29	0.31
9	0.52	0.53	0.36	0.37	0.36	0.69	0.34	0.75	0.29	0.26	0.21
10	0.44	0.43	0.45	0.36	0.37	0.42	0.40	0.59	0.27	0.26	0.35
Ort.	0.46	0.42	0.51	0.41	0.43	0.36	0.37	0.83	0.34	0.27	0.33

Tablo 4. Rastgele konumlamada dış çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.39	0.36	0.48	0.50	0.82	0.22	0.56	0.96	0.84	0.80	0.62
2	0.36	0.27	0.19	0.43	1.34	0.26	0.24	0.94	0.80	1.09	0.46
3	0.31	0.34	0.23	0.66	0.91	0.30	0.37	0.82	1.05	0.96	0.58
4	0.21	0.26	0.25	0.59	1.20	0.30	0.22	1.46	1.32	0.61	0.61
5	0.24	0.61	0.39	0.44	0.81	0.26	0.56	0.88	0.94	0.64	0.71
6	0.19	0.35	0.43	0.69	1.01	0.25	0.23	1.02	1.22	0.94	0.89
7	0.30	0.53	0.56	0.43	1.30	0.71	0.17	1.41	0.82	1.38	0.41
8	0.26	0.36	0.49	0.49	0.98	0.32	0.25	1.17	0.90	0.89	0.77
9	0.40	0.48	0.28	0.21	0.94	0.57	0.30	1.40	1.20	1.26	0.60
10	0.29	0.37	0.40	0.41	0.83	0.29	0.31	1.03	0.90	0.96	0.59
Ort.	0.29	0.39	0.37	0.48	1.01	0.35	0.32	1.10	1.00	0.95	0.63

Tablo 5. Sabit konumlamada iç çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.06	0.07	0.03	0.03	0.02	0.03	0.09	0.05	0.03	0.03	0.03
2	0.06	0.04	0.02	0.05	0.03	0.03	0.12	0.03	0.02	0.03	0.04
3	0.04	0.05	0.03	0.03	0.01	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.02
4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04	0.08
5	0.05	0.10	0.03	0.07	0.04	0.05	0.07	0.03	0.03	0.03	0.08
6	0.08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06	0.09	0.05	0.05	0.04
7	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.07	0.11	0.07	0.04	0.05	0.02
8	0.08	0.07	0.03	0.02	0.02	0.06	0.05	0.05	0.02	0.04	0.03
9	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	0.05	0.09	0.06	0.03	0.02	0.05
10	0.04	0.13	0.03	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.03	0.02	0.03
Ort.	0.05	0.06	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.05	0.03	0.04	0.04

Tablo 6. Sabit konumlamada dış çap için maks ve min ölçüm farkları

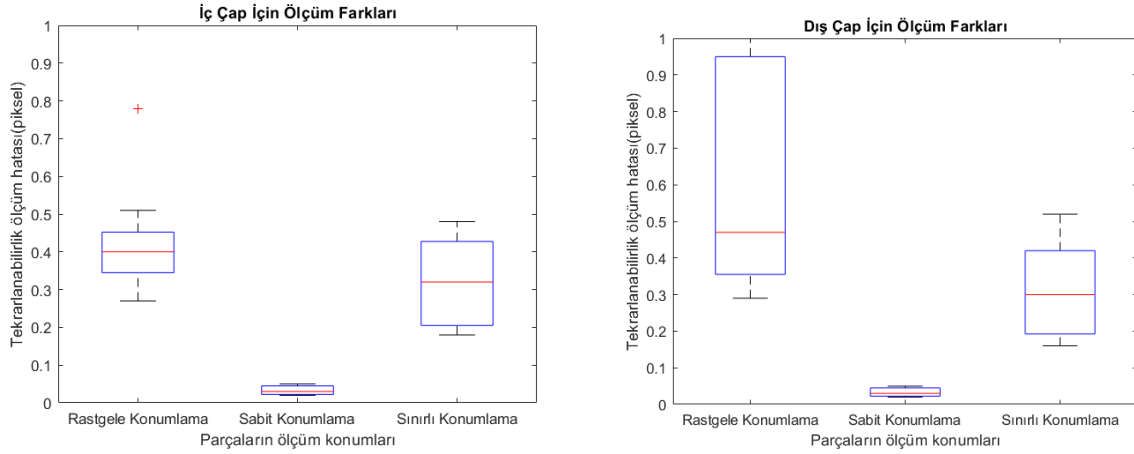
Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.10	0.10	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.04	0.02	0.04
2	0.05	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
3	0.02	0.04	0.02	0.06	0.01	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04
4	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
5	0.03	0.10	0.03	0.08	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03
6	0.08	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02
7	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
8	0.07	0.08	0.02	0.02	0.02	0.06	0.03	0.03	0.06	0.02	0.02
9	0.05	0.04	0.02	0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03
10	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.09	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03
Ort.	0.05	0.05	0.02	0.04	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03

Tablo 7. Sınırlı bölgede konumlama için iç çap için maks ve min ölçüm farkları

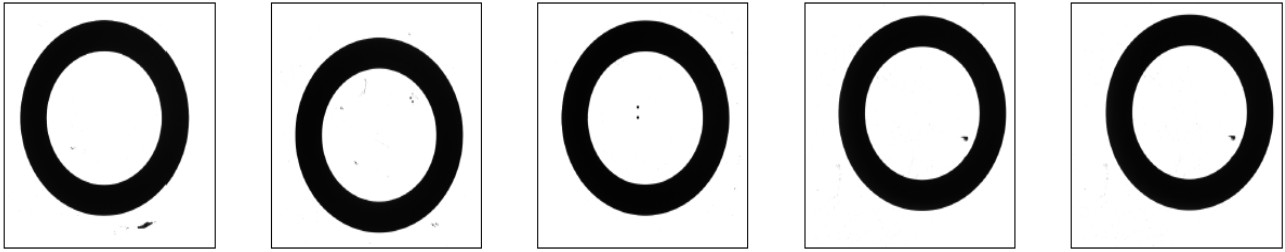
Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.43	0.50	0.20	0.36	0.17	0.08	0.21	0.21	0.26	0.31	0.11
2	0.57	0.29	0.25	0.33	0.14	0.15	0.22	0.15	0.40	0.86	0.60
3	0.38	0.28	0.47	0.38	0.16	0.26	0.12	0.16	0.37	0.41	0.65
4	0.51	0.29	0.44	0.67	0.31	0.16	0.25	0.50	0.27	0.56	0.57
5	0.57	0.18	0.20	0.63	0.17	0.22	0.23	0.25	0.40	0.49	0.41
6	0.35	0.51	0.18	0.51	0.17	0.18	0.18	0.15	0.64	0.17	0.40
7	0.32	0.27	0.40	0.45	0.16	0.18	0.18	0.26	0.82	0.20	0.44
8	0.28	0.27	0.37	0.34	0.22	0.18	0.15	0.20	0.41	0.40	0.64
9	0.50	0.44	0.40	0.30	0.12	0.15	0.26	0.17	0.39	0.34	0.54
10	0.38	0.15	0.35	0.40	0.29	0.19	0.21	0.20	0.23	0.44	0.51
Ort.	0.43	0.32	0.32	0.44	0.19	0.18	0.2	0.22	0.42	0.42	0.48

Tablo 8. Sınırlı bölgede konumlama için dış çap için maks ve min ölçüm farkları

Parça No	Lens-1				Lens-2				Lens-3		
	Tip1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 1	Tip 2	Tip 3
1	0.35	0.42	0.24	0.25	0.21	0.25	0.15	0.12	0.20	0.20	0.34
2	0.40	0.31	0.17	0.55	0.15	0.24	0.24	0.14	0.42	0.56	0.56
3	0.31	0.36	0.28	0.55	0.19	0.12	0.10	0.12	0.28	0.39	0.96
4	0.48	0.35	0.45	0.62	0.20	0.21	0.19	0.18	0.32	0.53	0.35
5	0.38	0.14	0.23	0.70	0.31	0.17	0.19	0.25	0.33	0.69	0.42
6	0.30	0.33	0.16	0.73	0.18	0.10	0.17	0.20	0.41	0.41	0.55
7	0.25	0.20	0.43	0.50	0.20	0.17	0.11	0.24	0.44	0.29	0.36
8	0.40	0.12	0.24	0.40	0.22	0.16	0.20	0.12	0.14	0.57	0.77
9	0.37	0.32	0.45	0.41	0.16	0.26	0.14	0.13	0.43	0.29	0.36
10	0.35	0.12	0.32	0.46	0.21	0.18	0.18	0.16	0.19	0.53	0.49
Ort.	0.36	0.27	0.30	0.52	0.20	0.19	0.16	0.17	0.42	0.42	0.52



Şekil 8. Piksel türünden ortalama çap ölçüm belirsizliği. (Tablo 3-4-5-6-7-8’deki ortalama verilerden elde edilmiştir.)



Şekil 9. Deneysel düzeneğinden elde edilen kirli görüntüler

Parçalar hareket ettiğinde iç çaplar dış çaplara göre daha az hareket etmektedirler. Bu sebepten ötürü dış çap ölçüm farkı iç çap ölçüm farkına göre daha yüksek olmaktadır. Bu çalışmada ele alınan parçalar için, Tablo 3-4-5-6-7-8’in ortalama verileri Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8’de rastgele konumlanmış parçaların iç çap ölçüm hassasiyetleri ortalama olarak 0.4 civarında toplanmışken, yine rastgele konumlanmış parçaların dış çap ölçüm hassasiyetleri ortalama 0.5 olup 0.9-1 piksele kadar çıkmaktadır. Eğer yalnızca iç çap ölçümü yapılacaksa rastgele konumlama durumunda bile hassasiyet 0.4 piksel mertebesinde kalmıştır.

Parçanın, kameranın görüş alanındaki değişen konumu ne kadar az ise ölçüm hassasiyeti o kadar iyi olmaktadır. Ölçümün tekrarlanabilirliği irdelendiğinde, ölçüm hassasiyetini düşürmek için parçanın her seferinde dar bir bölge içerisinde konumlandırılması gerektiği belirlenmiştir. Ayrıca maksimum hassasiyetin aynı konumdaki ölçümlerde elde edilebildiği gözlemlenmiştir. İç çap ölçümünde Rastgele Konumlama için ortalama belirsizlik 0.4 piksel mertebesinde kümelenmiş iken, Sınırlı Bölgede Konumlama için yapılan ölçümlerde ortalama belirsizlik 0.3 piksel mertebesinde, maksimum değerleri aynı olacak şekilde sıfıra doğru yayılmıştır. En büyük fark ise dış çaplar için Rastgele Konumlama ve Sınırlı Bölgede Konumlama ölçümlerinde gözlemlenmiştir. Dış çap için Rastgele Konumlama ölçümlerinde 1 piksele yakın bir belirsizlik görülmekte iken bu durum Sınırlı Bölgede Konumlama ölçümlerinde 0.3 piksel civarına inmektedir. Sabit Konumlama ölçümlerinde parça hiç hareket ettirilmeden 20’şer defa pozlandıktan,

bu ölçümler endüstriyel uygulamada karşılığı olmayan kontrollü bir test özelliği taşımaktadır. Buna rağmen, parça hareketinin sıfır olduğu durumda inebileceğimiz minimum değeri gösterdiği için referans teşkil etmektedir.

Tablo 9. Alt hesaplama metriğinin konumlama türüne göre ortalama değerleri (büyük olan iyidir)

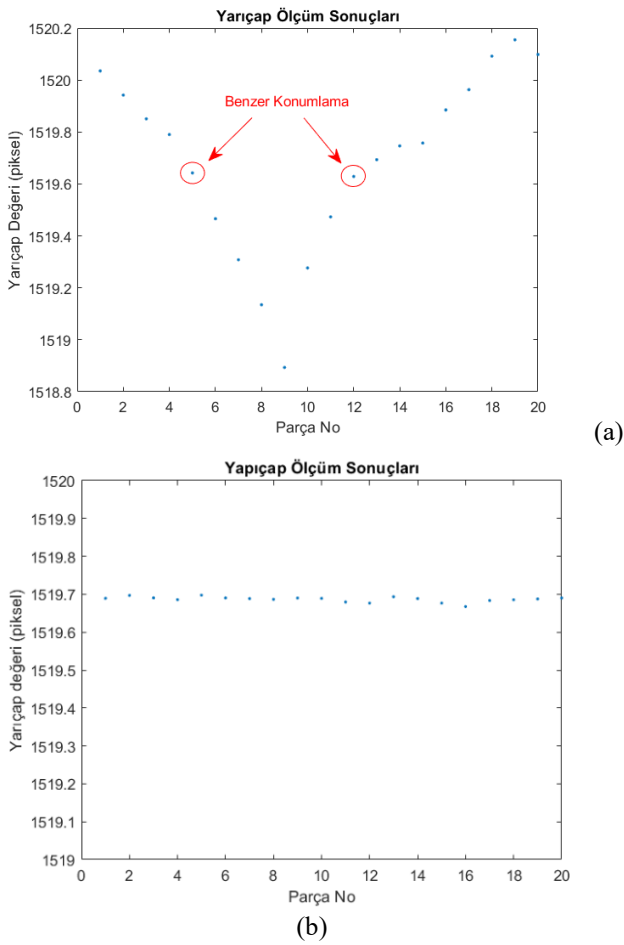
(C)	Sabit Konumlama	Sınırlı Bölgede Konumlama	Rastgele Bölgede Konumlama
İç Çap	25.0	3.12	2.32
Dış Çap	33.3	3.12	1.58

Ek olarak Tablo 3-4-5-6-7-8 için alt hesaplama metrikleri (C), Tablo 9’da verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre Sabit Konumlama için C değeri 25-33 mertebelerinde iken Rastgele konumlama 1.5-2 mertebelerine kadar düşmektedir. Gerçek endüstriyel ortamı modelleyen sınırlı bölgede konumlama testlerinde sonuçlar önem arz etmektedir. Sınırlı bölgede konumlama testlerinde alt hesaplama metriğinin 3 mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir. Mekanik olarak konumlanın daha da hassas olabileceği bir tasarım gerçekleştirilebilirse C değerinin 25-30 mertebelerine kadar çıkabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Önerilen algoritma, alan hesabına dayalı bir ölçüm gerçekleştirdiğinden parça kenarında bulunabilecek birkaç piksel boyutundaki çapak veya tozlardan

etkilenmemektedir. Ayrıca içerisinde bulundurduğu bağlı bileşen analiziyle, alınan görüntüdeki toz, kir, yağ vb. gürültüler (Şekil 9) otomatik olarak giderilmektedir.

3.1 Parça konumunun çap ölçüm hassasiyetine etkisi

Rastgele Konumlanma testlerinde çap ölçüm hassasiyetinin 1 pikseli aşabileceği yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Hata oranının yüksek olduğu bu parçalar ve resimleri incelendiğinde birbirine yakın konumdaki parçaların ölçüleri arasındaki farkın 0.1-0.2 piksel gibi değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumu gösterebilmek adına 1 parça için sabit konumda olduğu çap ölçüm sonuçları ile sistematik bir düzen içinde konumlanarak ölçülen görüntülerin çap değerleri görselleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Pulun bir çizgi üzerinde hareket ettiği ve sabit kaldığı durumlardaki ölçüm sonuçları (a) pulun bir çizgi üzerinde önce soldan sağa, ardından sağdan sola hareket ettirildiği durum (b) pulun hareket etmediği durum

4 Sonuç

Bu makalede endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilir alan tabanlı bir çap ölçüm algoritması önerilmiştir. İki temel adımdan oluşan yöntemde istenmeyen gürültüyü giderebilmek için ilk olarak bağlı bileşen analizine dayalı ön işleme uygulanmaktadır. İkinci olarak oluşan dairenin çapı alan formülüne göre

hesaplanmaktadır. Test ortamı için bir adet endüstriyel tipli kamera, üç adet telesentrik lens ve bir adet yüzeysel aydınlatma kullanılmıştır. Toplamda 40 adet pul parçasının çapları 3 farklı konumlama tipine göre önerilen algoritma ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarda iç çap ölçümlerinin dış çap ölçümlerine göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca rastgele konumlamada 0.5 piksel, sabit konumlamada 0.02 piksel tekrarlanabilirlik hassasiyetine erişildiği gözlemlenmiştir. Endüstriyel ortamın modellenmesi olan sınırlı alanda konumla testinde ise 0.33 piksel tekrarlanabilirlik hassasiyetine erişilmiştir. Ek olarak alt hesaplama metriği baz alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Alt hesaplama metriğinin dar konumlamada 25, sınırlı alanda konumlandırmada 3 ve sabit konumlandırmada 1.5-2 mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Parça konumunun ölçüm başarısına etkisi ayrıca bir teste incelenmiş ve yakın konumda ölçülen parçaların aynı değeri üretmeye meyilli olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen yöntem mekanik olarak konumlanmanın doğru olduğu sistemlerde yüksek başarımda çalışabileceği gösterilmiştir. Literatürde sanayi ortamına uygulanan alan tabanlı bir ölçüm çap algoritması bulunmamakta olup, bu çalışma ile endüstriyel ortamda gürültüye dayanıklı alan tabanlı yeni bir algoritma önerilmiş ve makine görmesi literatürüne katkı sağlanmıştır. Önerilen yöntemin endüstriyel ortamda rahatlıkla kullanılabilirliği ortaya koyulmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

Kaynaklar

- [1] E.N. Malamas, E.G. Petrakis, M. Zervakis, L. Petit, and J. D. Legat, A survey on industrial vision systems, applications and tools. Image and vision computing, 21(2), 171-188, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X)
- [2] F. Öztürk, M. H. Baş, and S. Kılıç Malzemelerde süneklığın görüntü işleme yöntemiyle ölçülmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(2), 34-42, 2013. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239380>
- [3] H. Bal, Kamera ile görüntü işleme teknikleriyle malzeme tane büyüklüğü analizi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [4] D. K. Moru, and D. Borro, A machine vision algorithm for quality control inspection of gears. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106(1), 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04426-2>
- [5] G. Wei, and Q. Tan, Measurement of shaft diameters by machine vision. Applied optics, 50(19), 3246-3253, 2011. <https://doi.org/10.1364/AO.50.003246>
- [6] M. Eldessouki, S. Ibrahim, and J. Militky, A dynamic and robust image processing based method for measuring the yarn diameter and its variation. Textile Research Journal, 84(18), 1948-1960, 2014. <https://doi.org/10.1177/0040517514530032>



- [7] Q. Chunyang, Z. Liping, and L. Tao, Study on inner diameter measurement of cannon barrel based on image processing. First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control pp. 280-282, 2011. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2011.77>
- [8] R.B. Bayram ve E. Yılmaz, Gömülü sistem tabanlı bir hatalı ürün tespit sistemi. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24(1), 391-400, 2019. <https://doi.org/10.17482/uumfd.525696>
- [9] A.R. Telepatil and S. A. Patil, Parameter estimation of metal blooms using image processing techniques. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2, 3500-3507, 2013.
- [10] O. Cömert, M. Hekim, and A.D.E.M. Kemal, Weight and Diameter Estimation Using Image Processing and Machine Learning Techniques on Apple Images. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 9(3), 147-154, 2017. <https://doi.org/10.29137/umagd.350588>
- [11] S. Abd Kadhum, T.H. Obaida, and H.N. Zugair, Image Processing Techniques for Measuring Diameter Tomato Vegetable Using MATLAB Applications. Asian Journal of Information Technology, 18(1), 28-36, 2019. <https://doi.org/10.36478/ajit.2019.28.36>
- [12] M. Heydari, R. Amirfattahi, B. Nazari, and A. Bastani, Iron ore green pellet diameter measurement by using of image processing techniques. 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) pp. 1-6, 2013. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2013.6599563>
- [13] J.H. Shim, and T.H. Nam, Machine vision based automatic measurement algorithm of concentricity for large size mechanical parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 806, No. 1, p. 012002). 2017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/806/1/012002>
- [14] Q. Tan, Y. Kou, J. Miao, S. Liu, and B. Chai, A Model of Diameter Measurement Based on the Machine Vision. Symmetry, 13(2), 187, 2021. <https://doi.org/10.3390/sym13020187>
- [15] H. Haibing, X. Zheng, J. Yin, and Y. Wang, Research on O-ring Dimension Measurement Algorithm Based on Cubic Spline Interpolation. Applied Sciences, 11(8), 3716, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11083716>
- [16] X. Xie, S. Ge, M. Xie, F. Hu, and N. Jiang, An improved industrial sub-pixel edge detection algorithm based on coarse and precise location. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 11(5), 2061-2070, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01232-2>
- [17] X. Yan, G. Jing, M. Cao, C. Zhang, Y. Liu, and X. Wang, Research of Sub-Pixel Inner Diameter Measurement of Workpiece Based on OpenCV. International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS) pp. 370-373, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICRIS.2018.00098>
- [18] Haibing H, Zheng X, Yin J, Wang Y, Research on O-ring Dimension Measurement Algorithm Based on Cubic Spline Interpolation. Applied Sciences 11.8 2021. <https://doi.org/10.3390/app11083716>
- [19] W. Liu, X. Yang, H. Sun, X. Yang, X. Yu and H. Gao, A novel subpixel circle detection method based on the blurred edge model. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 71 pp.1-11 2021. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3130924>





ABER analysis of RIS-aided SSK schemes over Ricean fading channels

RIS-destekli SSK şemalarının Ricean sönümlenmeli kanallardaki ABER analizi

Ayşe Elif Canbilen^{1,*} , Alper Ateş² 

¹ Konya Technical University, Electrical-Electronics Engineering Department, 42250, Konya, Turkey

² Ege University, Electrical-Electronics Engineering Department, 35100, İzmir, Turkey

Abstract

Reconfigurable intelligent surface (RIS) is a promising technology to meet the needs of next-generation wireless communication techniques that enhance the quality of service by effectively adjusting the phases of the signals through a reflective surface. On the other side, space shift keying (SSK), as one of the typical index modulation (IM) techniques, provides data transmission by using only the information of the active transmitting antenna index instead of applying traditional modulation methods. In this study, two of the RIS-assisted SSK schemes are studied to take potential benefits of both RIS and SSK techniques, and the average bit error rate (ABER) performance is investigated over Ricean fading channels. The activated transmitter antenna for each transmission instant is detected by utilizing the maximum likelihood (ML) detection algorithm at the receiver side. The ABER performance of the proposed RIS-based systems in proportion to the increasing number of reflecting elements and Ricean- K factor is presented by both theoretical derivations and computer simulations. The obtained results show that the Ricean- K parameter and the number of reflective elements on the RIS have an undeniable effect on the system performance.

Keywords: Wireless communication, Error performance analysis, Reconfigurable intelligent surface (RIS), Index modulation (IM), Space shift keying (SSK).

1 Introduction

The demand of ultra-high performance communication devices is increasing day by day depending on the advancement of technology. Unfortunately, the conventional communication techniques are inadequate to attain the objectives of the next generation wireless networks, such as ultra-fast data transfer at extremely high frequency bands. This inability of existing communication methods necessitates novel transceiver designs and innovative transmission and modulation techniques. Regarding this, both academic and industrial studies are focused on providing high spectral and energy efficiency for future wireless communication systems.

Accordingly, reconfigurable intelligent surface (RIS) is proposed as a high-potential technology that can satisfy the requirements of 6th generation (6G) wireless communication networks and beyond. An RIS can be simply integrated into

Öz

Uyarlanabilir akıllı yüzey (RIS), yeni nesil kablosuz iletişim tekniklerinin gereksinimlerini karşılamak üzere yansıtıcı bir yüzey üzerinden sinyallerin fazını etkin bir şekilde düzenleyerek hizmet kalitesini artıran umut verici bir teknolojidir. Öte yandan, tipik indis modülasyon (IM) tekniklerinden biri olan uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK), veri iletimi için klasik modülasyon yöntemlerini uygulamak yerine sadece aktif verici anten indisi bilgisini kullanmaktadır. Bu çalışmada, hem RIS hem de SSK tekniklerinin potansiyel avantajlarından yararlanmak için RIS-destekli SSK şemalarından ikisi incelenmekte ve Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki ortalama bit hata oranı (ABER) performansı değerlendirilmektedir. Her iletim anı için aktif edilen verici anten, alıcı tarafta en büyük olabilirlik (ML) sezimi algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Önerilen RIS-tabanlı sistemlerin artan yansıtıcı eleman sayısı ve Ricean- K faktörüne göre ABER performansı, hem teorik türetimler hem de bilgisayar simülasyonları aracılığıyla sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, Ricean- K parametresinin ve RIS üzerindeki yansıtıcı eleman sayısının sistem performansı üzerinde yadsınamaz bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Kablosuz iletişim, Hata performansı analizi, Uyarlanabilir akıllı yüzey (RIS), İndis modülasyonu (IM), Uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK).

the existing wireless communication systems with the ability of effectively controlling and/or manipulating the wireless channel through the phase adjustment, which provides considerable enhancement in overall system performance [1]. Specifically, it reveals the ability of using wireless channels in the most efficient way by making changes in the amplitude and/or phase of the radio signals [2].

Multiple-input multiple-output (MIMO) systems, which conventionally configure a separate RF chain for each antenna, are also proposed as a key physical layer solution to increase spectral efficiency [3]. However, a larger number of RF chain increases the cost of both the RF circuit and wireless cellular networks [4]. Additionally, hundreds or even thousands of antennas are simultaneously being activated in massive MIMO systems, and that causes a significant increment in the energy consumed by the RF chain [5]. Besides, a larger number of selected/activated antennas increases the power required by processing

* Corresponding author, e-mail: aecanbilen@ktun.edu.tr (A. E. Canbilen)

Received: 15.05.2022 Kabul / Accepted: 22.09.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1116897

activities [6]. Hence, to overcome that power consumption, finding new solutions with limited RF chain and active antenna number becomes an emerging challenge for the future wireless communication systems.

At this point, index modulation (IM) techniques, in which data bits are transmitted using IM bits as well as modulation bits [7], are promising. More specifically, spatial modulation (SM) and its simplified version, spatial shift keying (SSK), convey information via activating only one transmitter antenna during each transmission slot. Thus, the transceiver requires only one RF chain at the transmitter side for each transmission instant [8]. Hereby, the communication is completed without inter-channel interference and receiver complexity.

Recently, the researchers investigate the potential of RIS assisted IM schemes, which retain the advantages of both IM and RIS. The first RIS-SSK/SM schemes were introduced only about two years ago [8], which shows that further investigations are required to gain a clear understanding about their full potential. An energy-efficient RIS-based SSK scheme was introduced in [9] considering Rayleigh fading channels to provide reliable transmission and avoid synchronization and interference problems by exploiting the SSK at the transmitter side. Another RIS-aided SSK scheme that grants knowledge of the active antenna index at the RIS and achieves passive beamforming, was also proposed in [10].

In wireless communications, the combination of constructive and destructive effects stemming from randomly delayed, reflected, scattered and refracted signal components cause multipath fading. Depending on the nature of the propagation environment, there are different models describing the statistical behavior of this effect. For instance, Rayleigh model is usually preferred for preliminary studies to provide the basis for further theoretical research, since it leads to neat and easy closed-form expressions. Rayleigh is generalized by including a deterministic component providing arbitrary mean values for the complex-valued variables, and called Ricean fading model, which is generally used to model propagation path gains consisting of one strong line-of-sight (LOS) component and many other random weak components [11].

In this paper, two of the RIS-assisted SSK MISO transmission schemes are investigated in terms of error probability over Ricean fading channels. Performance analyses are realized by theoretical calculations using maximum likelihood (ML) detection and verified by computer simulations. The obtained results show that including an RIS can provide considerably superior results for traditional SSK schemes depending on the system model.

2 Material and methods

2.1 Channel model

Ricean can be defined as the probability distribution of the magnitude of a non-zero mean circularly symmetric bivariate normal random variable. Following that, a Ricean distributed variable, R , with a noncentrality parameter, $|v|$, and a scale parameter, σ , can be denoted by $R \sim \text{Rice}(|v|, \sigma)$, and has the following probability density function [12]:

$$f(r|v, \sigma) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(r^2 + v^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rv}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

where I_0 is being the modified Bessel function of the first kind with order zero.

Then, the mean value is calculated from the expectation of R , and given as:

$$\mu_R = E\{R\} = \sigma \sqrt{(\pi/2)} L_{1/2}\left(\frac{-v^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

while the variance of R can be written by

$$\sigma_R^2 = 2\sigma^2 + v^2 - \frac{\pi}{2} \sigma^2 L_{1/2}\left(\frac{-v^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

Here, defining $K = v^2/2\sigma^2$ as the Ricean parameter, $L_{1/2}(-K)$ represents the Laguerre polynomial, which can be calculated by utilizing the confluent hypergeometric function of the first kind as $L_{1/2}(-K) = {}_1F_1(-1/2; 1; -K)$ [13].

Now, considering the abovementioned points, the Ricean fading channels can be modeled as follows [14]:

$$h = \Delta h_{det} + \Theta h_{rand}, \quad (4)$$

where h_{det} is a deterministic component related to the LOS path, while h_{rand} is a random component representing the fading of the scattered paths. Here, it should be given that $\Delta = \sqrt{K/(K+1)}$, $\Theta = \sqrt{1/(K+1)}$, and thus, $K = \Delta^2/\Theta^2$. Regarding that, the mean and variance values of a Ricean distributed variable are also written as follows, respectively:

$$\mu_R = \frac{\sqrt{\pi} L_{1/2}(-K)}{2\sqrt{K+1}}, \quad (5)$$

$$\sigma_R^2 = 1 - \frac{\pi L_{1/2}^2(-K)}{4(K+1)}. \quad (6)$$

It is worth noting here that the Ricean fading model turns into the Rayleigh fading model when $K = 0$.

2.2 System model

In this section, the system models of the proposed schemes, namely intelligent and power-sensing RIS-SSK, are presented. The proposed schemes are built on a dual hop scenario in which a base station applying SSK with N_t transmitter antennas and communicating with a single-antenna receiver through an RIS with N reflecting elements on it. The reflection phases of the incoming signals are adjusted by using a communication software so as to maximize the signal-to-noise ratio (SNR) at the receiver side.

2.2.1 Intelligent transmission scheme for RIS-SSK

The transmission model of the intelligent RIS-assisted SSK wireless communication system, which operates similar to that given in [9], is illustrated in Fig. 1. Unlike [9], here, the receiver is assumed to be unaware of the selected reflection phase, which is more practical. Thus, the received unmodulated baseband signal can be written as follows:

$$y = \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N h_{t,i} e^{j\phi_i} g_i \right) + n \quad (7)$$

$$= \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i e^{j(\phi_i - \theta_{t,i} - \varphi_i)} \right) + n.$$

where $t \in \{1, \dots, N_t\}$ is the index of the activated transmitter antenna for data transmission, while $h_{t,i} = \alpha_{t,i} e^{-j\theta_{t,i}}$ and $g_i = \beta_i e^{-j\varphi_i}$ are the channel fading gain between the t^{th} transmit antenna and the reflecting elements, and between the reflecting elements and the receiver antenna, respectively. Additionally, E is the transmitted signal energy and ϕ_i is the adjusted phase for the i^{th} reflector of the RIS. Besides that, $n \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ represents the additive white Gaussian noise (AWGN) with a total noise power of N_0 , while $\mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$ denoting a complex Gaussian random variable with mean μ and variance σ^2 .

Here, it should be noted that the value of the received SNR can be maximized by eliminating the channel phases with the help of the RIS that has the knowledge of the channel phases, as $\phi_i = \theta_{t,i} + \varphi_i$ [9]. Hence, the received signal at the destination can be rewritten as:

$$y = \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) + n. \quad (8)$$

It is worth noting here that the RIS needs to know not only the channel phases, but also the activated transmitter antenna index, which defines the best-case scenario that might be possible when the BS is in the near field of the RIS [9]. Thus, perfect channel state information is assumed to be provided for the RIS via a communication software possibly supported by machine-learning algorithms [15]. On the other hand, a multi-antenna receiver is not a practical scenario for the proposed scheme discussing optimal phase adjustment, since the reflectors can be set at just one specific phase for each reflection.

2.2.2 Power-sensing transmission scheme for RIS-SSK

The transmission model of the power-sensing RIS-assisted SSK wireless communication system is illustrated in Fig. 2. The key strategy of this concept is granting the knowledge of the activated transmitter antenna index at the RIS with the help of the embedded sensors throughout the

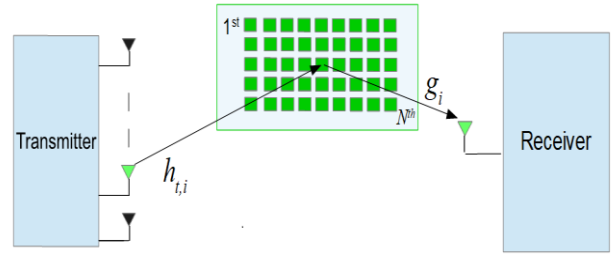


Fig. 1. Transmission scheme of the intelligent RIS-SSK.

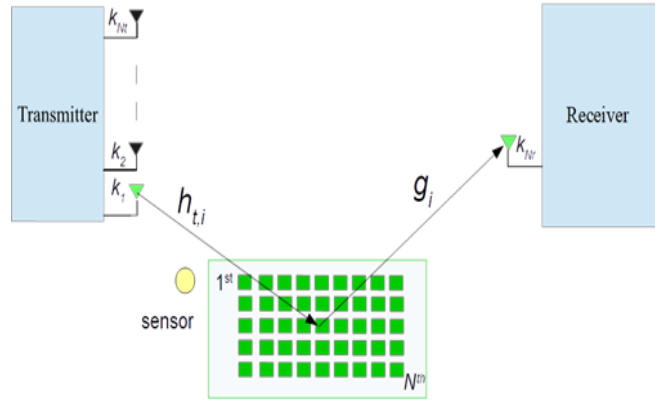


Fig. 2. Transmission scheme of the power-sensing RIS-SSK.

RIS. Here, the transmitter antennas convey the data with different power levels on the condition of a fixed average power, and then the sensors located on the RIS sense the power and adjust the reflection angle for that transmission instant via a communication software.

Accordingly, the received signal can be written by:

$$y = \sqrt{P_t} \left(\sum_{i=1}^N h_{t,i} e^{j\phi_i} g_i \right) + n, \quad (9)$$

where $P_t = k_t E$ is the power of the t^{th} transmitter antenna with a power constant of $k_t = (2t - 1) / N_t$. Remembering that the received SNR should be maximized by utilizing the same method used for the intelligent scheme, i.e., eliminating the channel phases, the received signal can be rewritten as follows:

$$y = \sqrt{P_t} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) + n. \quad (10)$$

2.3 Performance analysis

In this section, analytical derivations of the ABER over Ricean fading channels are presented for both intelligent and power-sensing transmission cases of RIS-aided SSK.

2.3.1 Performance of the intelligent RIS-SSK scheme

In order to determine the index of the activated transmitter antenna at the receiver side, an optimal ML detector is designed for the intelligent RIS-aided SSK scheme as follows:

$$\hat{t} = \arg \min_t \left\{ \left| y - \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) \right|^2 \right\}. \quad (11)$$

Assuming that the unmodulated carrier signal generated by the source is conveyed to the RIS with transmitter antenna t to be reflected to the receiver antenna, however, it has been detected erroneously at the receiver side that the signal was transmitted through the transmitter antenna \hat{t} , the conditional pairwise error probability (CPEP) can be calculated from:

$$\begin{aligned} \Pr\{t \rightarrow \hat{t} | h, g, \phi\} &= \Pr \left\{ \left| y - \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) \right|^2 > \left| y - \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{\hat{t},i} \beta_i \right) \right|^2 \right\} \\ &= \Pr \left\{ \begin{aligned} & -E \left| \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) \right|^2 \\ & -2\Re \left\{ \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) n^* \right\} > 0 \end{aligned} \right\} \\ &= \Pr\{D > 0\}, \end{aligned} \quad (12)$$

where $\Pr\{\cdot\}$ defines the probability of an event and $(\cdot)^*$ represents the complex conjugate, while $\Re\{A\}$ representing the real part of a complex-valued A . From (12), it can be written that

$$\Pr\{t \rightarrow \hat{t} | h, g, \phi\} = P\{D > 0\}, \quad (13)$$

where D is a complex Gaussian random variable that can be given by:

$$D = \left\{ \begin{aligned} & -E \left| \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) \right|^2 \\ & -2\Re \left\{ \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) n^* \right\} \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Here, it can be easily realized that the mean and variance of $D \sim \mathbb{CN}(\mu_D, \sigma_D^2)$ can be defined as follows:

$$\mu_D = -E \left| \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) \right|^2, \quad \sigma_D^2 = -2\mu_D N_0. \quad (15)$$

Considering that, we can rewrite the CPEP given in (12) by using the well-known Q-function as follows [3]:

$$\begin{aligned} \Pr\{t \rightarrow \hat{t} | h, g, \phi\} &= Q \left(\sqrt{\frac{E}{2N_0}} \left| \sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right| \right) = Q \left(\sqrt{\frac{E}{2N_0}} |\Xi|^2 \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Defining $\Lambda = |\Xi|^2$ and considering (16), it can be said that Ξ follows a zero mean Gaussian distribution for reasonably high N values according to Central Limit Theorem (CLT).

Now, realizing that $\alpha_{t,i}$ and β_i in (16) are independent Ricean distributed random variables, the variance of Ξ can be calculated as:

$$\sigma_{\Xi}^2 = 2N \left(1 - \frac{\pi}{4(K+1)} L_{1/2}^2(-K) \right). \quad (17)$$

In order to find the average pairwise error probability (APEP), the following should be calculated:

$$\bar{\Pr}\{t \rightarrow \hat{t} | h, g, \phi\} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} Q \left(\sqrt{\frac{E\Lambda}{2N_0}} \right) f_{\Lambda}(\Lambda) d\Lambda, \quad (18)$$

where $f_{\Lambda}(\Lambda)$ defines the probability density function of Λ . Here, utilizing the CLT by considering (16), it is easy to realize that Λ is a central chi-square random variable with one degree of freedom. Hence, for sake of simplicity, the APEP can be calculated by using the moment-generating function (MGF) of central chi-square distribution [9], which is denoted here by $M_{\Lambda}(\cdot)$, as follows:

$$\begin{aligned} \bar{\Pr}\{t \rightarrow \hat{t} | h, g, \phi\} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_{\Lambda} \left(\frac{-E}{4N_0 \sin^2 \vartheta} \right) d\vartheta \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{d\vartheta}{\sqrt{1 + \frac{NE}{N_0 \sin^2 \vartheta} \left(1 - \frac{\pi}{4(K+1)} L_{1/2}^2(-K) \right)}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Considering that the value of $\sin^2 \vartheta$ in (19) can be 1 at maximum, a closed-form equation can be written for an upper bounded ABER calculation as follows:

$$\bar{\Pr}\{t \rightarrow \hat{t} | h, g, \phi\} \approx \frac{1}{2} \left[1 + \frac{NE}{N_0} \left(1 - \frac{\pi L_{1/2}^2(-K)}{4(K+1)} \right) \right]^{-1/2}. \quad (20)$$

2.3.2 Performance of the power-sensing RIS-SSK scheme

Considering (10), an optimal ML detector, which detects the index of the activated transmitter antenna can be designed for the power-sensing RIS-SSK scheme as follows:

$$\hat{t} = \arg \min_t \left\{ \left| y - \sqrt{P_t} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) \right|^2 \right\}. \quad (21)$$

Assume that the unmodulated carrier signal generated by source is conveyed to the RIS to be reflected to destination with transmitter antenna t ; however, it has been detected erroneously that the signal was conveyed from the transmitter antenna \hat{t} at the destination, the CPEP can be calculated by:

$$\begin{aligned} & \Pr\{t \rightarrow \hat{t} \mid h, g, \phi\} \\ &= \Pr\left\{ \left| y - \sqrt{P_t} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) \right|^2 > \left| y - \sqrt{P_{\hat{t}}} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{\hat{t},i} \beta_i \right) \right|^2 \right\} \\ &= \Pr\left\{ \begin{aligned} & -E \left| \sum_{i=1}^N \beta_i \left(\sqrt{k_t} \alpha_{t,i} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \alpha_{\hat{t},i} \right) \right|^2 \\ & -2\Re \left\{ \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \beta_i \left(\sqrt{k_t} \alpha_{t,i} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \alpha_{\hat{t},i} \right) n^* \right) \right\} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (22) \\ &= \Pr\{F > 0\}, \end{aligned}$$

where $F \sim \text{CN}(\mu_F, \sigma_F^2)$ is a complex Gaussian random variable that can be written as:

$$F = \left\{ \begin{aligned} & -E \left| \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{k_t} \alpha_{t,i} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \alpha_{\hat{t},i} \right) \beta_i \right|^2 \\ & -2\Re \left\{ \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \left(\sqrt{k_t} \alpha_{t,i} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \alpha_{\hat{t},i} \right) \beta_i \right) n^* \right\} \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Here the mean and variance of F can be given respectively by:

$$\mu_F = -E \left| \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{k_t} \alpha_{t,i} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \alpha_{\hat{t},i} \right) \beta_i \right|^2, \quad \sigma_F^2 = -2\mu_F N_0 \quad (24)$$

Considering that, we can rewrite the CPEP given in (22) by using the Q-function as follows:

$$\begin{aligned} & \Pr\{t \rightarrow \hat{t} \mid h, g, \phi\} \\ &= \mathcal{Q} \left(\sqrt{\frac{E}{2N_0}} \left| \sum_{i=1}^N \left(\sqrt{k_t} \alpha_{t,i} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \alpha_{\hat{t},i} \right) \beta_i \right|^2 \right) = \mathcal{Q} \left(\sqrt{\frac{E}{2N_0}} |\Theta|^2 \right). \quad (25) \end{aligned}$$

Defining $\Upsilon = |\Theta|^2$ and considering CLT, it is known that $\Theta \sim \text{CN}(\mu_\Theta, \sigma_\Theta^2)$ for reasonably high N values according to (25). Now, realizing that $\alpha_{t,i}$ and β_i in (25) are independent Ricean distributed random variables, the mean and variance values of Θ can be given as follows, respectively:

$$\mu_\Theta = N \left(\frac{\pi}{4(K+1)} L_{\eta/2}^2(-K) \right) \left(\sqrt{k_t} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \right), \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\Theta^2 &= 2N \left(1 - \frac{\pi}{4(K+1)} L_{\eta/2}^2(-K) \right) \\ &\times \left(\left(k_t + k_{\hat{t}} \right) + \frac{\pi \left(\sqrt{k_t} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \right)^2}{4(K+1)} L_{\eta/2}^2(-K) \right). \quad (27) \end{aligned}$$

In order to find the APEP, (25) can be averaged through the following statement:

$$\overline{\Pr}\{t \rightarrow \hat{t} \mid h, g, \phi\} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \mathcal{Q} \left(\sqrt{\frac{E\Upsilon}{2N_0}} \right) f_\Upsilon(\Upsilon) d\Upsilon, \quad (28)$$

where $f_\Upsilon(\Upsilon)$ is the probability density function of Υ , which is a non-central chi-square random variable with one degree of freedom. Hence, the APEP can be computed by using the MGF of Υ [9], which is denoted here by $M_\Upsilon(\cdot)$, as follows:

$$\begin{aligned} \overline{\Pr}\{t \rightarrow \hat{t} \mid h, g, \phi\} &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty M_\Upsilon \left(\frac{-E}{4N_0 \sin^2 \mathcal{G}} \right) d\mathcal{G} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left(1 + 2\sigma_\Theta^2 \times \frac{E}{4N_0 \sin^2 \mathcal{G}} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ &\times \exp \left(\frac{EN^2 \pi^2 \left(\sqrt{k_t} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \right)^2}{64N_0 (K+1)^2 \sin^2 \mathcal{G}} \times L_{\eta/2}^4(-K) \right) \\ &\times \exp \left(\frac{E}{1 + 2\sigma_\Theta^2 \times \frac{E}{4N_0 \sin^2 \mathcal{G}}} \right) d\mathcal{G}. \quad (29) \end{aligned}$$

Considering that the value of $\sin^2 \mathcal{G}$ in (29) can be 1 at maximum, a closed-form equation can be written for an upper bounded ABER calculation of the power-sensing scheme as:

$$\begin{aligned} \overline{\Pr}\{t \rightarrow \hat{t} \mid h, g, \phi\} &\approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{E\sigma_\Theta^2}{2N_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ &\times \exp \left(\frac{-EN^2 \pi^2 \left(\sqrt{k_t} - \sqrt{k_{\hat{t}}} \right)^2 L_{\eta/2}^4(-K)}{32(K+1)^2 (2N_0 + E\sigma_\Theta^2)} \right). \quad (30) \end{aligned}$$

3 Findings and discussion

In this section, extensive computer simulation results are provided to investigate the ABER performance of the

proposed schemes, namely intelligent and power-sensing RIS-SSK, by using ML detection algorithm. The presented results are obtained by Monte Carlo simulations, and verified by analytical derivations. During the simulations, at least 10^5 symbols have been sent for each SNR value, which is defined as E/N_0 , while $N_t = 2$ without loss of generality.

In Fig. 3, the ABER performance of both the intelligent and power-sensing RIS-aided SSK is presented for a fixed number of transmitter antenna, $N_t = 2$, and a fixed Ricean- K parameter, $K = 10$ dB, and compared to the traditional SSK scheme in [16]. Clearly, the power-sensing RIS-aided SSK achieves the best results. For instance, power-sensing transmission requires approximately 45 dB less SNR than the intelligent RIS-aided SSK to provide that $ABER = 10^{-2}$ for $N = 64$, and it is even less than that for $N = 128$. Additionally, doubling N ensures a much lower ABER with the power-sensing RIS-aided SSK for a fixed value of SNR. For instance, utilizing 128 reflectors instead of 64 provides 6 dB gain in SNR for the power-sensing scheme, while it is only 3 dB for the intelligent case.

Considering (8) and (10), it can be said that this is an expected result, since the power-sensing scheme utilizes not only the spatial information like the intelligent one but also the amplitude information. Clearly, cancelling all the channel phases in the intelligent scheme reduces the distinctness of the channels, which means limiting the performance of the SSK. Another important remark related to Fig. 3 can be that the CLT approach, which is utilized during the analytical derivations, is proved to be significantly accurate, as the analytical and simulation results match perfectly.

In Fig. 4, the ABER performance of the intelligent RIS-aided SSK scheme is investigated for various values of K . It is observed that decreasing the value of the Ricean factor from $K = 10$ dB to $K = 3$ dB ensures 5 dB gain in SNR. As can be seen from this figure, Ricean fading has more destructive effects on the system performance of the intelligent RIS-aided SSK compared to Rayleigh fading.

Contrary to this, it is seen from Fig. 5 that the power-sensing RIS-SSK performs better over Ricean fading channels, and it provides 3 dB gain in SNR when the Ricean parameter increases from 3 to 10 dB. Additionally, considering both Figs. 4 and 5, it is obvious that the exact ABER values are in compliance with their upper bounds, which are derived in (20) and (30) for the intelligent and power-sensing schemes, respectively.

Noting that the LOS component increases SNR value but reduces spatial diversity, it can be seen from (4) that increasing K parameter makes the LOS component more effective. Therefore, increasing K has a destructive effect on the performance of the intelligent scheme, since it needs a rich scattering environment to achieve a good performance, which highly depends on the distinctness of the channels. On the other hand, the power sensing scheme utilizes not only the spatial information but also the amplitude information, and thus, increasing K enhances its ABER performance.

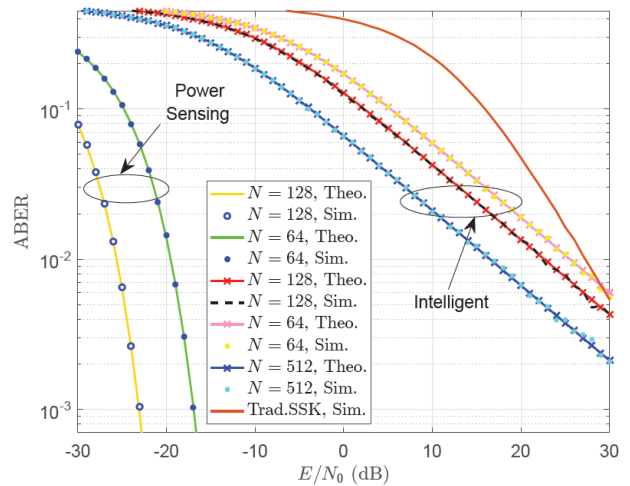


Fig. 3. ABER performance of the proposed RIS-assisted SSK schemes with increasing N for $N_t = 2$ and $K = 10$ dB.

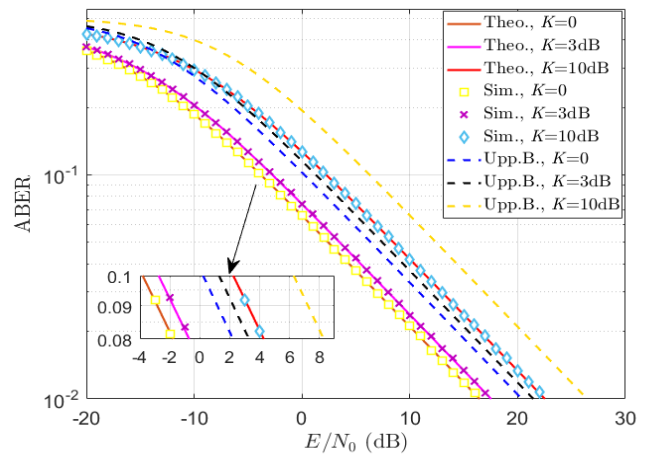


Fig. 4. ABER performance of the intelligent RIS-aided SSK scheme for $N_t = 2$ and $N = 128$ with increasing Ricean factor K .

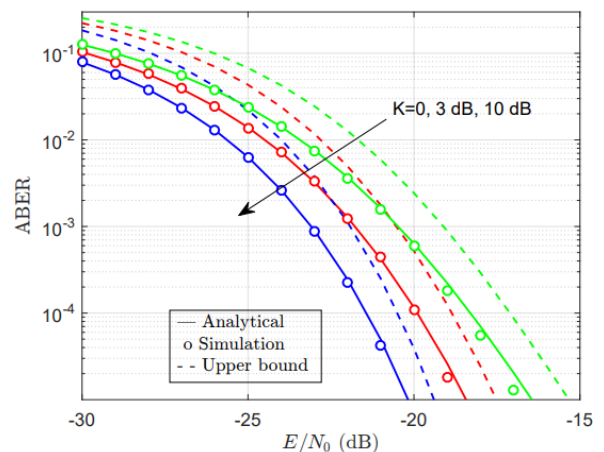


Fig. 5. ABER performance of the power-sensing RIS-aided SSK scheme for $N_t = 2$ and $N = 128$ with increasing Ricean factor K (green: $K=0$, red: $K=3$ dB, blue: $K=10$ dB).

4 Conclusion

The ABER performance of intelligent and power-sensing RIS-assisted SSK schemes are investigated over Ricean fading channels in this study. The obtained results show that utilizing an RIS in SSK by generating an intelligent transmission environment can provide better quality of service, since the intelligent RIS-aided SSK, especially with high number of reflecting elements, achieves a better performance compared to the traditional SSK without an RIS. Furthermore, the power-sensing approach provides extremely superior results for the intelligent RIS-aided SSK scheme. It is observed that channel characteristics have model-specific effects on the service quality of RIS aided schemes. Clearly, further investigations are required to gain a clear understanding about the full potential of the RIS assisted schemes for future communication systems in more challenging channel environments.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Similarity rate: %20

References

- [1] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., 2. Oxford: Clarendon, pp. 68–73, 1892.
- [2] I. S. Jacobs and C. P. Bean, Fine particles, thin films and exchange anisotropy, in Magnetism, 3, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, pp. 271–350, 1963.
- [3] A. E. Canbilen, S. S. Ikki, E. Basar, S. Gültekin, İ. Develi, Joint Impact of I/Q Imbalance and Imperfect CSI on SM-MIMO Systems Over Generalized Beckmann Fading Channels: Optimal Detection and Cramer-Rao Bound. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19 (5), 3034-3046, 2020. <https://doi.org/10.1109/twc.2020.2970002>
- [4] A. Salh, L. Audah, N. S. M. Shah, S.A. Hamzah, Maximizing Energy Efficiency in Downlink Massive MIMO Systems by Full-complexity Reduced Zero-forcing Beamforming. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.1), pp. 33-36, 2018. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.1.19487>.
- [5] J. C. Marinello, T. Abrão, A. Amiri, E. de Carvalho, P. Popovski, Antenna Selection for Improving Energy Efficiency in XL-MIMO Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69 (11), 13305-13318, 2020. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3022708>.
- [6] A. Salh, L. Audah, N.S.M. Shah, S.A. Hamzah, Adaptive Antenna Selection and Power Allocation in Downlink Massive MIMO Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7 (6), 3521-3528, 2017. <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.p3521-3528>.
- [7] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, H. Haas, Index modulation techniques for next-generation wireless networks. *IEEE Access*, 5, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2737528>
- [8] E. Basar, Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G. *IEEE Transactions on Communications*. 68 (5), 3187-3196, 2020. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2971486>
- [9] A. E. Canbilen, E. Basar, and S. S. Ikki. Reconfigurable intelligent surface-assisted space shift keying. *IEEE Wireless Communications Letters*. 9 (9), 1495-1499, 2020. <https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2994930>
- [10] Q. Li, M. Wen, S. Wang, G. Alexandropoulos, Y. Wu and C. Yik. Space shift keying with reconfigurable intelligent surfaces: Phase configuration designs and performance analysis. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2, 322-333, 2021. <https://doi.org/10.1109/OJCOM.S.2021.3057118>
- [11] M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989. <https://doi.org/10.1109/TPC.1983.6448697>
- [12] A. E. Canbilen, Performance analysis of RIS-assisted SM with I/Q imbalance. *Physical Communication*, 49, 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101473>.
- [13] S. Aja-Fernandez and G. Vegas-Sanchez-Ferrero, Statistical Analysis of Noise in MRI. Springer International Publishing, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39934-8>
- [14] M. M. Alwakeel, Quadrature spatial modulation performance analysis over Rician fading channels. *Journal of Communications*. 11 (3), 249-254, 2016. <https://doi.org/10.12720/jcm.11.3.249-254>
- [15] M. K. Simon, Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables: A Handbook for Engineers, Scientists and Mathematicians, Springer, 2006. ISBN:978-0-387-34657-1
- [16] J. Jeganathan and A. Ghayeb. Space shift keying modulation for MIMO channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8 (7), 3692-3703, 2009. <https://doi.org/10.1109/TWC.2009.080910>





Bir lojistik işletmesinde tesis depo performansının Copras ve Topsis yöntemleriyle değerlendirilmesi

Evaluation of facility warehouse performance in a logistics company with Copras and Topsis methods

Merve Er¹ , Selen Avcı Azkeskin^{2,*} , Zerrin Aladağ³ 

^{1,2,3} Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli Türkiye

Öz

Lojistik faaliyetler, işletmelerdeki maliyet kalemleri arasında yer alan en önemli unsurlardan biridir. Yalın üretim felsefesi doğrultusunda, ürün üzerinde maliyet oluşturan tüm kalemler gibi lojistik maliyetler de göz önüne alınmalıdır. Lojistik işletmelerindeki operasyonel işleyiş işletmenin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Lojistik sektöründe depo operasyonlarındaki performans değerlendirmesi, operasyonun sürdürülebilir olması ve sürdürülebilirlik eğiliminin ölçülmesi bakımından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bir lojistik firmasındaki tesis performansı yıllara bağlı olarak Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden COPRAS (Complex Proportional Assessment) ve TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. “Operasyonel hata, müşteri şikâyetleri, kaza sıklık oranı, devamsızlık, işten ayrılma oranı, eğitim oranı, fazla mesai, personel üretkenlik, giriş üretkenlik, çıkış üretkenlik ve zamanında sevk performansı” olarak belirlenen kriterlerin işletme performansını etkileme oranı yine bir ÇKKV yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile belirlenmiştir. Böylece, iki dönemlik periyotlara ayrılan beş yıl karşılaştırılmış ve çeşitli yorumlar yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Performans değerlendirme, Lojistik, Çok kriterli karar verme (ÇKKV), Copras, Topsis

1 Giriş

İşletmeler, her geçen gün artan rekabet ortamında varlıklarını sürdürebilmek için faaliyetlerini en kısa sürede, en az maliyet ile ve en verimli şekilde devam ettirmelidir. Tüketici beklentilerinin hızlı, tüketicinin istediği düzeyde ve en yüksek karlılıkla karşılanması için lojistik ve tedarik zincirinin her unsuru gibi depolama faaliyetleri de dikkatle incelenmelidir. Ürünlerin depoya gelişi, teslim alınması, yerleştirilmesi, siparişin toplanması ve nihai teslim noktasına sevkiyatının gerçekleştirilmesi gibi ana başlıklardan oluşan operasyonların sorunsuz ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir [1]. İşletmeler hem bu operasyonların etkinliğini hem de çalışanların performanslarını belirli zaman aralıklarında değerlendirmeli ve bu değerlendirmelere göre gereken önlemleri almalıdır [2].

Abstract

Logistics processes are one of the most important elements among the cost items in companies. The operational treatment of logistics companies directly influences the efficiency of the business. Performance evaluation in the logistics companies is important in terms of sustainability of the operation and measuring the sustainability trend. In this study, facility performance that depending on years, in a logistics company has analyzed comparatively with COPRAS (Complex Proportional Assessment) and TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) methods, which are among the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques. The criteria have determined as operational error, customer complaints, accident frequency rate, absence, turnover rate, training rate, overtime, staff productivity, input productivity, output productivity and on-time dispatch performance. The weights of these criteria have calculated with the Analytical Hierarchy Process (AHP), which is also a MCDM method. Thus, we have compared five years consisting of nine periods and have made various evaluations.

Keywords: Performance evaluation, multi-criteria decision making (MCDM), logistics, Copras, Topsis

Performans değerlendirme ve buna bağlı olarak daha etkin süreçlerinin tanımlanması, işletmelerin rekabet üstünlüğü sağlayabilmesi için önemlidir. Bu değerlendirme ile sistemde iyileştirmeler yapılabilir ve nihai olarak sistem verimliliğini artırmak hedeflenir. Ele alınması gereken tüm kriterlerin değerlendirmeye dâhil edilmesi daha doğru sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır. Kriterlerden bazılarının birbirleriyle çelişmesi ya da bazılarının fayda bazılarının maliyet yönlü olması da mümkündür. Bu nedenle performans değerlendirme bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemi olarak ele alınabilir [3]. Bu konu, problemin yapısına ve sürecin özelliklerine göre farklı ÇKKV yöntemleriyle literatürde birçok çalışmada yer bulmuştur [4]. Tablo 1’de bu çalışmalardan bazıları özetlenmiştir.

Tablo 1. Performans değerlendirme ile ilgili literatür incelemesi

Yazarlar	Konu	Yöntemler	Gösterge
Ömürbek vd. [3]	Türkiye Kömür İşletmeleri	AHP, MULTIMOORA, COPRAS	Performans değerlendirme
Özbek [5]	Türkiye Diyanet Vakfı	COPRAS ve TOPSIS	Yıllara göre performans değerlendirme
Ömürbek vd. [6]	Büyük ölçekli bankalar	Entropi, ARAS ve COPRAS	Sürdürülebilirlik performansı
Topak ve Çanakçıoğlu [7]	Türkiye’de faaliyet gösteren bankalar	Entropi ve COPRAS	Finansal performans
Çınaroğlu [8]	Fortune 500 listesinde bulunan ve 2017 yılı net satış miktarına göre ilk 10 otomotiv firması	SWARA ve COPRAS	Performans değerlendirme
Özbek [9]	İlkokul Öğretmenleri Sağlık ve Sosyal Yardım Sandığı (İLKSAN)	ELECTRE III (Elimination and Choice Translating Reality English), COPRAS ve TOPSIS	Finansal performans
Erdoğan ve Yamaltdınova [10]	Borsa İstanbul’da (BIST) kote olmuş turizm şirketleri	TOPSIS	Dönemlik finansal performans
Tufan ve Kılıç [11]	BIST’te yer alan lojistik sektöründeki işletmeler	VIKOR (ViseKriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje) ve TOPSIS	Finansal durum performansları
Stanujkic vd. [12]	Sırbistan’daki bankalar	COPRAS	Performans değerlendirme
Rabbani vd. [13]	Petrol üretimi yapan şirketler	COPRAS yöntemini baz alan yeni bir model	Performans değerlendirme
Jothimani ve Sarmah [14]	Üçüncü parti lojistik firmaları	TOPSIS	Tedarik zinciri performansı
Ding ve Zeng [15]	Çin’de yer alan 68 üniversite	TOPSIS	Performans değerlendirme
Çakır ve Perçin [16]	İlk 500 firma arasında yer alan lojistik işletmeleri	CRITIC (Kriterler arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önem Tespiti), SAW (Simple Additive Weighting), TOPSIS	Performans değerlendirme
Özgel vd. [17]	Henkel Firması	Entropi	Sosyal sürdürülebilirlik
Ulutaş ve Karaköy [18]	G-20 ülkeleri	WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment)	Lojistik performans endeksi

Bu çalışmada, bir lojistik firmasındaki depo operasyonlarının zamana bağlı performansı ÇKKV yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), COPRAS (Complex Proportional Assesment – Karmaşık Nisbi Değerlendirme) ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity) yöntemleri ile analiz edilmiştir. “Operasyonel hata, müşteri şikâyetleri, kaza sıklık oranı, devamsızlık, işten ayrılma oranı, eğitim oranı, fazla mesai, personel üretkenlik, giriş üretkenlik, çıkış üretkenlik ve zamanında sevki performansı” olarak belirlenen performans kriterleri öncelikle AHP ile ağırlıklandırılmış, ardından zaman periyotları hem minimize hem de maksimize edilmesi gereken problemlere uygun bir yöntem olan COPRAS ve literatürde sıralama problemlerinde sıklıkla kullanılan TOPSIS yöntemleriyle değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Analitik hiyerarşi prosesi (AHP)

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), nitel ya da nicel farklı kriter ve alternatifler söz konusu olduğunda karar vericinin; önceliklerini, değerlendirmelerini ve deneyimlerini karar

verme sürecine mantıksal bir yaklaşımla dâhil edebilmesi amacıyla Saaty tarafından geliştirilmiştir [19] [20]. AHP, karar vericinin sezgisel yargılarının tutarlılığının hesaplanmasına da imkân veren güçlü ve kolay bir yöntemdir [21] [22].

Yöntemin adımları aşağıda kısaca açıklanmıştır:

Adım 1: Kriterler ve alternatifler tanımlanarak hiyerarşik yapı kurulur.

Adım 2: Tablo 2’de sunulan ve Saaty tarafından literatüre kazandırılan ölçek kullanılarak ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur.

Adım 3: Karşılaştırma matrisi normalize edilir.

Adım 4: Karşılaştırılan öğelere dair öncelik vektörleri hesaplanır.

Adım 5: Öncelikler elde edildikten sonra, karar vericinin ikili karşılaştırmalar sırasında tutarlı olup olmadığı tutarlılık oranı hesaplanarak ölçülür. Bunun için öncelikle “Tutarlılık indeksi (CI)” hesaplanır. Ardından, CI’nın rassallık indeksine (RI) oranı hesaplanır ve “tutarlılık oranı (CR)” elde edilir. CR’nin 0,1’den daha az olması gerekir. Eğer CR 0,1’den fazla ise karar vericiden karşılaştırmasını gözden geçirmesi istenir [20] [23] [24].

Tablo 2. Saaty ölçeği

Numerik Değerler	Tanımlar
1	Uysurlar eşit önemdedir.
3	1. unsur 2. unsura göre biraz daha tercih edilmektedir ya da 1. unsur 2. unsurdan biraz daha önemlidir.
5	1. unsur 2. unsura fazla tercih edilmektedir ya da 1. unsur 2. unsurdan fazla önemlidir
7	1. unsur 2. unsura çok fazla tercih edilmektedir ya da 1. unsur 2. unsurdan çok fazla önemlidir
9	1. unsur 2. unsura aşırı derecede tercih edilmektedir ya da 1. unsur 2. unsurdan aşırı derecede önemlidir.
2, 4, 6, 8	Ara değerler

2.2 COPRAS (Complex Proportional Assessment)

COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi, Zavadskas ve Kaklauskas [25] tarafından literatüre kazandırılmıştır [25]. Yöntem; çok sayıda alternatif içeren problemlere rahatlıkla uygulanabilmesi, hesaplama kolaylığı, minimize ve maksimize edilmesi gereken kriterleri birlikte değerlendirebilmesi, kalitatif (nitel) ve kantitatif (nicel) kriterlere uyarlanabilmesi gibi özellikleri ile literatürde farklı karar problemlerinde sıklıkla kullanılmıştır [26]. Alternatifler sıralanırken kriterlerin birbirine göre ne kadar iyi ya da kötü olduğunu yüzdesel olarak ifade eden COPRAS yönteminin hesaplama süresi kısa ve kullanımı da basittir. COPRAS ile kriter ağırlıkları hesaplanmadığı için yöntemde kriter ağırlıkları karar vericiler tarafından subjektif olarak belirlenebilir ya da yöntem AHP, Analitik Ağ Prosesi (ANP) ya da Entropi gibi kriter ağırlıklandırması sağlayan bir başka ÇKKV yöntemi ile hibrit şekilde kullanılabilir [27]. COPRAS yönteminde öncelikle kriterler, alt kriterler ve alternatifler belirlenir. Ardından A_i , i . alternatif ($i= 1,2, \dots, m$), K_j , j . değerlendirme kriteri ($j= 1,2, \dots, n$), W_j , j . değerlendirme kriterinin ağırlığı ($j= 1,2, \dots, n$) ve X_{ij} , j . değerlendirme kriteri açısından i . alternatifin değeri olmak üzere aşağıdaki adımlar izlenir [26].

1. x_{ij} değerlerinden oluşan D karar matrisi oluşturulur.

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \cdot & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \cdot & X_{2n} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \cdot & X_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{m1} & X_{m2} & X_{m3} & \cdot & X_{mn} \end{bmatrix}$$

2. **Denklem (1)** yardımıyla normalize edilmiş karar matrisi elde edilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \forall i = 1,2, \dots, n \quad (1)$$

3. Her bir kriterin ağırlık değeri (W_j) ile normalize edilmiş karar matrisi kullanılarak, D' olarak simgelenen ve

d_{ij} elemanlarını içeren ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur (**Denklem (2)**).

$$D' = [d_{ij}] = x_{ij}^* \times w_j \quad (2)$$

4. Kriterler artan ve azalan kriterler olarak iki gruba ayrılır. Artan kriterler amaç doğrultusunda daha yüksek değerlerin daha iyi durumu gösterdiği ve azalan kriterler ise amaç doğrultusunda daha düşük değerlerin daha iyi durumu gösterdiği kriterlerdir. Sonrasında, $i=1,2, \dots, n$ artan kriterler ve $j= n+1, n+2, \dots, n$ azalan kriterler olmak üzere, artan kriterler için **Denklem (3)**; azalan kriterler için **Denklem (4)** kullanılır.

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (3)$$

$$S_i^- = \sum_{j=k+1}^n d_{ij} \quad (4)$$

5. Her alternatif için Q_i göreceli önem değeri **Denklem (5)** ile hesaplanır. Göreceli önem değeri en büyük olan alternatif en iyi alternatiftir.

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- * \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_i^-}} \quad (5)$$

6. Göreceli önem değerleri arasından en yüksek olanı **Denklem (6)** ile bulunur.

$$Q_{maks} = \text{en büyük } \{Q_i\} \quad \forall i = 1,2, \dots, m \quad (6)$$

7. Her alternatif için P_i performans indeksi **Denklem (7)** ile hesaplanır. P_i performans indeksi 100 olan alternatif en iyi alternatifi ifade etmekte olup indeks değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanmasıyla alternatiflerin tercih sıralaması oluşturulur.

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{maks}} \times 100 \quad (7)$$

2.3 TOPSIS (Technique for order of preference by similarity to ideal solution)

Bir ÇKKV yöntemi olan TOPSIS, Hwang ve Yoon (1981) tarafından çözüm alternatifinin negatif-ideal çözüme en uzak ve pozitif-ideal çözüme en yakın mesafede olması gerektiği temel prensibi baz alınarak geliştirilmiştir [28]. Pozitif ideal çözüme yakınlık, eğer kriter fayda özelliğine sahip ise getirinin maksimizasyonu ve maliyetin (zararın) minimizasyonunu; kriter maliyet özelliğine sahip ise tam tersini ifade eder. Yöntem, uygulama adımları ve sonuçların yorumlanması bakımından kolay olması nedeniyle birçok karar problemine başarıyla uygulanmıştır. Kriter ağırlıkları

karar vericinin subjektif yargılarıyla ya da başka bir ÇKKV yöntemiyle elde edilebilir [29].

TOPSIS metodunda aşağıdaki adımlar izlenir [30]:

1. Alternatifler (a_1, a_2, \dots, a_n) ve her bir kriterin alternatiflere göre gösterdikleri özellikler ($y_{1k} \dots y_{nk}$) sıralanır. Buna göre karar matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$D = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1k} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2k} \\ y_{31} & y_{32} & \dots & y_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nk} \end{bmatrix}$$

2. **Denklem (8)** kullanılarak karar matrisi normalize edilir ve R matrisi oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ r_{31} & r_{32} & \dots & r_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nk} \end{bmatrix}$$

3. W_j her bir j . kriterin ağırlığı olmak üzere, R matrisinde yer alan sütun değerleri ağırlıklar ile çarpılarak ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi V oluşturulur.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1k} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2k} \\ v_{31} & v_{32} & \dots & v_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nk} \end{bmatrix}$$

4. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin en iyi performans değerleri pozitif ideal çözüme; en kötü performans değerleri ise negatif ideal çözüme oluşturur. i fayda (maksimizasyon), j ise maliyet (minimizasyon) değerini göstermek üzere **Denklem (9)** ve **Denklem (10)** yardımıyla ideal çözümler hesaplanır. $A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_k^*\}$ ve $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_k^-\}$ şeklinde gösterilebilir.

$$A^* = \left\{ (\max_i v_{ij} \mid j \in I), (\min_i v_{ij} \mid j \in J) \right\} \quad (9)$$

$$A^- = \left\{ (\min_i v_{ij} \mid j \in I), (\max_i v_{ij} \mid j \in J) \right\} \quad (10)$$

5. Her bir alternatifin pozitif ideal çözümden uzaklığı **Denklem (11)**, negatif ideal çözümden olan uzaklığı ise **Denklem (12)** ile hesaplanır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (11)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (12)$$

6. **Denklem (13)** kullanılarak ideal çözüme göreli yakınlık değeri C_i^* hesaplanır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad (13)$$

7. Alternatifler ideal çözüme göreli yakınlık (C_i^*) değerlerine göre sıralanır.

3 Vaka çalışması

Bu çalışmada, bir lojistik firmasındaki tesis performansı ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Öncelikle, kriter ağırlıkları AHP ile hesaplanmış, sonrasında COPRAS yöntemi kullanılarak 2017-2021 yılları arasındaki dönemsel performanslar değerlendirilmiştir. Son olarak, TOPSIS yöntemi ile karşılaştırmalı analiz yapılmıştır.

3.1 Kriterlerin belirlenmesi

Kriterler, tesiste kullanılan performans parametreleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Tesisin genel katma değerli işlemleri olan “personel üretkenlik, giriş üretkenlik, çıkış üretkenlik ve zamanında sevk performansı” parametrelerinin yanı sıra tesisin bütününe oluşturan diğer parametreler “operasyonel hata, müşteri şikâyetleri, kaza sıklık oranı, devamsızlık, işten ayrılma oranı, eğitim” ve “fazla mesai” de değerlendirmeye alınmıştır. Söz edilen kriterler ve tipleri **Tablo 3**'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Kriterler ve kriter tipleri

Kriterler	Kriter Tipi
OH (Operasyonel Hata)	Azalan
MŞ (Müşteri Şikâyetleri)	Azalan
KSO (Kaza Sıklık Oranları)	Azalan
D (Devamsızlık)	Azalan
İAO (İşten Ayrılma Oranları)	Azalan
EO (Eğitim Oranı)	Artan
FM (Fazla Mesai)	Azalan
PÜ (Personel Üretkenlik)	Artan
GÜ (Giriş Üretkenlik)	Artan
ÇÜ (Çıkış Üretkenlik)	Artan
ZSP (Zamanında Sevk Performansı)	Artan

Her bir kritere dair hesaplama ayrıntıları **Tablo 4**'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Performans parametreleri ve birimleri

Kriter	Birim/Açıklama
Operasyonel Hata	Adet
Müşteri Şikayetleri	Adet
Gerçekleşen Kaza Sıklık Oranı	Depoda Gerçekleşen İş Kazası Sayısı / Toplam Çalışma Saati (h)
Devamsızlık	Puantajdaki Toplam Gelmeme Saatleri / Puantajdaki Çalışılması Gereken Saat
İşten Ayrılma Oranı	Kendi İsteği İle İşten Ayrılan Personel Sayısı (İstifa) / Aylık Toplam Personel Sayısı
Eğitim Oranı	Aylık toplam mavi + beyaz yaka eğitim saati / Toplam mavi + beyaz yaka çalışan sayısı
Fazla Mesai	Aylık Toplam Fazla Mesai Saati / Aylık Toplam Çalışma Saati
Personel Üretkenlik	Toplam Aylık Giriş & Çıkış (Mal Kabul + Sevk) Ürün Adedi / Aylık Toplam Personel Çalışma Saati
Giriş Üretkenlik	Toplam Aylık Giriş (Mal Kabul) Ürün Adedi / Aylık Giriş Süreçleri Toplam Çalışılan Saat
Çıkış Üretkenlik	Toplam Aylık Çıkış (Sevk) Ürün Adedi / Aylık Çıkış Süreçleri Toplam Çalışılan Saat
Zamanında Sevk Performansı	Zamanında Sevk Edilen Araç Sayısı / Toplam Sevk Edilen Araç Sayısı

Tablo 5. Karar matrisi

Dönem	OH	MŞ	KSO	D	İAO	EO	FM	PÜ	GÜ	ÇÜ	ZSP
2017-1	1.94	0.60	0.10	1.92	0.04	3.11	0.05	21.38	1.57	1.41	0.85
2017-2	2.04	0.55	1.91	5.42	0.05	0.20	0.26	19.95	1.69	1.78	0.82
2018-1	1.61	0.53	8.47	0.07	0.03	2.88	0.01	17.77	1.32	1.34	0.84
2018-2	1.98	0.61	18.11	0.09	0.01	10.52	0.02	10.40	1.25	1.33	0.81
2019-1	0.39	0.10	9.80	0.04	0.00	9.41	0.02	6.81	1.40	1.40	0.80
2019-2	0.10	0.01	9.10	0.10	0.03	25.50	0.03	6.29	1.30	1.20	0.81
2020-1	1.55	0.50	7.30	7.89	0.01	15.79	0.01	5.24	0.92	1.10	0.75
2020-2	0.20	0.90	4.20	0.50	0.02	39.38	0.03	6.57	1.49	1.47	0.90
2021-1	0.93	0.94	0.10	1.80	0.01	6.24	0.03	6.59	1.37	1.33	0.77

Tablo 6. İkili karşılaştırma matrisi

Kriter	OH	MŞ	KSO	D	İAO	EO	FM	PÜ	GÜ	ÇÜ	ZSP
OH	1.00	7.00	3.00	3.00	5.00	7.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
MŞ	0.14	1.00	3.00	3.00	3.00	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.14
KSO	0.33	0.33	1.00	3.00	3.00	7.00	5.00	3.00	3.00	3.00	3.00
D	0.33	0.33	0.33	1.00	9.00	3.00	3.00	3.00	2.00	3.00	3.00
İAO	0.20	0.33	0.33	0.11	1.00	3.00	3.00	3.00	2.00	3.00	3.00
EO	0.14	0.20	0.14	0.33	0.33	1.00	3.00	7.00	5.00	7.00	5.00
FM	0.33	0.33	0.20	0.33	0.33	0.33	1.00	4.00	5.00	5.00	4.00
PÜ	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.14	0.25	1.00	5.00	5.00	0.17
GÜ	0.33	0.33	0.33	0.50	0.50	0.20	0.20	0.20	1.00	5.00	5.00
ÇÜ	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.14	0.20	0.20	0.20	1.00	7.00
ZSP	0.33	7.00	0.33	0.33	0.33	0.20	0.25	6.00	0.20	0.14	1.00

3.2 Karar matrisinin oluşturulması

Karar matrisindeki veriler, 2017, 2018, 2019, 2020 ve 2021 yıllarının 6 aylık dönemlerinde gerçekleşen verilerden elde edilmiştir. Tesiste, siparişlerin fazla olduğu dönemlerde fazla mesai oranlarının artması, toplu işe alımların olduğu dönemlerde verilen eğitimlerin artması, siparişlerin belli dönemlerde kesilmesinden dolayı üretkenlik oranlarının azalması gibi değişkenliklerin fazla olması nedenlerle performans değerlendirme yıl sonu beklenmeden, 6 aylık dönemlerde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle çalışmada 1 yıl, 6 aylık 2 döneme ayrılmıştır. Karar matrisi **Tablo 5**'te verilmiştir.

3.3 İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması

Kriterler, depo süreçlerinden sorumlu 6 uzman tarafından karşılaştırılmıştır. Örnek olarak, bir karar verici tarafından oluşturulmuş ikili karşılaştırma matrisi **Tablo 6**'da gösterilmiştir.

3.4 Kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Kriter ağırlıkları **Tablo 7**'de gösterilmiştir. Tabloya göre, ağırlığı en yüksek kriter operasyonel hata; ağırlığı en düşük kriter ise zamanında sevk performansdır.

Ağırlık oranı en yüksek olan operasyonel hata kriterinin diğer kriterler ile olan ilişkisini daha detaylı incelemek ve hangi kriterlerin daha etkili olduğunu tespit edip bu doğrultuda gerekli önlemleri almak için **Tablo 8**'de korelasyon analizi yapılmıştır. **Tablo 8**'e göre operasyonel hata ile eğitim oranı arasında negatif çok güçlü bir ilişki, operasyonel hata ile fazla mesai ve işten ayrılma oranı arasında ise negatif güçlü bir ilişki vardır.

Tablo 8. Korelasyon değerleri

Kriterler	OH	MŞ	KSO	D	İAO	EO	FM	PÜ	GÜ	ÇÜ	ZSP
OH	1.00	0.38	-0.03	-0.13	-0.60	-0.90	-0.77	-0.36	-0.38	-0.20	0.51
MŞ	0.38	1.00	0.53	-0.02	-0.25	-0.44	-0.55	-0.20	-0.46	-0.45	-0.31
KSO	-0.03	0.53	1.00	0.22	0.33	-0.18	-0.42	-0.34	-0.37	-0.27	-0.56
D	-0.13	-0.02	0.22	1.00	0.07	-0.18	-0.27	-0.25	-0.18	-0.13	-0.34
İAO	-0.60	-0.25	0.33	0.07	1.00	0.60	0.28	-0.07	-0.01	0.02	-0.37
EO	-0.90	-0.44	-0.18	-0.18	0.60	1.00	0.84	0.42	0.28	0.08	-0.18
FM	-0.77	-0.55	-0.42	-0.27	0.28	0.84	1.00	0.73	0.49	0.26	-0.17
PÜ	-0.36	-0.20	-0.34	-0.25	-0.07	0.42	0.73	1.00	0.30	-0.16	-0.21
GÜ	-0.38	-0.46	-0.37	-0.18	-0.01	0.28	0.49	0.30	1.00	0.77	-0.25
ÇÜ	-0.20	-0.45	-0.27	-0.13	0.02	0.08	0.26	-0.16	0.77	1.00	-0.10
ZSP	0.51	-0.31	-0.56	-0.34	-0.37	-0.18	-0.17	-0.21	-0.25	-0.10	1.00

Tablo 7. Kriter ağırlıkları

Kriterler	Ağırlık Oranı (W_i)
OH	0.20
MŞ	0.13
KSO	0.13
D	0.11
İAO	0.07
EO	0.09
FM	0.07
PÜ	0.05
GÜ	0.05
ÇÜ	0.04
ZSP	0.07

3.5 COPRAS yöntemi ile sıralamanın elde edilmesi

Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra sırasıyla; normalize karar matrisi, ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi, her alternatif için artan (S_i^+) ve azalan (S_i^-) kriterler ve seçeneklerin göreceli önem değerleri (Q_i) hesaplanmıştır. Sonrasında, en yüksek göreceli önem değeri Q_{maks} tespit edilmiş ve alternatifler için performans indeksi olan P_i değerleri hesaplanmıştır. Tablo 9'da 2017-2021 yılları arasındaki P_i değerleri gösterilmiştir.

Tablo 9. COPRAS ile sıralama

Dönemler	Q_i	P_i	Sıralama
2017-1	1.093	60.775	6
2017-2	0.839	46.639	9
2018-1	1.152	64.067	5
2018-2	1.017	56.548	7
2019-1	1.799	100.000	1
2019-2	1.534	85.308	3
2020-1	0.863	47.984	8
2020-2	1.539	85.538	2
2021-1	1.160	64.491	4

Tablo 9'a göre, 2019 yılı 1. dönemi performans değeri en yüksek dönem, 2017 yılı 2. dönemi ise performans değeri en düşük dönem olarak belirlenmiştir. 2017 yılı 2. döneminde yeni tesis devreye alındığından, artan hacimle birlikte operasyonel hata oranlarının da artmasının ve devamsızlık oranının yüksek olmasının bu sonuçta etkili olduğu söylenebilir.

3.6 TOPSIS yöntemi ile sıralamanın elde edilmesi

TOPSIS yöntemi uygulanırken; Tablo 5'te verilen karar matrisinin oluşturulmasından sonra sırasıyla normalize karar matrisi, ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi, fayda ve maliyet kriterlerine göre pozitif ve negatif ideal çözümler, pozitif ideal ve negatif ideal noktalara olan uzaklık değerleri ve ideal çözüme göreli yakınlık C_i^* değeri hesaplanmıştır. Tablo 10'da TOPSIS yöntemiyle elde edilen sıralama ve COPRAS yöntemiyle karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 10. Yöntemlerin karşılaştırılması

Dönemler	TOPSIS			COPRAS	
	S_i^+	S_i^-	C_i	Sıralama	Sıralama
2017-1	0.106	0.142	0.571	6	6
2017-2	0.140	0.113	0.448	9	9
2018-1	0.095	0.139	0.593	5	5
2018-2	0.136	0.123	0.476	7	7
2019-1	0.055	0.164	0.750	1	1
2019-2	0.068	0.163	0.705	2	3
2020-1	0.123	0.109	0.469	8	8
2020-2	0.096	0.153	0.614	4	2
2021-1	0.080	0.154	0.659	3	4

Tablo 10'a göre her iki yöntemde de 2019 yılı 1. dönemi en yüksek performanslı dönem; 2017 yılı 2. dönemi ise en düşük performanslı dönem olarak tespit edilmiştir. 2019 yılı 2. döneminin COPRAS yönteminde 3., TOPSIS yönteminde 2.; 2020 yılı 2. döneminin COPRAS yönteminde 2., TOPSIS

yönteminde 4. ve 2021 yılı 1. döneminin COPRAS yönteminde 4., TOPSIS yönteminde 3. olması dışında sıralamalarda farklılık yoktur.

4 Sonuç ve öneriler

Lojistik sektöründe depo operasyonlarındaki performans değerlendirmesi, operasyon etkinliğinin ölçülmesi ve takibi bakımından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, bir lojistik firmasındaki yıllara bağlı tesis depo performansı ÇKKV tekniklerinden COPRAS ve TOPSIS yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. “Operasyonel hata, müşteri şikâyetleri, kaza sıklık oranı, devamsızlık, işten ayrılma oranı, eğitim oranı, fazla mesai, personel üretkenlik, giriş üretkenlik, çıkış üretkenlik ve zamanında sevk performansı” olarak belirlenen kriterlerin işletme performansını etkileme oranı AHP ile belirlenmiştir. Ağırlığı en yüksek kriter “operasyonel hata” olarak belirlenmiştir. Bu kriterin diğer kriterler ile ilişkisi incelenmiş ve eğitim oranı ile negatif yönde çok yüksek bir ilişki tespit edilmiştir. Dolayısıyla, personel eğitim oranlarının yetersiz olmasının hataların artmasına sebep olduğu söylenebilir. Ayrıca, fazla mesai ile operasyonel hata arasında yine yüksek negatif ilişki tespit edilmiştir. Fazla mesai arttıkça personellerde yorgunluk oluşması hataların artmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte işten ayrılma oranı ile de orta düzeyde negatif bir ilişki bulunmuştur. İşten ayrılmalar nedeniyle personel sirkülasyonunun artması, yeni personellerin de tecrübesiz olması ve iş başı eğitimlerinin tamamlanmaması hatalara sebebiyet verilebilmektedir. İşletmede hata oranlarının azaltılması için özellikle bu kriterler üzerinde durulması gerekmektedir. Ağırlığı en düşük kriter ise “zamanında sevk performansı” olarak bulunmuştur. Bunun sebebi olarak bu kriterin diğer kriterlerden etkilenebilecek bir kriter olması söylenebilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, COPRAS ve TOPSIS yöntemlerinden benzer sıralamalar elde edilmiştir. İki yöntemde de 2019 yılı ilk dönemi en iyi, 2017 yılı ikinci dönemi ise en düşük performansa sahip yıl olarak tespit edilmiştir. Sıralamalara bakıldığında, 2017 yılından 2019 yılına doğru genellikle artan performans değerlerinin 2019 yılından sonra düşüşe geçtiği söylenebilir. 2017 yılında yeni bir tesis devreye alındığından, artan hacimle birlikte operasyonel hata oranlarının da artmasının ve devamsızlık oranının yüksek olmasının bu sonuçta etkili olduğu söylenebilir. 2019 yılına doğru yeni tesiste düzenin sağlanmasıyla performans yükselmiştir. Ancak, 2020 yılında Yeni Koronavirüs (Covid-19) pandemi sürecinin etkisiyle tedarik ağının bozulması, hasta ve karantinadaki personeller sebebiyle yaşanan gecikmeler, pandemiye bağlı olarak sevkiyatların gecikmesi ve siparişlerin azalması performans düşüklüğüne sebep olmuştur. Nitekim 2021 yılında firmada pandeminin olumsuz etkilerine karşı alınan önlemler, aşılana birey sayısının artması ve hastalığın daha hafif atılmaya başlamasıyla performans tekrar yükselişe geçmiş ancak 2019 yılındaki seviyelere çıkamamıştır. Sonuç olarak bu çalışmada, performans değerlendirmede kullanılabilecek farklı kriterler incelenmiş ve artan-azalan kriterleri ayırt etmede başarılı iki ÇKKV yöntemi ile zaman periyotları performans değerleri bakımından sıralanmıştır. İlerleyen

çalışmalarda, benzer kriterler farklı işletmelerde daha uzun periyotlar için uygulanabilir ve farklı yöntemler ile karşılaştırılabilir.

Çıkar çatışması

Bu çalışmada çıkar çatışması yoktur.

Benzerlik oranı: %13

Kaynaklar

- [1] A. Görener, Depo operatörü lojistik firmasının seçimi için bulanık vikor ve bulanık topsis yöntemlerinin uygulanması. Istanbul University Journal of the School of Business Administration, 42 (2), 2013. <https://www.researchgate.net/publication/350213257>
- [2] M. Sağnak, Depo yeri seçimi: perakende sektöründe melez çok kriterli karar verme uygulaması. Journal of Yaşar University, 15 (59), 615-623, 2020. <https://doi.org/10.19168/jyasar.689277>
- [3] E. Aksoy, N. Ömürbek ve M. Karaatlı, Ahp temelli multimooora ve copras yöntemi ile Türkiye Kömür İşletmeleri'nin performans değerlendirmesi. Hacettepe Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 33 (4), 1-28, 2015. <https://doi.org/10.17065/huiibf.10920>
- [4] K. Yaraloğlu, Performans değerlendirmede analitik hiyerarşi prosesi. Dokuz Eylül Üniversitesi İİBF Dergisi, 16 (1), 12-142, 2001. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/211403>
- [5] A. Özbek, Türkiye Diyanet Vakfı'nın saw, copras ve topsis yöntemi ile performans değerlendirmesi. Yönetim Ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 15 (1), 66-84, 2017. <https://doi.org/10.11611/yead.277484>
- [6] V. Ömürbek, E. Aksoy ve Ö. Akçakanat, Bankaların sürdürülebilirlik performanslarının aras, moora ve copras yöntemleri ile değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi, 8 (19), 14-32, 2017. <https://doi.org/10.21076/vizyoner.329346>
- [7] M. S. Topak ve M. Çanakçıoğlu, Banka Performansının entropi ve copras yöntemi ile değerlendirilmesi: Türk bankacılık sektörü üzerine bir araştırma. Mali Çözüm Dergisi, 29 (154), 107-132, 2019. <http://academicrepository.khas.edu.tr/handle/20.500.12469/3206>
- [8] E. Çınaroğlu, 2019 Fortune 500 listesinde yer alan otomotiv sektörü firmalarının swara destekli copras yöntemi ile değerlendirilmesi. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 9 (2), 593-611, 2019. <https://doi.org/10.18074/ckuüibfd.548359>
- [9] A. Özbek, İlkokul Öğretmenleri Sağlık Ve Sosyal Yardım Sandığı'nın finansal performans analizi. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 7 (1), 1-31, 2017.

- <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/320940>
- [10] M. Erdoğan ve A. Yamaltdinova, Borsa İstanbul'a kayıtlı turizm şirketlerinin 2011-2015 dönemi finansal performanslarının topsis ile analizi. *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 5 (1), 19-36, 2018. <https://doi.org/10.17541/optimum.335722>
- [11] C. Tufan ve Y. Kiliç, Borsa İstanbul'da işlem gören lojistik işletmelerinin finansal performanslarının topsis ve vikor yöntemleriyle değerlendirilmesi. *C.Ü. İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 20 (1), 119-137, 2019. <http://esjournal.cumhuriyet.edu.tr/en/download/article-file/729547>
- [12] D. Stanujkic, B. Dordevic ve M. Dordevic, Comparative analysis of some prominent mcdm methods: a case of ranking Serbian banks. *Serbian Journal of Management*, 8 (2), 213-241, 2013. <https://doi.org/10.5937/sjm8-3774>
- [13] A. Rabbani, M. Zamani, A. Yazdani-Chamzini ve E. K. Zavadskas, Proposing a new integrated model based on sustainability balanced scorecard (SBSC) and MCDM approaches by using linguistic variables for the performance evaluation of oil producing companies. *Expert Systems with Applications*, 41 (16), 7316-7327, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.023>
- [14] D. Jothimani ve S. P. Sarmah, Supply chain performance measurement for third party logistics. *Benchmarking: An International Journal*, 21 (6), 944-963, 2014. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2012-0064>
- [15] L. Ding ve Y. Zeng, Evaluation of Chinese higher education by topsis and iew—The case of 68 universities belonging to the Ministry of Education in China. *China Economic Review*, 36, 341-358, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2015.05.007>
- [16] S. Çakır ve S. Perçin, Çok kriterli karar verme teknikleriyle lojistik firmalarında performans ölçümü. *Ege Akademik Bakış*, 13 (4), 449-459, 2013. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/559959>
- [17] A. Öztel, M. S. Köse ve H. Aytekin, Kurumsal Sürdürülebilirlik performansının ölçümü için çok kriterli bir çerçeve: Henkel örneği. *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 1 (4), 32-44, 2012. <https://doi.org/10.7596/taksad.v1i4.85>
- [18] A. Ulutaş ve Ç. Karaköy, G-20 ülkelerinin lojistik performans endeksinin çok kriterli karar verme modeli ile ölçümü. *S.C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 20 (2), 71-84, 2016. <https://doi.org/10.7596/taksad.v1i4.85>
- [19] T. L. Saaty, Decision making—the analytic hierarchy and network processes (ahp/anp). *Journal of Systems Science And Systems Engineering*, 13 (1), 1-35, 2004. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
- [20] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [21] T. L. Saaty, How to make a decision: the analytic hierarchy process, *European Journal Of Operational Research*, 49, 9-26, 1990. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- [22] B. Özyörük ve E. C. Özcan, Analitik hiyerarşi sürecinin tedarikçi seçiminde uygulanması: otomotiv sektöründen bir örnek. *SDÜ İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13 (1), 133-144, 2008. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/194764>
- [23] T. L. Saaty, Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1 (1), 83-98, 2008. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/194764>
- [24] Ş. Gür, M. Hamurcu ve T. Eren, Ankara'da monoray projelerinin analitik hiyerarşi prosesi ve 0-1 hedef programlama yöntemleri ile seçimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (4), 437-443, 2017. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/336051>
- [25] E. K. Zavadskas ve A. Kaklauskas, *Multicriteria Evaluation of Building (Pastatų sistemotechninis įvertinimas)*. Vilnius: Technika, 1996.
- [26] V. Podvezko, The comparative analysis of mcdm methods saw and copras, *Engineering Economics*, 22 (2), 134-146, 2011. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.22.2.310>
- [27] A. Özdağoğlu, Çok kriterli karar verme modellerinde normalizasyon tekniklerinin sonuçlara etkisi: Copras örneği. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 8 (2), 229-252, 2013. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/65417>
- [28] N. Ömürbek, N. Demirci ve P. Akalin, Analitik ağ süreci ve topsis yöntemleri ile bilimsel seçimi. *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)*, 5 (9), 118-140, 2013. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/65417>
- [29] A. İ. Özdemir ve N. Y. Seçme, İki aşamalı stratejik tedarikçi seçiminin bulanık topsis yöntemi ile analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11 (2), 79-112, 2009. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/18948>
- [30] J. Papathanasiou ve N. Ploskas, *Topsis, Multiple Criteria Decision Aid*, Cham, Springer, 1-30, 2018.





Bioactive component extraction from broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) and optimization by Taguchi method

Brokoliden (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) biyoaktif bileşen ekstraksiyonu ve Taguchi yöntemi ile optimizasyonu

Cem Baltacıoğlu^{1,*} , Rabia Tartıcı² 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Abstract

In the study, bioactive component extraction was performed using the classical extraction method from broccoli. In the classical extraction method, the highest total phenolic substance (TPS), antioxidant activity (AOX) value and ascorbic acid content (AAC) determined were 690.94 mg GAE/kg dry matter (20°C/15min), 5.08 mg/ml (20°C/15 min) and 66.74 mg/100g dry matter (20°C/15 min), respectively. Extraction conditions were determined by using the Taguchi method. Accordingly, the best process conditions with the highest total phenolic substance, antioxidant activity and ascorbic acid value in the extraction were proved by the Taguchi method as 20°C/15min. When the colour values were examined, it was determined that the temperature had a significant effect on the colour values obtained in broccoli extract.

Keywords: Antioxidant activity, ascorbic acid, broccoli, extraction, phenolic compound

1 Introduction

Broccoli (*Brassica oleracea* L. var *italica*) is a vegetable belonging to the cabbage family (Brassicaceae) that is consumed raw or boiled [1, 5]. Broccoli, which has many positive effects in terms of a healthy life, can be consumed raw or boiled [6]. Broccoli contains vitamins, flavonoids, and antioxidant compounds as well as phytochemicals such as indole, sulforaphane isothiocyanate, and glucosinolates [7]. Broccoli is rich in minerals such as Ca, P and K, and vitamins A and C, as well as folic acid [8, 9]. Selenium-containing broccoli contains antioxidants and protects red blood cells from damage caused by oxidation and strengthens the immune system [10]. While broccoli is grown in a continental climate in summer, it is grown in autumn in a Mediterranean climate [11].

Phenolic compounds are a characteristic compound for plants. It has been observed that, thanks to its regular consumption, diseases such as cancer [12,13], high cholesterol [14], coronary heart [15], cataracts, diabetes [16] and aging can be prevented [17]. In addition to these, phenolic compounds have positive effects such as lowering blood pressure and regulating the permeability of the capillary circulation system [18].

Öz

Yapılan çalışmada brokoliden klasik ekstraksiyon metodu kullanılarak biyoaktif bileşen ekstraksiyonu yapılmıştır. Klasik ekstraksiyon yönteminde, belirlenen en yüksek toplam fenolik madde, antioksidan aktivite değeri ve askorbik asit miktarı, sırasıyla 690.94 mg GAE/kg kuru madde (20°C/15dk), 5.08 mg/ml (20°C/15 dk) ve 66.74 mg/100g (20°C/15 dk) olarak tespit edilmiştir. Yapılan ekstraksiyonda Taguchi yöntemi kullanılarak ekstraksiyon koşulları belirlenmiştir. Buna göre ekstraksiyonda toplam fenolik madde, antioksidan aktivite ve askorbik asit değerinin en iyi olduğu proses koşulları 20°C/15dk olarak Taguchi metodu ile de kanıtlanmıştır. Renk değerleri incelendiğinde brokoli ekstrakstında elde edilen renk değerleri üzerinde sıcaklığın önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Antioksidan aktivite, askorbik asit, brokoli, ekstraksiyon, fenolik madde

Extraction is the process of taking the components in the solid or liquid phase into the liquid phase by utilizing the solubility properties of a substance at the appropriate pressure and temperature [19]. A desired extraction process must be efficient, fast, reliable and environmentally friendly. In the extraction process where high efficiency is desired, there are many variable parameters such as solvent type, solvent ratio (water/solvent), pressure, temperature, time, solid-liquid ratios [20,21]. The most commonly used solvents are methanol, ethanol, acetone, and hexane to extract bioactive compounds from solid material [19].

In classical extraction studies, testing all alternatives requires high time and cost [22]. In the studies carried out, it is aimed to reach the lowest cost and the highest efficiency in the shortest time. For this purpose, optimization techniques have been developed. One of these optimization techniques is the Taguchi method [23,24]. In this study, the classical extraction method was applied to dried broccoli samples to extract bioactive compounds and the independent variables, temperature and time parameters, were optimized with the Taguchi technique.

2 Material and method

Broccoli plant was obtained from the local market in Niğde during its season. They were first washed, cleaned, cut into pieces, then dried with a freeze dryer (Scanvac Coolsafe 95-15 Pro, Denmark) at -100°C at 0.01 mbar pressure and stored at -18°C in moisture-proof glass containers (Arçelik, Turkey). Dry broccoli was used in the extractions.

2.1 Classical extraction

For the dried samples, 80% methanol (containing 1% hydrochloric acid) was used as a solvent for the extraction of phenolic substances. After weighing 4 g of the dried broccoli samples on a precision scale, it was put into a 200 ml flask. 40 ml of 80% methanol mixture was added on it. The extraction process was carried out on a magnetic stirrer at 20, 40 and 60°C for 15, 30 and 45 minutes. The extracts obtained after filtration with coarse filter paper were stored in an airtight bottle at -18°C in the refrigerator until the analysis [25].

2.2 Total phenolic substance (TPS)

TPS determination was performed according to the Folin-Ciocalteu method. 100 μl of the sample was completed with 0.75 ml of Folin-Ciocalteu solution (10% in water) and kept at room temperature for 5 minutes. 0.75 ml of Na_2CO_3 (in water, 75g/L) was added and mixed rapidly. They were kept in the dark for 1.5 hours at room temperature and then the absorbance values of the samples at 725 nm were read in the spectrophotometer. Gallic acid was used as a standard, the same procedures was repeated and it was prepared for the calibration curve and applied to different concentrations of gallic acid solutions. TPS concentration calculated on dry matter basis as gallic acid equivalent value (mg/kg GAE) [25].

2.3 Colour

Colour determination equipment (Konica Minolta CR400, Japan) was used to determine the colour properties of broccoli extracts. Liquid samples were placed in a cuvette and L^* , a^* and b^* values were measured [25].

2.4 Antioxidant activities (AOX)

The determination of free radical scavenging efficiency was made using the 1.1-diphenyl-2-picrylhydrazil radical according to the method of Blois and by going through the steps applied by Brand-Williams et al. [26,27]. In this study, the DPPH radical removal effect of broccoli extracts was expressed by calculating EC_{50} values.

2.5 Ascorbic acid content (AAC)

High performance liquid chromatography (Shimadzu, LC-20A/Prominence, Columbia, USA) was used for ascorbic acid analysis. A reversed phase C-18 column (5 μm particle size, 4.6 mm diameter, 250 mm length) was used for the analyses. A mixture of methanol and water (1 mL/min) prepared at a rate of 10:30 (v/v) was used as the mobile phase and was kept in an ultrasonic bath to remove air bubbles before using a mobile phase. The standard calibration curve was obtained using L-ascorbic acid (Sigma, Germany) at concentrations of 10, 20, 40, 60 and 80 ppm. 5 g samples

were transferred to test tubes, 5 ml of 25% phosphoric acid was added and the mixture was centrifuged for 5 minutes under the effect of 9000g gravity (Nüve brand NR 800R model, Turkey). 0.5 ml was taken from the clear upper part, completed to 10 ml with 25% phosphoric acid, and after filtering through a 0.45 μm filter, 20 μL sample was injected into the HPLC device [28].

2.6 Statistical analysis

The data were analyzed with a 95% confidence interval using a computer program (Minitab 17, USA) and one-way ANOVA was used in the analysis of the data. Tukey's multiple comparison test was used to determine the differences between the applications. Each experiment was repeated at least three times. Orthogonal array design was used in the Taguchi technique. Factor number 2 was chosen as run 9. L27 single-level design was selected and each factor has 3 levels. Temperature and time were chosen as factor a and b, respectively.

3 Results and discussion

3.1 Total phenolic substance (TPS)

The study started with the analysis of phenolic compounds, which are determinative in terms of bioactive component. The temperature and time interval, which are the independent variables used for classical extraction, and the TPS values used as the dependent variable were examined. This method is simple, reproducible and reliable [29]. It is also widely used in antioxidant studies. Gallic acid was used as a standard in the method, and the TPS concentration was calculated as GAE/kg dry matter, according to the calibration curve drawn for the absorbance of the extracts. TPS of extracts and extraction conditions made by the classical extraction method are given in Figure 1.

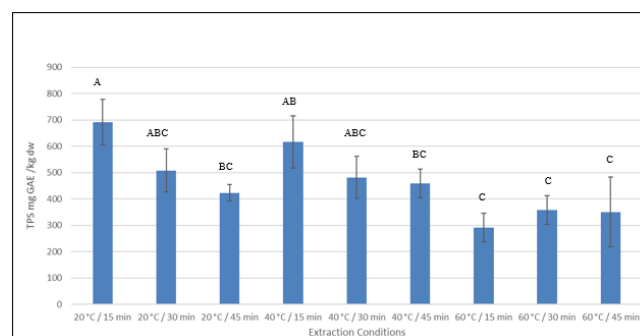


Figure 1. Classical extraction TPS values. Differences in letters show that temperature, time, and interaction of temperature and time are statistically effective on TPS. ($p \leq 0.05$).

According to the data, the effects of temperature, application time and the interaction of these two on TPS values were statistically significant ($p \leq 0.05$). In the extraction process at 20°C and 40°C , the amount of TPS extracted decreased with increasing time. Here, time has a negative effect on TPS. In this study, although it decreased at 20 and 40°C , the TPS increased at 60°C . As a result of the evaluation to be made between the extraction temperatures,

it is seen that the temperature has an effect on the extraction and this effect is statistically significant ($p \leq 0.05$). In a study on the determination of AOX and TPS compounds of broccoli, TPS amounts were reached in the range of 19.60–41.40 mg/100 g dry matter [29,30]. In the study of Lopez et al. [31], it decreased to 72.1 mg GAE/100 g with a 57.3% decrease at the end of the cooking process in broccoli samples analyzed fresh and cooked. When the TPS content was examined, an increase was observed in the phenolic substance content with the effect of high temperature and time. The reason for this is explained as the formation of phenolic compounds at high temperatures is the formation of precursors of phenolic molecules through non-enzymatic interconversion between phenolic molecules [32]. It is known that the bioactive component decreases with boiling in broccoli, and therefore, using it by drying and pulverizing reveals the possibility of using it for different purposes at any time.

The main effect graph corresponding to the S/N ratio for the extraction time in optimization using Taguchi is shown in Figure 2. In this plot, the slopes of each processing parameter are used to evaluate their importance and optimal processing combinations are determined. The best process parameter combination is the one that gives the highest S/N ratio value. Accordingly, the temperature-time combination, which gives the high amount of TPS for the temperature and time parameters, was determined as 20°C - 15 minutes (Figure 2).

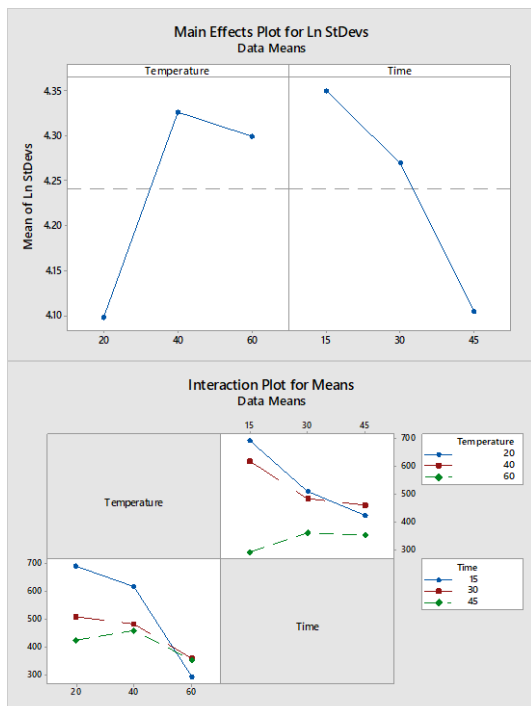


Figure 2. Parameters and main effect graphs evaluated in the TPS optimization experiment with classical extraction

3.2 Antioxidant activity (AOX)

Free radical scavenging is one of the methods by which antioxidants inhibit lipid oxidation. DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazil) free radical scavenging method has been used

to measure the AOX of some compounds or extracts in a short time [33,34]. The graph of the AOX amounts in the classical extraction performed at different temperatures and times is given in Figure 3. It was observed that the application time had a statistically insignificant effect on the AOX ($p > 0.05$). On the other hand, it was observed that the difference in temperature was significant at 60°C ($p \leq 0.05$). The extraction process at 60°C seems to have higher EC₅₀ values. This means that a decrease in AOX value was observed with high temperature, and the negative effect of temperature was observed here as well as in TPS values. Similarly, a slight decrease in EC₅₀ value was observed with the increase in the extraction process performed only at 60°C, which is explained by the behavior of the degradation products with the effect of temperature-time combination [35].

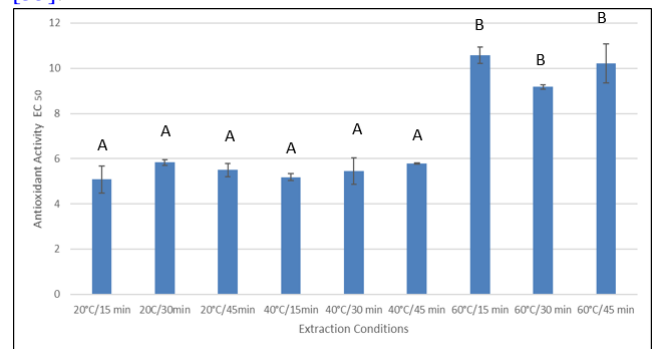


Figure 3. Results of AOX determination by conventional extraction (given as EC₅₀ value). Differences in letters show that temperature, time, and interaction of temperature and time are statistically effective on AOX ($p \leq 0.05$).

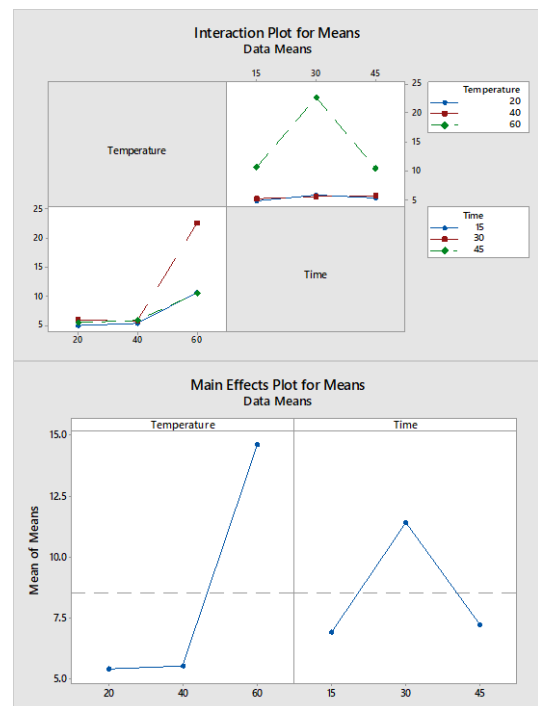


Figure 4. Parameters and main effect graphs evaluated in the antioxidant activity (EC₅₀) optimization experiment with classical extraction

The best process parameter combination for optimizing the effect of temperature and time of extraction on the antioxidant activity of the extract is given in Figure 4. Accordingly, the combination of the independent variables giving the highest AOX was determined as 20°C extraction temperature and 15 min.

3.3 Ascorbic acid content (AAC)

Ascorbic acid contains a diol group, which has both reducing power and acidic properties. Likewise, vitamin C is a powerful antioxidant as it has strong reducing activity. It reacts easily with superoxide and hydroxyl radical and plays a role in inactivating them [36]. The results of AAC in the extracts obtained by the extraction are given in Figure 4. In the study, the amount of AAC decreased by 44% with the effect of temperature, while the highest value was determined as 66.74 mg/100g at 20°C. A negative effect of temperature increase was observed on the amount of AAC and this effect was statistically significant ($p \leq 0.05$). In addition, it is observed that the effect of time is significant on the AAC values ($p \leq 0.05$). Studies have shown a decrease in the amount of AAC between 34-66% for a maximum of 5 minutes, according to the temperatures applied in cooking methods. Water-soluble ascorbic acid can be easily degraded by heat treatment. When the ascorbic acid values in raw broccoli were examined, different values such as 84.6 mg/100g and 2.92 mg/g DW were reported [31, 37]. The reason for these differences is stated as growing conditions and climate.

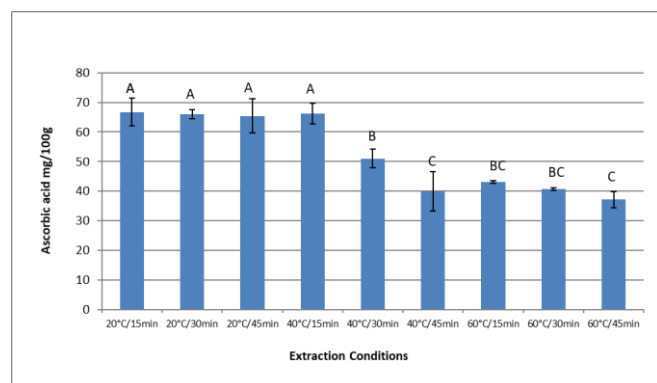


Figure 4. AAC activities of extracts. Differences in letters show that temperature, time, and interaction of temperature and time are statistically effective on AAC ($p \leq 0.05$).

In Figure 4, the highest vitamin C amount is 66.743 mg / 100 g at 20°C / 15min, while the lowest vitamin C amount is 37.137 mg / 100 g at 60°C / 45 min condition.

In the calculation made using the Taguchi method of the effect of temperature and time in the extraction on the ascorbic acid level of the extract, the best process parameter combination was determined as 20 °C and the time as 15 min.

3.4 Colour

The L^* value gives the brightness value and can take values ranging from 0-100 according to the measured color. The color measured in the a^* positive value range is red,

and the color measured in the negative value range is green. Likewise, the color measured in the b^* positive value range is yellow, and in the negative value range it is blue [38,39].

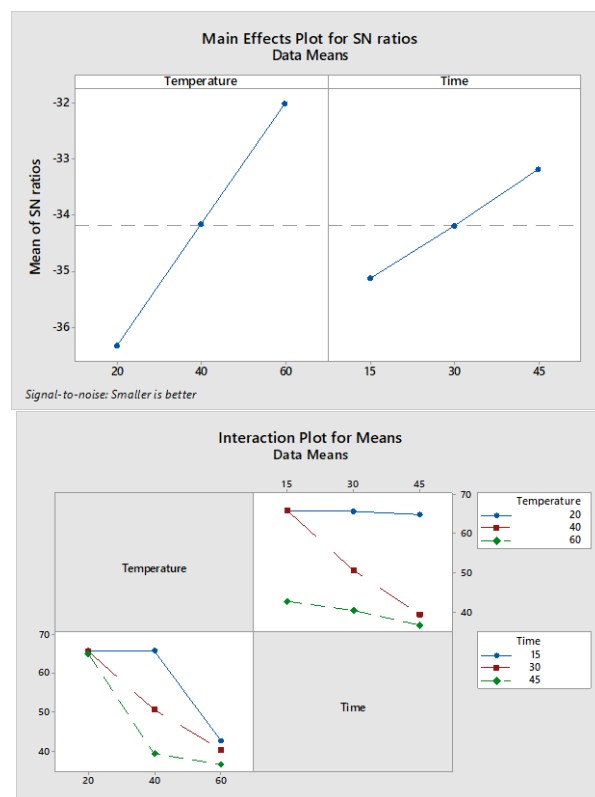


Figure 5. Parameters and main effect graphs evaluated in the ascorbic acid experiment with classical extraction

As can be seen from Table 1, differences were observed between the L^* , a^* , b^* values of broccoli extracts at different times and temperatures. While the highest L^* value was observed at 25.23 at 20°C/15 min condition, the lowest L^* value was determined at 16.66 at 60°C/15 min condition. The highest value of a^* value was determined at 7.73 at 20°C/30 min condition, while the lowest a^* value was determined at 3.61 at 60°C/30 min condition. The highest value of b^* was determined at 16.72 at 20°C/15 min condition, while the lowest b^* value was determined at 2.67 at 60°C/15 min condition. As a result of these evaluations, the values closest to the green color were obtained in the extraction performed at 60°C. A positive effect is seen between the temperature and the transition of the green color to the extraction solvent. The decrease in a^* value with time is explained by filling the intercellular spaces with extraction solvent. During the classical extraction, the temperature and time had a significant effect on the L^* , a^* , and b^* value and it is statistically significant ($p \leq 0.05$).

In the studies, L^* and a^* values decreased with cooking processes, while b^* values increased [40]. In another study, it is explained by the inactivation of the chlorophyllase enzyme with temperature in cooking processes [31].

Table 1. Color determination results by conventional extraction. Differences in letters show that temperature, time, and interaction of temperature and time are statistically effective on colour values ($p \leq 0.05$).

	L*	a*	b*
20 °C / 15 dk	25.23±0.11 ^{Aa}	7.24±0.07 ^{Aa}	16.72±0.09 ^{Aa}
20 °C / 30 dk	24.59±0.45 ^{Aa}	7.73±0.23 ^{Aa}	16.58±0.53 ^{Aa}
20 °C / 45 dk	17.63±0.09 ^{Aa}	6.12±0.06 ^{Aa}	5.37±0.73 ^{Aa}
40 °C / 15 dk	21.09±0.35 ^{Aa}	5.59±0.25 ^{Ba}	10.72±0.58 ^{Aa}
40 °C / 30 dk	19.90±0.29 ^{Aa}	7.03±0.49 ^{Ba}	8.25±0.49 ^{Aa}
40 °C / 45 dk	20.84±0.36 ^{Aa}	5.57±0.29 ^{Ba}	10.45±0.62 ^{Aa}
60 °C / 15 dk	16.66±0.44 ^{Ba}	4.27±0.19 ^{Ca}	2.67±0.07 ^{Ba}
60 °C / 30 dk	17.56±0.18 ^{Ba}	3.61±0.07 ^{Ca}	4.21±0.07 ^{Ba}
60 °C / 45 dk	17.76±0.12 ^{Ba}	4.69±0.02 ^{Ca}	5.04±0.03 ^{Ba}

4 Conclusions

Phenolic substances are mostly defined as heat sensitive components. The antioxidant activity and phenolic components depend on the composition of the food, the amount and ratio of the substances in the composition of the food, the interaction of these components with each other, the technological processes applied during the process, the duration and temperature of the heat treatment, the ratio of solvents that extract phenolic components such as water in the environment, the type of solvent used during the analysis and greatly affected by the rate. According to these results, it was stated that the total amount of phenolic substance in the extracts obtained in the classical solvent extraction ranged between 290.94-690.94 mg GAE/kg, the EC50 value, which is the antioxidant activity value, ranged between 5.08-10.57, and the amount of ascorbic acid varied between 37.13-66.74 mg/100g. According to the data obtained, the best combination of temperature and time for the extraction process can be expressed as 20°C and 15 minutes. The data in this study, in which the effects of different temperature and time parameters on extraction from broccoli are evaluated, are expected to shed light on future studies on extraction parameters.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 16%

References

- [1] H. Vural, D. Eşiyok, ve İ. Duman, Kültür Sebzeleri (Sebze Yetiştirme). E.Ü. Basımevi, İzmir, 2000.
- [2] Ö. Alan, ve K. Sönmez, Eskişehir ekolojik koşullarında bazı brokkoli beşitlerinin (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) agronomik özelliklerinin ve yetiştirme olanaklarının belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 26 (3), 29-35, 2012.
- [3] Z. Aktaş ve E. Bakkalbaşı, Yaygın kullanılan ısıtma işlemlerinin beyaz lahanaların yüzey rengi, toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan aktivitesi üzerine etkisi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 26(4), 505-511, 2016.
- [4] S. Polat ve E. Bal, Soğukta muhafaza edilen brokoli çeşitlerinin (*Brassica oleracea* L., var *italica* cvs. Belstar ve Beaumont) depolama Süresi ve kalite özellikleri üzerine modifiye atmosfer paketlenmenin etkisi. Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 4(2), 103-108, 2017. <https://doi:10.19159/tutad.310565>
- [5] N. Mordoğan, S. Erdoğan Bayram, H. Çakıcı ve İ. Duman. Brokoli ve pırasada kükürt içeriği ve kükürtlü aminoasit miktarları arasındaki ilişkiler. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 23(2), 263-276, 2019. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.315709>
- [6] H. Vural, D. Eşiyok, ve İ. Duman, Kültür Sebzeleri (Sebze Yetiştirme). Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, 2000.
- [7] D.A. Moreno, M. Carjaval, C. Lopez-Berenguer, and C. Garcia-Viguera, Chemical and biological characterisation of nutraceutical compounds of broccoli. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 41, 5, 1508-1522, 2006. <https://doi:10.1016/j.jpba.2006.04.003>
- [8] Y. Zhang, and Y. Hamazu, Phenolics, ascorbic acid, carotenoids and antioxidant activity of broccoli and their changes during conventional and microwave cooking. Food Chemistry, 88, 503-509, 2004. <https://doi:10.1016/j.foodchem.2004.01.065>
- [9] M. Şahin, Brokoli ve karnabaharın kurutma karakteristiklerine ön işlem sıcaklığının ve süresinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- [10] F. Yoldaş, Brokkoli'de Sıcaklık Dikim Sıklığı ve Dikim Zamanlarının Generatif Gelişim ve Kalite Kriterleri Üzerine Etkileri. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2003.
- [11] M.S. Yılmaz, Brokolinin mikrodalga kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi ve modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [12] W. Vermerris and R. Nicholson, Phenolic Compound Biochemistry. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2006.
- [13] R.L. Thangapazham, A. Sharma, A. And R.K. Maheshwari, Multiple molecular targets in cancer chemoprevention by curcumin. The AAPS Journal 8(3), 443, 2006.

- [14] I. Erlund, R. Koli, G. Alfthan, J. Marniemi, P. Puukka, P. Mustonen, P. Mattila, and A. Jula, Favorable effects of berry consumption on platelet function, blood pressure, and HDL cholesterol. *The American Journal of Clinical Nutrition* 87(2), 323-331, 2008. <https://doi.org/10.1093/ajcn/87.2.323>
- [15] P.M. Kris-Etherton, A.H. Lichtenstein, B.V. Howard, D. Steinberg, and J.L. Witztum, Antioxidant vitamin supplements and cardiovascular disease. *Circulation* 110(5), 637- 641, 2004. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000137822.39831>
- [16] T. Demir, Ö. Akpınar, H. Kara, ve H. Güngör, Nar (*Punica granatum* L.) kabuğunun in vitro antidiyabetik, antienflamatuar, sitotoksik, antioksidan ve antimikrobiyal aktivitesi. *Akademik Gıda*, 17(1) , 61-71, 2019. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.544647>
- [17] L. Fisher, T. Ianiro, F. Lau, H. Wang, and B. Daggy, Synergistic effects of phenolic mixtures in human cell models of aging. *The FASEB Journal* 29, 608-36, 2015. https://doi.org/10.1096/fasebj.29.1_supplement.608.36
- [18] N. M. Nizamlioğlu, ve S. Nas, Meyve ve sebzelerde bulunan fenolik bileşikler; yapıları ve önemleri. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 20–35, 2010.
- [19] P. Yağcıoğlu, Farklı Ekstraksiyon Metotları ile Adaçayı Bitkisinden Antioksidan Ekstraksiyonunun Ekstraksiyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
- [20] M. Şengül ve E.F. Topdaş, Katı-Sıvı Ekstraksiyonunda Kullanılan Modern Teknikler ve Bu Teknikler Arasında Ultrason Yardımlı Ekstraksiyonun Yeri. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 50 (2), 201-216,2019. <https://doi.org/10.17097/ataunizfd.466649>
- [21] M. Özgüner Kabak, Meyan kökünde bulunan bazı biyoaktif bileşenlerin ekstraksiyonu üzerine farklı yöntemlerin etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 2019.
- [22] K. Baynal, ve İ. Gencel, Taguchi yönteminin gıda sektöründe çok yanıtlı problemin eniyilemesinde uygulanması. *SAÜ Fen Bil Der* 19, 107-121, 2015.
- [23] S. Mezarıcıöz S. ve R.T. Oğulata, Süprem kumaşlarda patlama mukavemeti değerinin taguchi ortogonal dizayna göre optimizasyonu. *Tekstil ve Konfeksiyon* 20, 320 – 328, 2010.
- [24] C. Hamzaçebi ve F. Kutay, Taguchi metodu: Bir uygulama. *Gazi Üniversitesi Teknoloji Dergisi*, 3, 7 – 17, 2003.
- [25] H. Baltacıoğlu, E. M. Şahin ve E. D. Karadağ. 2019. Şeftali posasından ultrason ve mikrodalga destekli ekstraksiyon yöntemleriyle fenolik bileşiklerin eldesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8, 2, 875-881, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.570250>
- [26] M.S. Blois, Antioxidant Determinations by the Use of a Stable Free Radical. *Nature*, 181, 1199–1200, 1958.
- [27] W. Brand-Williams, M.E. Cuvelier and C. Berset, Use of a free-radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 28, 25-30, 1995.
- [28] S. Jabbar, M. Abid, B. Hu, M. M. Hashim, M. Saeeduddin, S. Lei, T. Wu and X. Zeng, 2014. Influence of sonication and high hydrostatic pressure on the quality of carrot juice. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 2449–2457, 2014, <https://doi.org/10.1111/ijfs.12567>
- [29] V.L. Singleton, R. Orthofer, and R.M. Lamuela-aventos, Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Oxidants and Antioxidants* 299, 152-178, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- [30] C. Kaur, K. Kiran, A. Dahuja, and H.C. Kapoor, Variations in antioxidant activity in broccoli cultivars. *Journal of Food Biochemistry*, 31, 621–638, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2007.00134.x>
- [31] A. A. Lopez-Hernandez, A. S. Ortega-Villarreal, J. V. Rodríguez, M. L. C. Lomeli and B. E. Gonzalez-Martínez, Application of different cooking methods to improve nutritional quality of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) regarding its compounds content with antioxidant activity. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 28, 100510, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100510>
- [32] F. Que, L. Mao, X. Fang and T. Wu, Comparison of hot air-drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) flours *International Journal of Food Science and Technology*, 43 (7), 1195-1201, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01590.x>
- [33] H.W. Jang, J.K. Moon and T. Shibamoto, Analysis and Antioxidant Activity of Extracts from Broccoli (*Brassicaoleracea* L.) Sprouts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63, 1169-1174, 2015. <https://doi.org/10.1021/jf504929m>
- [34] T. Sun, J. R. Power and J. Tang, Evaluation of the antioxidant activity of asparagus, broccoli and their juices. *Food Chemistry*, 105, 101-106, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.048>
- [35] H. Çelik, Çukurova bölgesinde denemeye alınan bazı patates çeşitlerinin cips üretimine uygunluğu. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2004.
- [36] F. Karataş, İ. Bektaş, A. Birişik, Z. Aydın ve A. Kurtul, Çiriş Otu'nda (*Asphodelus aestivus* L.) Suda Çözünen Bazı Bileşiklerin Araştırılması. *SDU Journal of Science (E-Journal)* 6 (1), 35-39, 2011.
- [37] Hang Li , Yu Xia , Hong-Yan Liu , Huan Guo, Xiao-Qin He, Yi Liu, Ding-Tao Wu, Ying-Hui Mai , Hua-Bin Li , Liang Zou , Ren-You Gan. Nutritional values, beneficial effects, and food applications of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) *Trends in Food Science & Technology* 119, 288- 308. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.015>

- [38] J.A. Abbott, Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology Technology*, 15, 207–225, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00086-6)
- [39] L. Zhan, L. Pang, Y. Ma, and C. Zhang, Thermal processing affecting phytochemical contents and total antioxidant capacity in broccoli (*Brassica oleracea* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(3), Article e13548, 2018. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13548>
- [40] Cai, C., Miao, H., Qian, H., Yao, L., Wang, B., & Wang, Q. (2016). Effects of industrial prefreezing processing and freezing handling on glucosinolates and antioxidant attributes in broccoli florets. *Food Chemistry*, 210, 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.140>





Yüksek zamansal çözünürlüklü çoklu-GNSS PPP-AR yönteminin yatay yönlü dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğinin değerlendirilmesi

Evaluation of the ability of the high-rate multi-GNSS PPP-AR method to detect dynamic behaviors in horizontal direction

Mert Bezcioglu¹ , Cemal Özer Yiğit^{2,*} , Ahmet Anıl Dindar³ , Özgür Avcı⁴ 

^{1,2} Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli Türkiye

³ Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli Türkiye

⁴ Sistem A.Ş. Sürekli İzleme ve Referans İstasyonu Sistemleri Bölümü, Ataşehir, İstanbul

Öz

Bu çalışma geleneksel-Hassas Nokta Konumlama (PPP: Precise Point Positioning) ve PPP-AR (Ambiguity Resolution) yöntemlerinin yapı sağlığı izlemeleri ve Global Navigation Satellite Systems (GNSS)-sismolojisi uygulamalarındaki etkinliğini ve ilgili tekniklere çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını araştırmaktadır. Yöntemlerin performanslarını değerlendirmek için yatay yönde hareket edebilme kabiliyetine sahip bir sarsma tablası kullanılarak olası yapısal hareketleri temsil eden 5 mm ila 10 mm arasında değişen genliklere ve 0.3 Hz ila 1.2 Hz arasında frekanslara sahip harmonik salınımlar üretilmiştir. Ayrıca, 1989 Loma Prieta depremi, PPP tekniklerinin GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performanslarını incelemek için simüle edilmiştir. 20 Hz örneklem aralığında toplanan veriler sadece-Global Positioning System (GPS) ve GPS/Galileo uydusu gözlemleri kullanılarak geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar frekans ve zaman alanında Linear Variable Differential Transformer (LVDT) verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar frekans alanında farklı uydusu kombinasyonları ile iki yöntemden de elde edilen frekans ve genlik değerlerinin benzer olduğunu ifade ederken, zaman alanında PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: GPS, Galileo, PPP, PPP-AR, Dinamik deplasman

1 Giriş

Yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tekniği, insan yapımı yapıların dinamik deplasmanlarını ve büyük depremlerin neden olduğu yüzey dalgası formlarını izlemek için oldukça güçlü bir yöntemdir. Dinamik deplasmanların tespiti uygulamalarında en az iki GNSS alıcısı gerektiren gerçek-zamanlı ve sonradan-değerlendirme rölatif (bağıl) konum belirleme tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. İnsan yapımı mega yapıların [1-6] ve uzun veya kısa açıklıklı köprülerin [7-10] dinamik deplasman tepkilerinin belirlenmesinde rölatif konum belirleme tekniği kullanılarak çok sayıda çalışma yapılmış ve yöntemin etkinliği

Abstract

This study investigates the ability of traditional-PPP (Precise Point Positioning) and PPP-AR (Ambiguity Resolution) techniques in structural health monitoring and Global Navigation Satellite Systems (GNSS)-seismology applications, and the contribution of multi-GNSS observations to both methods. To evaluate the performances of the methods, harmonic oscillations with amplitudes ranging from 5 mm to 10 mm and frequency between 0.3 Hz and 1.2 Hz, representing possible structural motions, were generated using a shake table. Furthermore, the 1989 Loma Prieta earthquake was simulated to examine the performance of PPP techniques in GNSS-seismology applications. The data collected at 20 Hz sampling rate were evaluated employing the traditional-PPP and PPP-AR techniques using only-Global Positioning System (GPS) and GPS/Galileo satellite observations, and the results were compared with Linear Variable Differential Transformer (LVDT) data in the frequency and time domain. Although the outcomes revealed that the frequency and amplitude values obtained from both methods with different satellite combinations in the frequency domain were comparable to each other, they clearly demonstrate that the superiority of the PPP-AR technique over the traditional-PPP technique in the time domain and the contribution of multi-GNSS observations.

Keywords: GPS, Galileo, PPP, PPP-AR, Dynamic displacement

kanıtlanmıştır. Ayrıca, dinamik deplasmanların tahmin edilmesinde rölatif konum belirleme tekniğinin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için birkaç deneysel çalışma da gerçekleştirilmiştir [11-14]. Ancak bu çalışmalarda kullanılan rölatif konum belirleme tekniği, sabit bir yerde bulunan en az bir GNSS referans istasyonunun kullanılmasını gerektirmekte ve yöntemin bu bağımlılığı, büyük/mega depremler sırasındaki güçlü yer sarsıntıları nedeniyle referans istasyonunun da meydana gelen deplasmanlar sebebiyle gezici istasyondan elde edilen deplasman bilgilerinin hatalı olmasına yol açmaktadır [15]. Son yıllarda, tek bir GNSS alıcısı ile hassas yörünge ve saat bilgilerini kullanarak santimetre düzeyinde konum elde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cyigit@gtu.edu.tr (C. Ö. Yiğit)

Geliş / Received: 07.02.2022 Kabul / Accepted: 03.10.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1141383

etmeye olanak sağlayan geleneksel-PPP (Precise Point Positioning) tekniği ortaya çıkmış ve oldukça uygun maliyetli bir teknik olarak bilim dünyasında popüler bir hale gelmiştir [16-19]. Yüksek zamansal çözünürlüklü geleneksel-PPP tekniğinin deformasyonların izlenmesi, GPS (Global Positioning System)-sismolojisi, deprem erken uyarı sistemleri ve yapı sağlığı izleme uygulamaları için etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmış durumdadır [20-30]. Ancak, geleneksel-PPP tekniğinde başlangıç faz belirsizliği değerinin tam sayı değerine yakınsaması için ölçü süresinin yeterli uzunlukta olması gerekmektedir [31]. Geleneksel-PPP yönteminin aksine ise PPP-AR (Ambiguity Resolution) tekniğinde başlangıç faz belirsizliği tam sayı olarak çözülmekte ve bu durum, PPP-AR tekniğini özellikle kısa ölçü sürelerinde geleneksel-PPP tekniğine göre daha avantajlı kılmaktadır. Li vd. [32] statik ve kinematik-PPP/PPP-AR tekniklerini, GPS ve BeiDou uydu kombinasyonları ile değerlendirerek yakınsama süresi ve konum doğruluğu açısından incelemiş ve çoklu-GNSS PPP-AR tekniğinin üstünlüğünü açıkça ifade etmişlerdir. Li vd. [33] GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu kombinasyonlarını kullanarak çoklu-GNSS PPP-AR yöntemini tekli ve ikili uydu kombinasyonları ile elde edilen PPP-AR tekniği ile karşılaştırmıştır. Sağa, yukarı ve yükseklik bileşenlerinde ilk sabitleme zamanı ve en hassas konum bilgisinin çoklu GNSS PPP-AR tekniği ile elde edildiğini açıkça vurgulamışlardır. Geng vd. [34] PPP-AR tekniği ile başlangıç faz belirsizliğinin ne kadar hızlı çözüldüğünü incelemek için GPS, BeiDou, Galileo ve QZSS uydu sistemleri ile üçlü frekans gözlemlerini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, üçlü frekans PPP-AR tekniğine ne kadar çok uydu sayısı dahil edilirse başlangıç faz belirsizliğinin tam sayı olarak elde edilme süresinin kısalttığını göstermiştir. Katsigianni vd. [35] sadece-Galileo, sadece-GPS ve çoklu-GNSS uydu gözlemlerinin kinematik PPP ve PPP-AR yöntemlerine olan katkısını incelemişlerdir. Çalışmada sadece-Galileo ve sadece-GPS tekniklerinden elde edilen konum hassasiyetinin aynı mertebede olduğu, fakat GPS uydu sistemine Galileo sisteminin dahil edilmesiyle PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilecek konum bilgisi hassasiyetinin yükseleceği ifade edilmiştir. Psychas vd. [36] farklı frekans ve uydu kombinasyonlarının konum doğruluğu ve başlangıç faz belirsizliği çözümüne olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada frekans sayısındaki artışın konum hassasiyetini ve başlangıç faz belirsizliği çözümünü iyileştirdiği açıkça ortaya konmuştur. Bezcioglu vd. [37] Antarktika'da gerçekleştirdikleri kinematik ve statik bir deneyde geleneksel-PPP tekniği ve PPP-AR tekniklerini karşılaştırmış ve PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü vurgulamışlardır. Bezcioglu vd. [38] Antarktika Yarımadasında bulunan Livingston Island'da bir Zodyak botu ile iki farklı günde statik ve kinematik GNSS ölçmeleri gerçekleştirmiş ve geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniği ile işlenen GNSS verileri rölatif konum belirleme tekniği ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP yöntemine olan üstünlüğünü açıkça ifade etmiştir. Yiğit vd. [39] GPS/GLONASS uydu kombinasyonlarına dayalı PPP-AR ve geleneksel-PPP tekniklerinin dinamik davranışları

belirleyebilme kabiliyetini araştırmış ve PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü açıkça ifade etmişlerdir.

Mevcut literatür incelendiğinde görülmektedir ki, kısa süreli dinamik davranışların tespiti çalışmalarında PPP-AR tekniğinin performansı oldukça az incelenmiştir. Buna ek olarak yukarıda tartışılan çalışmalardan Yiğit vd [39] hariç çoğu, genellikle 1 Hz örneklem aralığına sahiptir ve bu durum 1 Hz örneklem aralığından daha sık bir zamansal çözünürlükte PPP-AR tekniğinin 0.5 Hz'den daha yüksek frekans değerine sahip yapı hareketlerini veya kuvvetli yer hareketlerinden kaynaklanan deprem dalgalarını yakalama kabiliyetinin araştırılması gereken bir alan olduğunu göstermektedir. Ayrıca erişilen literatür çalışmalarında PPP-AR tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri alanındaki etkinliği GPS/GLONASS uydu kombinasyonuna dayalı olarak incelenmiş, Galileo uydu takımıyla geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerine olan katkısından henüz söz edilmemiştir. Bu çalışma kapsamında literatürde bulunanlardan farklı olarak, 20 Hz örneklem aralığına sahip GPS ve GPS/Galileo gözlemlerine dayalı geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin çeşitli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Çalışmada olası yapısal hareketleri temsil ettiği düşünülen 5 mm-10 mm arasında değişen genlik ve 0.30 Hz ila 1.20 Hz arasında değişen frekans değerlerine sahip harmonik salınımlar, tek eksenli bir sarsma tablası kullanılarak üretilmiştir. Bu deneylere ek olarak, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin deprem dalga formlarını tespit edebilme yeteneklerini test etmek için 1989 Loma Prieta depremi simülasyonu yine aynı sarsma tablasında üretilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan her iki deneyde de çoklu-GNSS gözlemlerinin geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerine olan katkısı değerlendirilmiştir. Bu çalışmayı, mevcut literatürde tartışılan çalışmalarından farklı kılan bir diğer özellik, yöntemlerin ve çoklu-uydu kombinasyonlarının her iki yönetime de olan katkısının doğruluğunun GNSS'den bağımsız bir sensör olan ve mekanik olarak bağlandığı bir nesnenin hareketlerini algılayıp, milimetre-altı bir mertebede bir hassasiyetle deplasman bilgisi üretebilen Linear Variable Differential Transformer (LVDT) verilerine dayanarak ortaya çıkarılmış olmasıdır.

2 Materyal ve metot

Kısa süreli çeşitli dinamik hareketleri izlemek için GPS ve GPS/Galileo geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin elde edilmesi ve gerçekleştirilen dinamik hareketlerin tasarımı çalışmanın bu bölümünde özetlenmiştir. Çalışma kapsamındaki deneyler 27 Temmuz 2021 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde gerçekleştirilmiştir. Harmonik salınım ve deprem simülasyonu testlerinde, toplam deplasmanı 190 mm ile sınırlı olan ve hareketleri 100 Hz örneklem aralığında bir LVDT sensörü ile doğrulanan tek eksenli bir sarsma tablası kullanılmıştır. Sarsma tablasının üzerine Şekil 1'de görülen ve 20 Hz örneklem aralığına sahip Leica GR30 alıcısı için gözlem toplayan Leica CGA60 GNSS anteni monte edilmiştir. Deneyler sırasında GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen

gözlem verileri deney sonrasında sadece-GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı olarak geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile değerlendirilmiştir. Geleneksel-PPP tekniği için Net_diff yazılımı kullanılırken, PPP-AR yöntemi için PRIDE PPP-AR yazılımı kullanılmıştır. Geniş ve dar bant aralıklarında GPS uyduları için sırasıyla %96.4 ve %50 oranında tam sayı belirsizliği elde edilirken, bu değerler Galileo uyduları için %66.7 ve %23.3 değerlerindedir. Çözüm parametrelerine ilişkin bilgiler ise Tablo 1'de ifade edilmiştir. Deneylerde geleneksel-PPP tekniğindeki başlangıç faz belirsizliğinin yakınsaması için alıcı açık bir konumda yaklaşık olarak 30 dakika hareketsiz olarak bekletilmiştir. Harmonik salınım deneylerinde Tablo 2'de ifade edilen frekans ve genlik değerine sahip, 50 saniyeden kısa süreli harmonik salınımlar ve detayları ilerleyen bölümlerde açıklanacak olan 1989 Loma Prieta depremi simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri için veri değerlendirme parametreleri

Seçenek	Geleneksel-PPP	PPP-AR
Örnekleme Aralığı	0.05 sn/20 Hz	0.05 sn/20 Hz
Uydu Yükseklik Açısı	10°	10°
Gözlemler	Kod+Faz	Kod+Faz
Troposferik Düzeltme	GPT2w+VMF1	GPT3+VMF3
Ağırlık Modeli (W)	a+b/sin(ele) "ele:yükseklik"	W = 1, ele > 30° W = 4 sin(ele) ² , ele < 30°
İyonosferik Düzeltme	İyonosfer-bağımsız Lineer Kombinasyon	İyonosfer-bağımsız Lineer Kombinasyon
Uydu Yörünge ve Saat	WUHAN	WUHAN
AR Ürünleri	-	WUHAN
Uydu ve Alıcı Faz Merkezi Ofseti ve Değişimi	Düzeltildi	Düzeltildi
Parametre Dengeleme Yöntemi	Kalman Filtre	En Küçük Kareler
Çözüm	İleri+Geri	İleri+Geri



Şekil 1. Çalışmada kullanılan GNSS anteni, alıcısı ve sarsma tablası

Geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile elde edilen çözümlerde alıcının koordinatları Uluslararası Yersel Referans Çerçevesinde (ITRF) belirlenmiştir. Ancak, dinamik hareketlerin tespit edilmesinin doğası gereği, yer merkezli kartezyen koordinatın doğrudan kullanımı, yapının yatay yönlü deplasman tepkilerini analiz etmek için uygun değildir. Bu sorunu çözmek için jeosentrik koordinatlar, toposentrik koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Ayrıca, toposentrik sistem bileşenleri sırasıyla Kuzey ve Doğu yönlerini gösterdiğinden, sarsma tablasının yatay düzlemdeki deplasman bilgilerinin GNSS alıcısı ile elde edilmesi için, çalışmada tartışılan geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde EDİLEN deplasman bilgileri iki boyutlu benzerlik dönüşümü uygulanarak sarsma tablasının yönüne dönüştürülmüştür. Bu işlemler detaylı olarak Yiğit vd. [39]'de bahsedilmiştir.

Tablo 2. Harmonik salınım deneylerinde üretilen genlik ve frekans değerleri

Durum No	Salınım Frekansı (Hz)	Salınım Genliği (mm)
1	0.3	5.0
2	0.3	10.0
3	0.7	5.0
4	0.7	10.0
5	1.2	5.0
6	1.2	10.0

2.1 Net_diff yazılımı

Net_diff yazılımı Uluslararası GNSS Servisi (IGS) gibi diğer sunuculardan GNSS gözlem verileri ve bunun yanı sıra hassas yörünge/saat ya da bias (kayıklık) gibi ürünlerin indirilebildiği, ayrıca konumlandırma ve elde edilen sonuçların analizlerinin yapılabildiği bir programdır. Dr. Yize Zhang tarafından geliştirilmiş olan bu yazılım, kullanıcılara PPP, PPP-AR, RTK (Real-Time Kinematic), PPP-RTK gibi konum belirleme yöntemleriyle GNSS verilerini işleyebilme imkânı vermektedir. Küresel çapta aktif olarak kullanıcılara hizmet veren 4 GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) uydu takımıyla tüm sinyallerini tekli-, çiftli- ve üçlü-frekansa kadar desteklemektedir [40]. Konumlandırma kısmında yapılan işlemler sonrasında herhangi bir ek yazılıma gerek duymadan noktaya ait ITRF koordinat sisteminde üç koordinat bileşeninin konum-zaman grafiğini, noktaya ait karesel ortalama hata (KOH), standart sapma (STD) gibi istatistiksel parametrelerini vermektedir. Ayrıca uydu sayısı, uydu görünürlükleri, uyduların gökyüzündeki dağılımı gibi birçok bilgiyi görsel olarak sağlamaktadır.

2.2 PRIDE PPP-AR yazılımı

Wuhan Üniversitesi GNSS Araştırma Merkezi'ndeki PRIDE Laboratuvarı tarafından geliştirilen ve geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile çözüm elde etmeye olanak sağlayan Pride PPP-AR, açık kaynak kodlu bir yazılımdır. PRIDE PPP-AR yazılımı, okunabilirlik, modülerlik, genişletilebilirlik ve sürdürülebilirlik ilkelerine göre tasarlanmış olup, bu ilkeler çerçevesinde PRIDE PPP-AR yazılımı daha esnek ve rahat bir şekilde kullanılmaktadır. PRIDE PPP-AR, Linux, Mac OS işletim sistemini desteklemekle birlikte Windows işletim sisteminde çalışan bir modülü de bulunmaktadır. PRIDE PPP-AR yazılımı

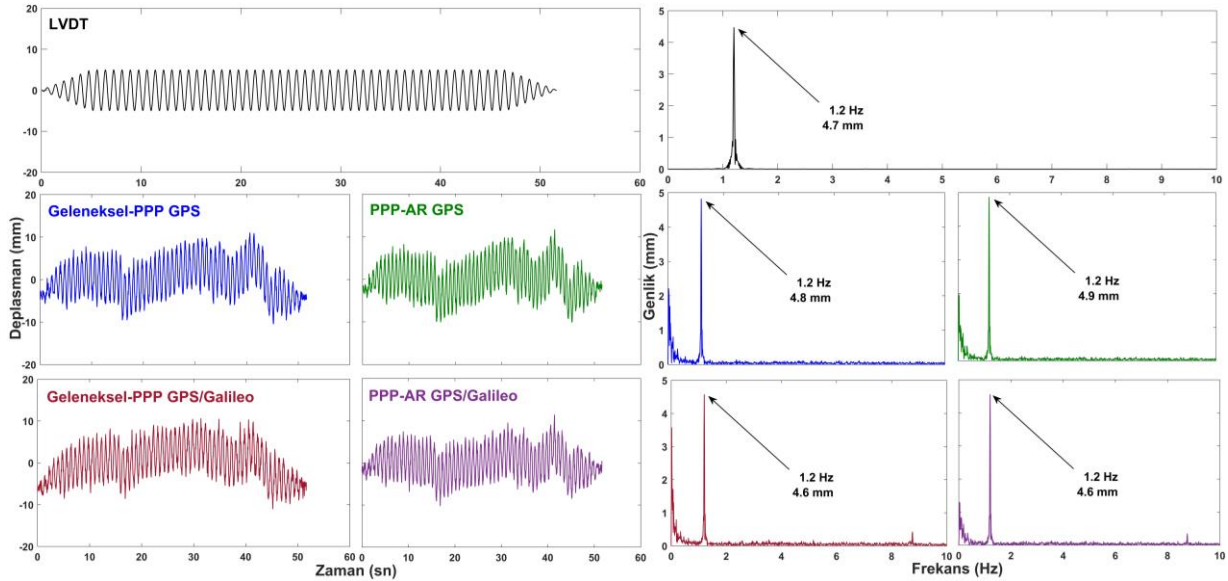
temel olarak farkları alınmamış işlem ve başlangıç faz belirsizliği modüllerinden oluşmaktadır. Farkları alınmamış işlem modülü, veri temizleme ve parametre tahminlerini içermekte ve geniş/dar banttaki faz belirsizliklerini belirlemekten sorumludur. Geleneksel-PPP çözümleri bu aşamadan sonra elde edilebilir ve bu belirsizlik tahminleri kullanılarak başlangıç faz belirsizliği modülü daha sonrasında bu belirsizlikleri tam sayı olarak çözmek ve sabitlemek için faz saati bias ürünlerini kullanmaktadır [41]. Geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin detaylı matematiksel modeli Atiz vd. [42]'de detaylı olarak ifade edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme performansı ve bu yöntemlere çoklu-GNSS gözlemlerinin katkıları çalışmanın bu bölümünde değerlendirilecektir. Geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin performanslarını incelemek için tasarlanan deneylerde LVDT verileri referans olarak kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, LVDT verileri 100 Hz örnekleme aralığına sahip olduğundan karşılaştırmayı eşit şartlarda gerçekleştirmek için LVDT verileri 20 Hz örnekleme aralığına düşürülmüştür.

Deneylerden 1.2 Hz frekans ve 5 mm genliğe sahip olan 5. durum, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin

harmonik salınımları yakalamadaki etkinliğini incelemek ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını değerlendirmek için örnek olarak seçilmiş ve LVDT, geleneksel-PPP ve PPP-AR yaklaşımlarından sadece-GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı olarak türetilen zaman serileri ve zaman serilerinden elde edilen Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) spektrumu Şekil 2'de ifade edilmiştir. İlgili şekilden de görüleceği üzere, GNSS tabanlı zaman serileri birbirleri ile oldukça tutarlı ve tüm yöntemlerden elde edilen salınım frekansları eşittir. Ek olarak, sadece-GPS gözlemlerine dayalı olarak elde edilen geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin kısa süreli dalgalanmaları birbirlerine benzerken, GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen zaman serilerinin birbirlerinden kısmen ayrıştığı net olarak fark edilebilmektedir. Şekil 2'deki zaman serileri dikkate alındığında, GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen PPP-AR tekniğinden elde edilen zaman serisi geleneksel-PPP tekniğine kıyasla daha tutarlı olduğu da açıkça görülmektedir. Bu durum çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça ifade etmektedir. Frekans alanında elde edilen bulgular dikkate alındığında, tepe frekansına karşılık gelen genlik değerlerinde oldukça küçük farklılıklar göze çarpmaktadır.



Şekil 2. Örnek durumun zaman serileri (sol) ve FFT spektrumları (sağ)

Tablo 3. Tüm durumlar için FFT spektrumu değerleri

Durum No	LVDT		Geleneksel-PPP GPS		PPP-AR GPS		Geleneksel-PPP GPS/Galileo		PPP-AR GPS/Galileo	
	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)
1	0.3	3.9	0.3	4.0	0.3	4.0	0.3	3.9	0.3	3.9
2	0.3	7.8	0.3	7.9	0.3	7.9	0.3	7.9	0.3	7.8
3	0.7	3.9	0.7	3.9	0.7	3.9	0.7	3.8	0.7	3.8
4	0.7	7.7	0.7	8.1	0.7	8.1	0.7	7.9	0.7	7.9
5	1.2	4.7	1.2	4.8	1.2	4.9	1.2	4.6	1.2	4.6
6	1.2	8.9	1.2	9.5	1.2	9.5	1.2	9.2	1.2	9.2

Geleneksel-PPP tekniği ile LVDT arasındaki farklılıklar sadece-GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonu içinde 0.1 mm iken, PPP-AR tekniği için bu farklar sırasıyla 0.2 mm ve 0.1 mm'dir. Frekans alanında elde edilen bu bulgular, harmonik salınımların baskın frekans ve buna karşılık gelen genlik değerlerinin ilgili yöntem ve uydu kombinasyonları ile benzer bir şekilde elde edilebileceğine işaret etmektedir.

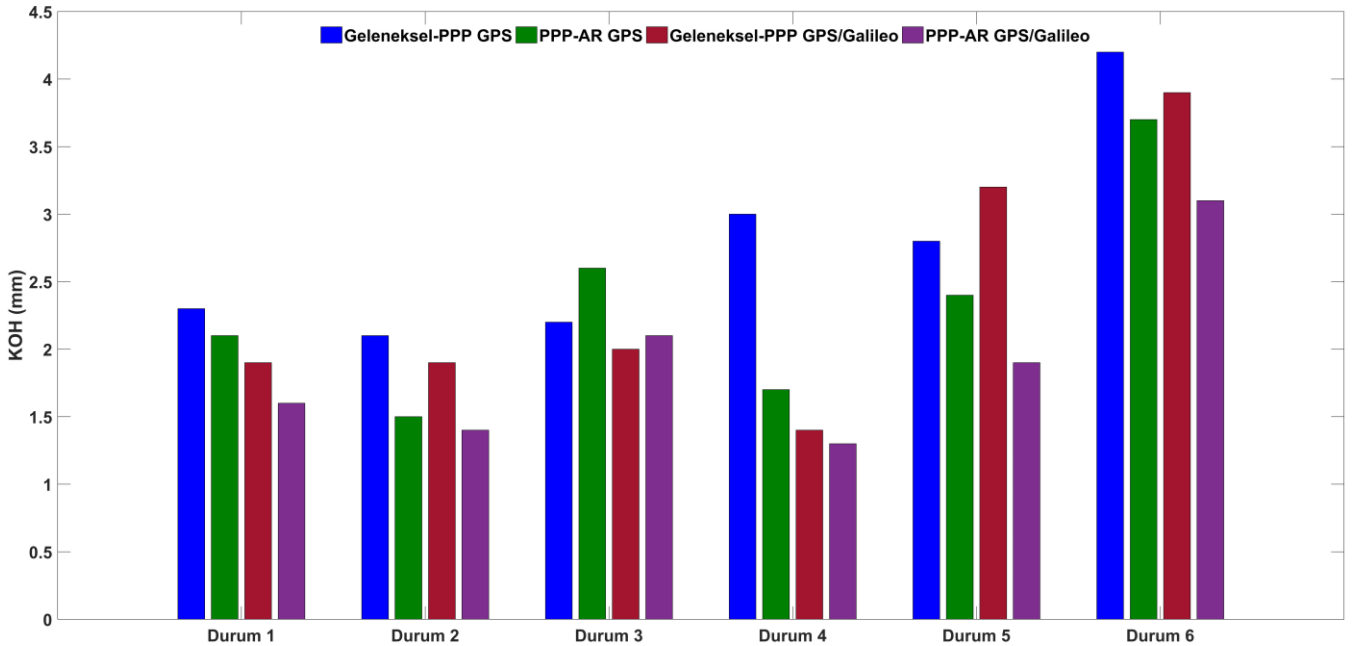
Tablo 2'de belirtilen her bir durum için çalışmanın amacı doğrultusunda tartışılan geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden türetilen zaman serilerinin FFT analizlerinin sonucu Tablo 3'te ifade edilmiştir. Her iki uydu kombinasyonu için geleneksel-PPP ve PPP-AR metodlarının çalışma kapsamında sarsma tablası kullanılarak üretilen salınım frekanslarını başarılı bir şekilde yakaladığı açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde mm düzeyinde farklılıklar bulunmaktadır. Sadece-GPS uydu kombinasyonu için geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilen genlik değerleri ile LVDT arasındaki farklar 0.0 mm ile 0.6 mm

arasında değişirken, GPS/Galileo uydu kombinasyonu için bu değerler 0.0 mm ile 0.3 mm arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, harmonik salınımların tepe frekansına karşılık gelen genlik değerlerinin elde edilmesinde geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin benzer performans sergilediğini ifade ederken, çoklu-GNSS tekniği ile kısmen daha başarılı genlik değerlerinin elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Frekans alanındaki tartışmalara ek olarak geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin zaman alanındaki başarısını incelemek ve yöntemlere çoklu-GNSS ölçümlerinin etkisini daha da detaylandırmak için GNSS-tabanlı yöntemlerden elde edilen zaman serilerinin referans LVDT sensörü ile olan farklarının maksimum ve KOH değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Maksimum hata değerleri göz önüne alındığında çoklu-GNSS PPP-AR tekniğinin diğer yaklaşımlardan kısmen daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Sadece-GPS gözlemlerine dayalı olarak geleneksel-PPP tekniğinden elde edilen değerler 5.4

Tablo 4. Tüm durumlar için LVDT ve GNSS tabanlı yöntemler arasındaki farkların maksimum ve KOH değerleri

Durum No	Geleneksel-PPP GPS		PPP-AR GPS		Geleneksel-PPP GPS/Galileo		PPP-AR GPS/Galileo	
	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)
1	6.5	2.3	6.0	2.1	6.1	1.9	4.7	1.6
2	6.2	2.1	4.4	1.5	6.7	1.9	4.2	1.4
3	5.4	2.2	6.1	2.6	5.1	2.0	5.0	2.1
4	7.8	3.0	5.3	1.7	4.1	1.4	4.4	1.3
5	7.1	2.8	6.8	2.4	7.9	3.2	6.5	1.9
6	9.7	4.2	8.5	3.7	8.5	3.9	7.4	3.1



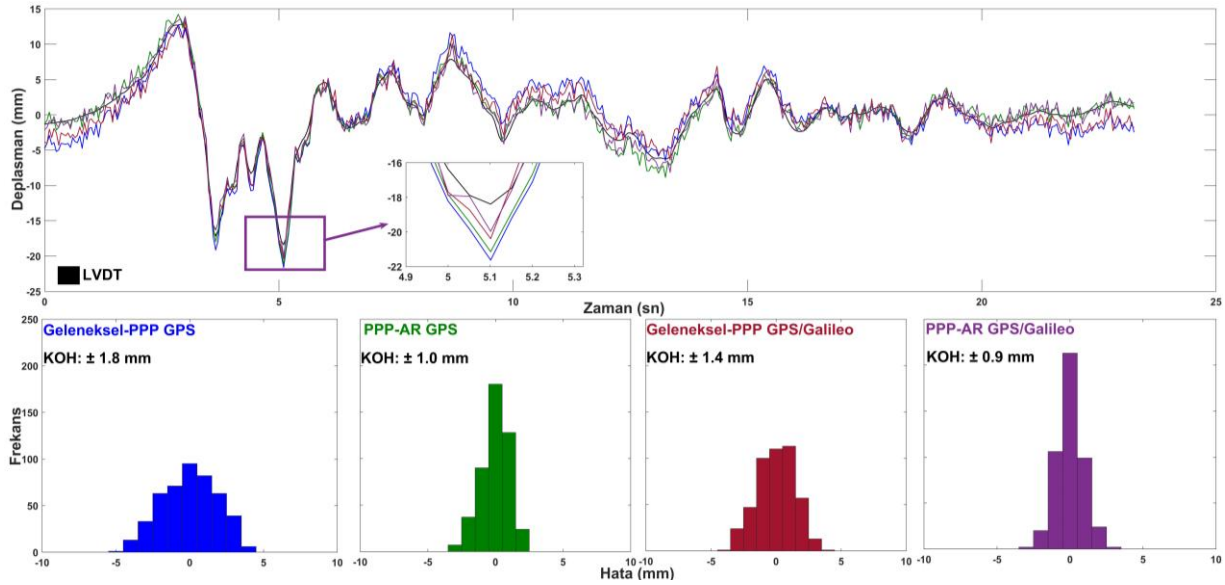
Şekil 3. Tüm durumlar için GNSS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri

mm ile 9.7 mm arasında değişirken iken, PPP-AR tekniği için bu değerler 4.4 mm ile 8.5 mm arasında değişmektedir. GPS/Galileo uydu kombinasyonu için elde edilen maksimum hata değerlerinin ortalaması ise geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri için sırasıyla 6.4 mm ve 5.4 mm'dir. Tablo 4'te ifade edilen KOH değerlerinin bar grafiği ise Şekil 3'te görselleştirilmiştir. İlgili şekil ve tabloda da belirtildiği gibi Durum 1, 2, 4, 5 ve 6 için GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen PPP-AR tekniği diğer tüm yöntemlerden daha düşük KOH değerlerine sahiptir. Söz konusu bu beş durum için PPP-AR tekniğinden elde edilen KOH değerleri geleneksel-PPP tekniğinden elde edilen KOH değerlerinden ortalama olarak %15 daha düşüktür. Durum 3'te geleneksel-PPP tekniğinin tüm uydu kombinasyonları için daha düşük KOH değerine sahip olması, o zaman aralığında PPP-AR çözümüne dahil olan bias ürünlerinin düzensizliği ile ilgili olabilir. Ayrıca sadece-GPS gözlemleri ve GPS/Galileo gözlemleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde çoklu-GNSS gözlemlerinin daha düşük KOH değeri sağladığı açıktır. Zaman alanındaki değerlendirme sonuçları, PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP yönteminden daha üstün bir performans gösterdiğini açıkça vurgulamakta ve çoklu-GNSS gözlemlerinin her iki yönetime olan katkısını net olarak ortaya koymaktadır.

Daha önce de bahsedildiği gibi, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin şiddetli yer sarsıntıları kaynaklı deprem dalga formlarını tespit edebilme yeteneği de ayrıca değerlendirilmiştir. Yöntemlerin performansının incelenmesi için sarsma tablası üzerinde 6.9 Mw Loma Prieta depremi üretilmiştir. LVDT verileri, harmonik salınım deneylerine benzer bir şekilde sismik dalga formlarının tespit edilmesinde geleneksel-PPP ve PPP-AR yaklaşımlarının etkinliğini doğrulamak için referans olarak kullanılmıştır.

San Andreas fay hattı üzerindeki Mw 6.9 Loma Prieta depremi, 17 Ekim 1989'da meydana gelmiştir. Deprem yüzeye oldukça yakın ve mekanizması yanallıdır. Deprem merkez üssü kırsal kesimde olmasına rağmen, kuvvetli yer hareketleri nedeniyle eyaletler arası otoyollar büyük ölçüde etkilenmiş, çok sayıda köprü, üst geçit ve viyadük kısmen veya tamamen çökmüştür. Bu çalışmada kullanılan deplasman verileri California Geological Survey (CGS) tarafından işletilen Gilroy#1 istasyonunda kaydedilmiştir. Kayıt istasyonu, merkez üssünden yaklaşık 30 km uzaktadır ve deprem sırasında kaydedilen verilerin Doğu-Batı bileşeni kullanılmıştır.

Şekil 4, Loma Prieta depreminin seçilen bir kaydının simülasyonu ile geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinden elde edilen deplasman zaman serilerinin yanı sıra, LVDT ve çalışma kapsamında tartışılan yöntemler arasındaki farkların histogram grafiklerini ve bu farkların KOH değerlerini içermektedir. Her iki uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen yöntemlerin LVDT ile oldukça iyi bir uyum sergilediği açıkça görülmektedir. Elde edilen farkların histogramlarına bakıldığında, tüm yöntemlerin Gauss hata dağılımına uygun olduğu ve KOH değerlerinin GPS ve GPS/Galileo için sırasıyla 1.8 mm, 1.0 mm, 1.4 mm ve 0.9 mm olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça göstermekle birlikte PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü açık bir şekilde vurgulamaktadır. Loma Prieta deprem simülasyonu deneyi sonuçları güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu sismik dalga formlarının geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile başarılı bir şekilde karakterize edilebileceğini ve ayrıca, çoklu-GNSS PPP-AR tekniği ile kısmen daha doğru deplasman bilgisi elde edilebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 4. Loma Prieta depremi simülasyondan elde edilen zaman serileri (üst) ve LVDT ile GNSS tabanlı yöntemler arasındaki hataların histogram ve KOH değerleri (alt)

4 Sonuçlar

Bu çalışma, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin 50 saniyeden kısa süreli ve yatay yönlü dinamik hareketleri ve sismik dalga formlarını tespit edebilme yeteneklerini ve her iki yöntemde de çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını içermektedir. Çalışmanın amacı doğrultusunda, 5 mm-10 mm arasında değişen genlik ve 0.30 Hz ile 1.20 Hz arasında değişen salınım frekansına sahip 6 adet harmonik salınım deneyi ve 6.9 Mw büyüklüğündeki 1989 Loma Prieta depreminin simülasyonu tek eksenli bir sarsma tablası kullanılarak üretilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin dinamik hareketleri tespit edebilme kabiliyetlerinin doğrulanması GNSS-bağımsız LVDT sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Frekans alanındaki harmonik salınım deneylerinin analizi, dinamik deplasmanların baskın frekans değerlerinin GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonları kullanılarak her iki yöntemle de başarılı bir şekilde elde edilebileceğini ifade etmektedir. Buna ek olarak tespit edilen baskın frekansın genlik değerlerinde mm-altı düzeyde farklar vardır. Bu farklılıkların tüm uydu kombinasyonları ve her iki yöntem için de 0.6 mm'nin altında kaldığı düşünülürse söz konusu tekniklerin frekans alanındaki başarısı oldukça açıktır. Geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin harmonik salınımları algılama performansını daha da detaylandırmak amacıyla zaman alanında da analizler gerçekleştirilmiştir. Bu alanda elde edilen bulgular, PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğinden biraz daha iyi performans gösterdiğini ve iki yaklaşıma da çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı açıkça ortaya çıkarmıştır. Geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin şiddetli depremler sırasında meydana gelen kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu sismik dalga formlarını tespit etme performansı 6.9 Mw büyüklüğüne sahip 1989 Loma Prieta depremi simülasyonu ile değerlendirilmiştir. Bu simülasyon deneyinde de çoklu-GNSS PPP-AR yaklaşımı geleneksel-PPP tekniğinden biraz daha iyi performans gösterirken, çoklu-GNSS gözlemlerinin geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerine olan olumlu katkısı bir kez daha görülmüştür.

Teşekkür

Yazarlar Net_diff yazılımı için Dr. Yize Zhang'a, PRIDE PPP-AR yazılımı için Wuhan Üniversitesindeki PRIDE Laboratuvarına, saha çalışmalarındaki desteği için Arş. Gör. Barış Karadeniz'e, çalışmada kullanılan alıcı/anten desteği için Sistem A.Ş. ve LeicaGeosystems AG firmalarına teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

[1] M. Celebi, GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(5-8), 477-483, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00094-4).

- [2] X. Li, L. Ge, E. Ambikairajah, C. Rizos, Y. Tamura and A. Yoshida, Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system, *GPS Solution*, 10(4), 233-247, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10291-006-0023-y>.
- [3] P. Breuer, T. Chmielewski, P. Gorski, E. Konopka and L. Tarczynski, The Stuttgart TV tower—Displacement of the top caused by the effects of sun and wind, *Engineering Structures*, 30(10), 2771-2781, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.008>.
- [4] H.S. Park, H.G. Sohn, I.S. Kim and J.H. Park, Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings, *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(1), 117-132, 2008. <https://doi.org/10.1002/tal.335>.
- [5] C.O. Yigit, X. Li, C. Inal, L. Ge and M. Yetkin, Preliminary evaluation of precise inclination sensor and GPS for monitoring full-scale dynamic response of a tall reinforced concrete building, *Journal of Applied Geodesy*, 4(2), 103-113, 2010. <https://doi.org/10.1515/jag.2010.010>.
- [6] P. Gorski, Dynamic characteristic of tall industrial chimney estimated from GPS measurement and frequency domain decomposition, *Engineering Structures*, 148, 277-292, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.066>.
- [7] G.W. Roberts, X. Meng and A. Dodson, Integrating a global positioning system and accelerometers to monitor deflection of bridges, *Journal of Surveying Engineering*, 130(2), 65-72, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:2\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:2(65)).
- [8] X. Meng, A.H. Dodson and G.W. Roberts, Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers, *Engineering Structures*, 29(11), 3178-3184, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.012>.
- [9] F. Moschas and S. Stiros, Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer, *Engineering Structures*, 33(1), 10-17, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.013>.
- [10] Y. Xu, J.M.W. Brownjohn, D. Hester and K.Y. Koo, Long-span bridges: Enhanced data fusion of GPS displacement and deck accelerations, *Engineering Structures*, 147, 639-651, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.018>.
- [11] W.S. Chan, Y.L. Xu, X.L. Ding, Y.L. Xiong and W.J. Dai, Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions, *Journal of Surveying Engineering*, 132(3), 108-117, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2006\)132:3\(108\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:3(108)).
- [12] A. Nickitopoulou, K. Protopsalti and S.C. Stiros, Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises, *Engineering Structures*, 28(10), 1471-1482, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.02.001>.
- [13] P.A. Psimoulis and S.C. Stiros, Experimental assessment of the accuracy of GPS and RTS for the

- determination of the parameters of oscillation of major structures, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(5), 389-403, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00547.x>.
- [14] G. Wang, F. Blume, C. Meertens, P. Ibanez and M. Schulze, Performance of high-rate kinematic GPS during strong shaking: Observations from shake table tests and the 2010 Chile earthquake, *Journal of Geodetic Science*, 2(1), 1-15, 2011. <https://doi.org/10.1186/BF03352300>.
- [15] P. Xu, C. Shi, R. Fang, J. Liu, X. Niu, Q. Zhang and T. Yanagidani, High-rate Precise Point Positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units, *Journal of Geodesy*, 87, 361-372, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>.
- [16] J.F. Zumberge, M.B. Hefflin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins and F.H. Webb, Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), 5005-5017, 1997. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.
- [17] J. Kouba and P. Héroux, Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solutions*, 5, 12-28, 2001. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.
- [18] T. Li, J. Wang and D. Laurichesse, Modeling and quality control for reliable Precise Point Positioning integer ambiguity resolution with GNSS modernization, *GPS Solutions*, 18(3), 429-442, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0342-8>.
- [19] B. Karadeniz, M. Bezcioglu, Ö.F. Bilgen ve C.Ö. Yiğit, GPS/Galileo PPP-AR ve PPP yöntemlerinin doğruluklarının gözlem süresi ve uydu kombinasyonları açısından incelenmesi, *AKÜ FEMÜBİD*, 21(6): 1377-1392, 2021. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1003382>.
- [20] J.C. Savage, W. Gan, W.H. Prescott and J.L. Svarc, Strain accumulation across the coast ranges at the latitude of San Francisco 1994–2000, *Journal of Geophysical Research*, 109 (B3), B03413, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JB002612>.
- [21] E. Calais, J.Y. Han, C. Demets and J.M. Nocquet, Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements, *Journal of Geophysical Research*, 11(6), 1-23, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JB004253>
- [22] J. Kouba, Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47, 741-755, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1026390618355>.
- [23] A. Avallone, M. Marzario, A. Cirella, A. Piatanesi, A. Rovelli, C. Di Alessandro, E. D’Anastasio, N. D’Agostino, R. Giuliani and M. Mattone, Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the Mw 6.3 L’Aquila (central Italy) event, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B2), B02305, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JB007834>.
- [24] P. Xu, C. Shi, R. Fang, J. Liu, X. Niu, Q. Zhang and T. Yanagidani, High-rate Precise Point Positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units, *Journal of Geodesy*, 87, 361-372, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>.
- [25] Z. Nie, R. Zhang, G. Liu, Z. Jia, D. Wang, Y. Zhou and M. Lin, GNSS seismometer: Seismic phase recognition of real-time high-rate GNSS deformation waves, *Journal of Applied Geophysics*, 135, 328-337, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.10.026>.
- [26] J. Paziewski, R. Sieradzki and R. Baryła, Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: Application to precise dynamic displacement detection, *Measurement Science and Technology*, 29(3), 035002, 2018. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9ec2>.
- [27] P. Xu, Y. Shu, X. Niu, W. Yao and Q. Chen, High-rate multi-GNSS attitude determination: Experiments, comparisons with inertial measurement units and applications of GNSS rotational seismology to the 2011 Tohoku Mw9.0 earthquake, *Measurement Science and Technology*, 30(2), 024003, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaf987>.
- [28] F. Moschas, A. Avallone, V. Saltogianni and S.C. Stiros, Strong motion displacement waveforms using 10-Hz Precise Point Positioning GPS: an assessment based on free oscillation experiments, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 43(12), 1853-1866, 2014. <https://doi.org/10.1002/eqe.2426>.
- [29] M. Bezcioglu, B. Karadeniz, C.Ö. Yiğit, A.A. Dindar, F. Bezir ve Ö. Avci, Gerçek Zamanlı GNSS VADASE yaklaşımının dinamik deplasmanları yakalayabilme kabiliyetinin incelenmesi, *Harita Dergisi*, 167, 1-11, 2022
- [30] X. Li, M. Ge, X. Zhang, Y. Zhang, B. Guo, R. Wang, J. Klotz and J. Wickert, Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: Application to earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 40(2), 295-300, 2013. <https://doi.org/10.1002/grl.50138>.
- [31] S. Choy, S. Bisnath, and C. Rizos, Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solutions*, 21, 13-22, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0545-x>.
- [32] P. Li, X. Zhang, and F. Guo, Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou. *Journal of Geodesy*, 91, 25-40, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0935-4>.
- [33] X. Li, X. Li, Y. Yuan, K. Zhang, X. Zhang, and J. Wickert, 2018. Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo. *Journal of Geodesy*, 92, 579-608, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1081-3>.
- [34] J. Geng, J. Guo, X. Meng, and K. Gao, Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data, *Journal of Geodesy*, 94(6), 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01330-1>.
- [35] G. Katsigianni, S. Loyer, and F. Perosanz, PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of

- GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS, Remote Sensing, 11, 2477, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11212477>.
- [36] D. Psychas, S. Verhagen and P.J.G. Teunissen, Precision analysis of partial ambiguity resolution-enabled PPP using multi-GNSS and multi-frequency signals, Advances in Space Research, 66, 2075–2093, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.08.010>.
- [37] M. Bezcioglu, C.O. Yigit, and A. El-Mowafy, Kinematic PPP-AR in Antarctic: Comparing Methods for Precise Positioning, Sea Technology, 60(2), 20-23, 2019.
- [38] M. Bezcioglu, C.Ö. Yiğit ve M.N. Bodur, Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği, AKÜ FEMÜBİD, 19(1), 162-169, 2019. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>.
- [39] C.O. Yigit, A. El-Mowafy, A.A. Dindar, M. Bezcioglu and I. Tiryakioglu, Investigating performance of high-rate GNSS-PPP and PPP-AR for structural health monitoring: Dynamic tests on shake table, Journal of Surveying Engineering, 147(1), 05020011:1-14, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000343](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000343).
- [40] https://github.com/YizeZhang/Net_Diff, Accessed 05 July 2022.
- [41] J. Geng, X. Chen, Y. Pan, S. Mao, C. Li, J. Zhou and K. Zhang, PRIDE PPP-AR: An Open-Source Software for GPS PPP Ambiguity Resolution, GPS Solutions, 23, 91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0888-1>.
- [42] O.F. Atiz, S. Ogutcu, S. Alcaay, P. Li and I. Bugdayci, Performance investigation of LAMBDA and bootstrapping methods for PPP narrow-lane ambiguity resolution, Geo-Spatial Information Science, 24(4), 604-614, 2021. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1942236>.





Periyodik yığılı kütleli kirişlerde eğilme dalgalarının yayılımı Propagation of flexural waves in beams with periodic lumped mass

Aydın Özmutlu^{1,*} 

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 59860 Tekirdağ Türkiye

Öz

Bu çalışmada, periyodik yığılı kütleli Euler-Bernoulli kirişinde dispersiyon analizi yapılmakta ve periyodikliğin etkileri araştırılmaktadır. Önce sonsuz uzunlukta periyodik yığılı kütleli bir kiriş için yayılma matrisi yöntemi kullanılarak dispersiyon ilişkisi türetilmiş ve kütle oranına bağlı olarak oluşan bantlı frekans spektrumunu verilmiştir. Daha sonra sonlu sayıda periyodik yığılı kütle olması durumunda dalga yayılımına olan etki araştırılmış ve iletkenlik fonksiyonu elde edilmiştir. Son olarak bu yığılı kütlelerden oluşan bariyerin yer değiştirme mod şekilleri, geçme ve durma bantı frekans değerleri için elde edilmiştir. Sonuçlar, periyodik yığılı kütleler ile yapılacak tasarımların dalga bariyeri olarak kullanılmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Eğilme dalgası, Periyodik yapı, Yığılı kütle, Bant boşluğu, Yayılma matrisi yöntemi

1 Giriş

Periyodik yapıların mühendislik alanında kullanılması ve teknolojik alanda sağladığı katkılar son yıllarda hızla artmaktadır. Bu yapıların en önemli özelliği frekans spektrumunda bantlı bir yapı ortaya çıkartarak dalga yayılımının belirli frekans aralıklarında oluşmasına izin vermeleridir. Bu özellik sonucunda "durma bantı" olarak isimlendirilen frekans aralıklarında dalga zayıflaması görülürken, bu aralıkların dışında kalan diğer frekanslarda ise iletim devam eder. Periyodik yapıların bu özelliği, mühendislik uygulamalarında çok geniş bir yelpazede kullanılması olanağını sağlar. Örneğin inşaat mühendisliği alanında binalarda ve yapılarda titreşim azaltımı, titreşim yalıtımı, titreşim filtreleme amacıyla periyodik yapı tasarımına gidilebilir.

Periyodik yapılar konusundaki ilk çalışmaların 19. yy. sonlarında Floquet [1], Rayleigh [2] tarafından yapılanlarla başladığı, Bloch [3], Brillouin [4] ile devam ettiği görülmektedir. Periyodik örgü yapıları, elektrik devreleri ve sürekli iletim hatları gibi problemlerin çözümleri üzerine 1960'lara kadar yoğunlaşmış ve gerekli teorik altyapı kurulmuştur. Özellikle yapı mühendisliği anlamında periyodik yapıların araştırılması konusundaki çalışmaların, 1950'li yılların ortasından sonra başladığı görülmektedir [5]. Periyodik yapılar üzerine çalışmalar sınıflandırıldığında iki kategoride; geometrik ve malzeme periyodikliği üzerine bunların toplandığı ortaya çıkmaktadır.

Abstract

In this study, dispersion analysis is carried out in the Euler-Bernoulli beam with periodic lumped mass, and periodicity effects are investigated. First, the dispersion relation is derived using the propagator matrix method for an infinitely long periodic beam with lumped mass. The banded frequency spectrum is given depending on the mass ratio. Then, in the case of a finite number of periodic lumped masses, the effect on wave propagation was investigated and the transmission function was obtained. Finally, the displacement mode shapes of the barrier consisting of these lumped masses were obtained for the pass and stop band frequency values. The results show that it is possible to use designs made with periodic lumped masses as wave barriers.

Keywords: Flexural wave, Periodic structure, Lumped mass, Bandgap, Propagator matrix method

Mikro ölçekteki kirişlerden [6], köprüler [7], geniş açıklıklı yapılar [8] ve binalar [9] gibi makroskobik yapılara kadar çeşitli mühendislik alanlarında karşılaşılabilecek periyodik yapılarda eğilme dalga yayılımı ve titreşimleri ortaya çıkar. Mekanik dalgaların veya titreşimlerin kontrol edilmesinde en önemli yapılar yerel rezonatörler [10] veya fononik kristallerdir [11]. Mekanik özellikleri arasında büyük kontrast bulunan iki veya daha fazla elastik malzemeden oluşan fononik kristaller olarak adlandırılan periyodik malzemelerde ortaya çıkan boşluklu frekans bantı spektrumu, bu yapılarda elastik dalga yayılımına olan ilginin yenilenmesine yol açmıştır. Uç uca bağlanmış özdeş elemanların oluşturduğu periyodik eğilme yapılarındaki bant boşlukları üzerine yapılan hem teorik hem de deneysel çalışmalar göstermiştir ki uygun periyodik tasarımlarla, frekans spektrumunda bantlı bir yapı oluşması sağlanarak akustik ve elastik dalgalar için bir filtre mekanizması oluşturulabilmekte ve titreşim azaltımı sağlanabilmektedir [12,13].

Periyodik yapılarda ortaya çıkan empedans uyumsuzlukları, yani geometrik veya malzeme süreksizlikleri yapının bir ucundan diğerine dalga yayılmasını azaltmaktadır [14]. Araştırmacılar tarafından, periyodik yapıların sağladığı faydalar sebebi ile dalga yayılımını incelemek, bu yapılarda bant boşluğu özelliklerini ortaya çıkarmak ve dispersiyon ilişkisinin hesaplanması için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Periyodik yapılarda spektral bant yapısını analiz etmekte kullanılan en yaygın yöntemlerden bazıları şunlardır: sonlu elemanlar yöntemi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aozmutlu@nku.edu.tr (A. Özmutlu)

Geliş / Received: 09.05.2022 Kabul / Accepted: 04.07.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngmuh.1114041

(FEM) [10,15], spektral elemanlar yöntemi (SEM) [16,17], taşıma matrisi yöntemi (TMM) [5-7,11,18-25], çoklu yansıma yöntemi (MRM) [22] ve yayılma matrisi yöntemi (PMM) [26].

Bantlı frekans spektrumu, uygun periyodik tasarımlarla hedeflenen frekans aralığında, yapıda mekanik titreşim yalıtımı yapılabilmesine imkan sağlar [24]. Kirişlerin mekanik titreşimleri üzerine literatürde pek çok çalışmaya rastlamak mümkün olup, konu hem doğrusal hem de yaddoğrusal problemler yönünden etraflıca incelenmiştir. Yukarıda verilen yöntemlere ek olarak adomian ayrıştırma yöntemi (ADM), varyasyonel iterasyon yöntemi (VIM), homotopi pertürbasyon yöntemi (HPM) yaddoğrusal kirişlerin titreşim analizinde tercih edilmektedir [27-29]. Torabi ve diğ. [30], iki yığılı kütleyle sahip değişken kesitli bir kirişin, farklı mesnet koşulları altında serbest titreşim analizini VIM kullanarak yapmıştır. von Kármán tipi yadoğrusallığa sahip periyodik değişken kesitli bir Timoshenko kirişi tolerans modelleme yöntemi (TMT) kullanılarak analiz edilmiş ve yapısal titreşim kontrolüne ait sonuçlar verilmiştir [31].

Periyodik çubuklar, periyodik kirişler ve elastik zemine oturan periyodik kirişler gibi tek boyutlu periyodik yapılar, çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Lee ve diğ. [32], iki farklı malzemeden yapılmış malzeme periyodikliğine sahip sonsuz uzunluktaki bir Euler-Bernoulli (EB) kirişinde eğilme dalgalarının yayılımını araştırmışlardır. Başka bir çalışmada ise L_e ve K_e [33], geometrik periyodikliğine sahip sonsuz uzunluktaki bir EB kirişini incelemişlerdir. Periyodikliğin etkisi ile dalga dispersiyonu ve bantlı frekans spektrum yapısı gösterilmiştir. Belytschko ve Mindle [34], EB kirişinde dalga yayılımını FEM ile incelemiş olup, çalışmada kiriş elemanın kütlesi hem yığılı kütle hem de sürekli kütle şeklinde birlikte dikkate alınarak sonuçlar kesin çözümlerle karşılaştırılmıştır. Leamy [35], periyodik yapılarda dalga yayılımını incelemek için kesin dalga esaslı analiz yaklaşımını kullanmıştır. Belirsiz dalga yayılım katsayıları, süreksizliklerde yazılan koşullardan elde edilen yansıma ve geçiş matrisleri arasındaki ilişkiler yoluyla elde edilir. Rezonatörler gibi periyodik yapısal süreksizlikler bulunan bir kiriş boyunca yayılan dalgaların titreşim analizinde bu yöntem güçlü bir araç olarak kullanılır [36].

Son yıllarda deprem mühendisliği açısından dalga bariyeri olarak kullanılması ve deprem dalgalarının etkilerinin azaltılması için periyodik yapı araştırmalarına

yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle metamalzeme denilen malzemelerle oluşturulan periyodik yapılarla sismik dalgaların yıkıcı etkisi azaltılmaya veya kontrol edilmeye çalışılmaktadır [37,38]. Tarihi binalar, kullanım önemi yüksek yapılar (hastaneler, kamu binaları vb.) ve stratejik yapıların (enerji santralleri, kimyasal tesisler vb.) korunması için metamalzemelerle oluşturulmuş periyodik bariyerler, sismik dalgaları engellemek için inşaat mühendisliğinde kullanılır [39-43].

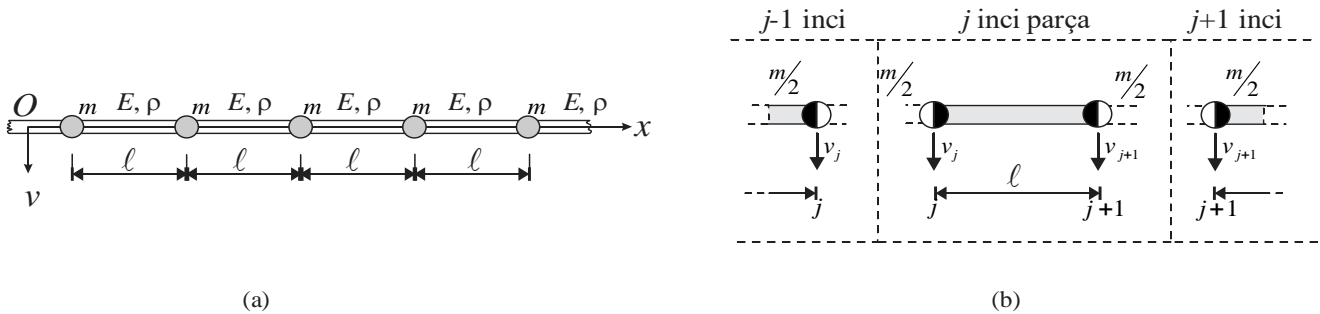
Bu araştırmada, metamalzeme olarak düşünülen periyodik yığılı kütleli Euler-Bernoulli kirişinin dinamik davranışını ortaya koymak ve kütlelerin dalga yayılımına olan etkisini göstermek amaçlanmaktadır. Önce kiriş parçası için alan yayılım matrisi doğrudan türetilmiş sonra yığılı kütleler için nokta yayılım matrisi elde edilmiştir ve bu matrisler kullanılarak birim hücre için genelleştirilmiş yayılım matrisine geçilmiştir. Kullanılan sınır koşulları ile bir özdeğer problemine indirgenerek, bulunan dalga sayıları ile kirişin bantlı frekans bantlı yapısı ortaya konmuştur. Son olarak sonsuz kirişte periyodik yığılı kütlelerin sonlu bir bölgedeki periyodik yığılı kütlelerin dalga yayılımına etkisi grafikler yardımı ile verilmiştir.

2 Materyal ve metod

Çalışmanın bu bölümünde Euler-Bernoulli kirişinin yönetici denklemi, kiriş parçasının için alan yayılım matrisi ve yığılı kütleler için nokta yayılım matrisi, birim hücre için genelleştirilmiş yayılım matrisi ve dispersiyon denklemi verilmiştir. Sonlu bölgedeki periyodik yığılı kütlelerin dalga yayılımına etkisi dalga katsayıları yöntemi ile incelenmiş, kütlelerin dalga bariyeri olarak iletkenlik cevabı elde edilmiştir.

2.1 Analitik model

Ekseni boyunca malzeme, geometri, sınır koşulu ve yığılı kütleler arasındaki açıklığı periyodik olan bir EB kirişi göz önüne alalım (Şekil 1). Periyodik kirişi oluşturan kiriş parçaları ve yığılı kütleler arasında tam bir yapışmanın olduğu varsayılmıştır. Kirişin yapıldığı malzeme homojen, izotrop ve lineer elastik kabul edilmiş olup küçük şekildeğiştirme teorisi göz önüne alınmakta ve düzlem kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalmaktadır. Malzemede ρ kütle yoğunluğu, E elastisite modülü, ℓ periyodik açıklık, A en kesit alanı ve I eylemsizlik momentidir.



Şekil 1. Analitik Model: (a) Periyodik yığılı kütleli EB kirişi; (b) birim periyodik hücre

Euler-Bernoulli kiriş elemanı için hareket denklemi **Denklem (1)**'deki gibi elde edilmektedir [44].

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (1)$$

Burada $v(x;t)$ düşey yerdeğiştirme, $T(x;t)$ kiriş eleman kesitindeki kesme kuvvetidir. EB kiriş elemanı için kinematik ilişkiden $\frac{\partial v}{\partial x} = \theta$, bünye bağıntısından

$\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{M}{EI}$, moment dengesinden $\frac{\partial M}{\partial x} = T$ ilişkisi elde edilir. Burada $\theta(x;t)$ kesit dönmesi, $M(x;t)$ kiriş eleman kesitindeki eğilme momentidir.

2.2 Kiriş parçaları için alan yayılım matrisi

Kirişteki düşey yerdeğiştirme, dönme, eğilme momenti ve kesme kuvveti $v(x;t)$, $\theta(x;t)$, $M(x;t)$ ve $T(x;t)$ olmak üzere ortamın $e^{-i\omega t}$ yapısında, $\omega =$ açısal frekansı ile zamana bağlı harmonik bir hareket yaptığı göz önüne alınırsa, bu büyüklükler **Denklem (2)**'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} v(x;t) &= V(x)e^{-i\omega t} \\ \theta(x;t) &= \Theta(x)e^{-i\omega t} \\ M(x;t) &= \tilde{M}(x)e^{-i\omega t} \\ T(x;t) &= \tilde{T}(x)e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

Bu durumda, bu büyüklerin oluşturduğu durum vektörü $\mathbf{f}(x) = \{V, \Theta, \tilde{M}, \tilde{T}\}^T(x)$ şeklinde yazılır. Ayrıklaştırılmış büyüklüklerin yönetici denklemde, kinematik ilişkide, bünye bağıntısında ve moment denge denklemine yerine koyulursa, aşağıdaki 1. mertebeden diferansiyel bağıntılar matris formunda durum vektörü ile **Denklem (3)**'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{d\mathbf{f}}{dx} = \mathbf{B}\mathbf{f}(x) \quad (3)$$

Burada \mathbf{B} sabit katsayılı bir matris olup ifadesi aşağıda **Denklem (4)**'de verilmiştir.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{EI} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\rho A \omega^2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

\mathbf{B} matrisi, her bir kiriş parçası için x 'in sürekli bir fonksiyonuysa, herhangi bir kiriş parçasında $x = x_0$

noktasındaki belirli başlangıç koşulları için x noktasında **Denklem (3)**'ün tek bir çözümü vardır [26]. Şimdi, \mathbf{B} 'nin ayrık özdeğerlerinin var olduğunu ve bunlara karşılık gelen \mathbf{X} doğrusal bağımsız özvektörleri olduğunu kabul edelim. Bu durumda, **Denklem (3)**'ün köşegenleştirme yöntemi ile çözümü aşağıdaki gibi yapılır.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(x) &= e^{\mathbf{B}(x-x_0)} \mathbf{f}(x_0) \\ &= \mathbf{X} e^{\mathbf{\Lambda}(x-x_0)} \mathbf{X}^{-1} \mathbf{f}(x_0) \\ &= \mathbf{P}_f(x, x_0) \mathbf{f}(x_0) \end{aligned} \quad (5)$$

Burada $\mathbf{P}_f(x, x_0)$, kiriş parçası için "alan" yayılım matrisi olup, açık hali **Denklem (6)**'da verilmiştir.

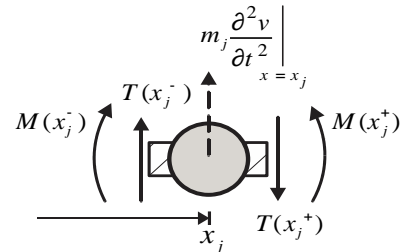
$$\begin{aligned} \mathbf{P}_f(x, x_0) &= \mathbf{X} e^{\mathbf{\Lambda}(x-x_0)} \mathbf{X}^{-1} \\ &= \mathbf{X} \mathbf{\Lambda}_f \mathbf{X}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

Burada $\mathbf{\Lambda}_f$, **Denklem (7)**'de verilmiştir.

$$\mathbf{\Lambda}_f = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1(x-x_0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2(x-x_0)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda_3(x-x_0)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_4(x-x_0)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 Yığılı kütleler için nokta yayılım matrisi

Modelde kiriş parçaları arasında yığılı kütleler bulunmaktadır. Kiriş ve kütlelerin birbirine tam bağlı olduğu varsayımından hareketle yığılı kütleler için nokta yayılım matrisi elde edilecektir [45]. Herhangi bir j numaralı kiriş parçasında uç yerdeğiştirme vektörleri **Şekil 1b**'de görülmektedir. Herhangi bir j ve $j+1$ inci hücrelerin ortak sınırında, $x = x_j$ noktasındaki yığılı kütle ve buna etkileyen kesit zorları ile atalet kuvveti **Şekil 2**'de verilmiştir.



Şekil 2. j noktasındaki yığılı kütle için serbest cisim diyagramı

Bu noktada yazılacak hareket denklemi ve süreklilik koşulları üzerinden nokta yayılım matrisi türetilenektir. **Denklem (8)**'de dinamik denge denklemi verilmiştir.

$$\tilde{T}(x_j^+) = \tilde{T}(x_j^-) - \omega^2 m_j V(x_j^-) \quad (8)$$

Burada m_j , j noktasındaki yığılı küttedir. Sırası ile yerdeğiştirme, dönme ve moment süreklilik koşulları ise [Denklem \(9\)](#)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} V(x_j^+) &= V(x_j^-) = V(x_j) \\ \Theta(x_j^+) &= \Theta(x_j^-) = \Theta(x_j) \\ \tilde{M}(x_j^+) &= \tilde{M}(x_j^-) \end{aligned} \quad (9)$$

Yukarıda verilen dinamik denklem ve süreklilik bağıntıları ayrıklaştırma yapıp düzenlenirse, bu noktanın sağındaki ve solundaki durum vektörleri ile nokta yayılım matrisi arasındaki ilişki [Denklem \(10\)](#)'da olduğu gibi elde edilir.

$$\mathbf{f}(x_j^+) = \mathbf{P}_p(x_j)\mathbf{f}(x_j^-) \quad (10)$$

Burada geçen $\mathbf{P}_p(x_j)$ ifadesi "nokta" yayılım matrisi olup açık hali [Denklem \(11\)](#)'de verilmiştir.

$$\mathbf{P}_p(x_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\omega^2 m_j & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.4 Birim hücre için genelleştirilmiş yayılım matrisi ve dispersiyon denklemi

Bir alan yayılım matrisi ve iki nokta yayılım matrisinden oluşan bir periyodik birim hücre için başlangıç noktasından bitiş noktası arasında durum vektörleri ilişkisi [Denklem \(10\)](#)'da verilmiştir.

$$\mathbf{f}(x_0 + \ell) = \mathbf{P}_c(\ell)\mathbf{f}(x_0) \quad (10)$$

Burada \mathbf{P}_c "hücre" yayılım matrisi olup açık ifadesi [Denklem \(11\)](#)'de verilmiştir.

$$\mathbf{P}_c(\ell) = \mathbf{P}_p(m/2)\mathbf{P}_f(\ell)\mathbf{P}_p(m/2) \quad (11)$$

Birim hücre kendisini ℓ aralıklı olarak tekrar eden bir periyodik yapı oluşturur. Bu n hücreli periyodik yapı boyunca durum vektörü [Denklem \(12\)](#)'deki gibi yazılır.

$$\mathbf{f}(x_0 + n\ell) = \mathbf{P}_c^n(\ell)\mathbf{f}(x_0), \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (12)$$

Ele alınan sonsuz uzun kirişin kararlı hal çözümü için geçerli, periyodik sınır koşulları [Denklem \(13\)](#)'de verilmiştir.

$$\mathbf{f}(x_0 + n\ell) = \mathbf{f}(x_0), \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (13)$$

Periyodiklik gereği zamana göre davranış harmonik ise Floquet-Bloch teoremi [4] kullanılarak [Denklem \(14\)](#)'deki gibi yazılır.

$$\mathbf{f}(x_0 + n\ell) = e^{ik_c n\ell} \mathbf{f}(x_0) \quad (14)$$

Burada k_c kiriş parçası ve oluşturduğu periyodik yapı için dalga sayısıdır. Tam periyodik yapılarda $\mathbf{P}_c^n(\ell)$ matrisi bütün hücrelerde aynıdır, dolayısı ile $n = 1$ alınır ve [Denklem \(12\)](#) ve [Denklem \(14\)](#) kullanılarak yayılım matrisinin özdeğer problemi [Denklem \(15\)](#)'deki gibi elde edilir.

$$\det(\mathbf{P}_c(\ell) - e^{ik_c \ell} \mathbf{I}) = 0 \quad (15)$$

Periyodik hücre için özdeğerler ve özvektörler [Denklem \(15\)](#) yardımı ile hesaplanabilir. Burada Λ_c periyodik hücre için özdeğerlerdir. Periyodik hücre için dispersiyon ilişkisini veren bu denklemin $\Lambda_{c,12} = e^{\pm ik_{c,1}\ell}$ ve $\Lambda_{c,34} = e^{\pm ik_{c,1}\ell}$ şeklinde dört tane ayrık kökü vardır. Özdeğerler ω frekansına bağlı olup, her frekans değerine karşılık periyodik hücrenin özdeğerleri hesaplanabilir. Hesaplanan özdeğerleri kullanılarak, k_c [Denklem \(16\)](#) yardımı ile bulunur.

$$k_{c,34} = \frac{1}{\ell} \arg(\Lambda_{c,34}) \quad (16)$$

Burada $\Lambda_{c,12}$, pozitif ve negatif yönde üstel olarak bozulan dalgalara karşılık gelir ve sönen dalgalar olarak bilinir. $\Lambda_{c,34}$ ise pozitif ve negatif yönde ilerleyen harmonik dalgalara karşılık gelir ve bu dalgalar bozulma olmadan yayılırlar. Bulunan k_c değerleri incelendiğine belli frekans aralığında k_c 'nin sürekli değerler aldığı görülür. k_c 'nin bu değerleri izinli dalga sayısı olarak adlandırılır. Dalga sayısı spektrumundaki bantlar, farklı kütlelerden saçılan dalgaların girişiminin sonucudur. İzinli k_c değerleri, kendini $2\pi/\ell$ periyodu ile tekrarlar ve dalga sayısı uzayında Brillouin bölgeleri diye isimlendirilen bir örgü oluşturur. Faz ve grup hızları sırası ile, $c_c^{ph} = \omega/k_c$ ve $c_c^{gr} = d\omega/dk_c$ bağıntıları ile hesaplanabilir.

2.5 Sonlu periyodik bölgede dalga hareketi

Bu bölümde, bir boyutlu (1B) sonlu bir bölgede periyodik yığılı kütlelerin bulunması haline bunların bariyer etkisinin araştırılmasına, iletim fonksiyonunun elde edilmesine dair ve dalga hareketi ile ilişkili yer değiştirme mod şekillerinin nasıl hesaplanacağı ile ilgili bir formülasyon sunulmaktadır. Bunun için önce, böyle bir ortamda dalga hareketini tanımlamak için gerekli ifadeler elde edilmiştir.

2.5.1 Durum vektörü dalga katsayıları ilişkisi

Homojen, izotrop ve doğrusal elastik bir kirişte $\mathbf{f}(x)$ durum vektörü ve \mathbf{a} dalga katsayıları arasındaki ilişki kurulmak istensin [46]. Bu durumda yerdeğiştirme ifadesi aşağıda Denklem (17)'de verilmiştir.

$$v(x,t) = (A_+ e^{ikx} + A_- e^{-ikx} A_+^N e^{kx} + A_-^N e^{-kx}) e^{-i\omega t} \quad (17)$$

A_+ ve A_- kompleks dalga katsayıları olup, $A_+ e^{ikx-i\omega t}$ ve $A_- e^{-ikx-i\omega t}$ sırası ile pozitif ve negatif x -doğrultularında yayılan harmonik dalgalardır. A_+^N ve A_-^N yakın alan terimleri olup, üstel olarak sönen dalgalardır. Burada k dalga sayısı olup Denklem (18)'de verilmiştir.

$$k = \sqrt[4]{\omega^2 r_g c_L} \quad (18)$$

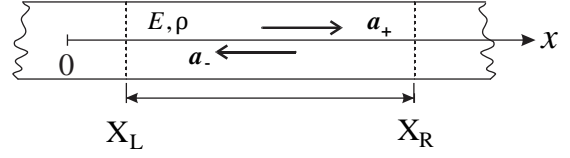
Burada $r_g = \sqrt{I/A}$ kiriş parçası için eylemsizlik yarıçapı ve $c_L = \sqrt{E/\rho}$ kiriş parçasındaki boyuna dalga hızıdır. Dalga katsayıları bilindiğinde kirişin herhangi bir noktasındaki yer değiştirmesi bulunabilir, bununla birlikte yukarıda tanımlanan kinematik bağıntı, bünye bağıntısı ve denge ilişkisinden sırası ile kirişin eğimi, eğilme momenti ve kesme kuvveti hesaplanabilir. Herhangi bir kiriş parçasında kararlı hal çözümü için geçerli durum vektörü matris formunda Denklem (19)'daki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{f}(x) = \mathbf{X} \boldsymbol{\Lambda}(x) \mathbf{a} \quad (19)$$

Burada geçen ifadelerin açık hali Denklem (20)'de verilmiştir.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ ik & k & -ik & -k \\ EIk^2 & -EIk^2 & EIk^2 & -EIk^2 \\ iEIk^3 & -EIk^3 & -iEIk^3 & EIk^3 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\Lambda}(x) = \begin{bmatrix} e^{ikx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{kx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-ikx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-kx} \end{bmatrix} \quad \mathbf{a} = \begin{Bmatrix} A_+ \\ A_+^N \\ A_- \\ A_-^N \end{Bmatrix} \quad (20)$$

Şimdi aynı kiriş parçasında $x = X_L$ ve $x = X_R$ gibi iki noktada tanımlı durum vektörleri ve dalga katsayıları arasındaki ilişkiyi kuralım (Bk. Şekil 3).



Şekil 3. Tanımlı sınırlar arasında dalga yayılımı

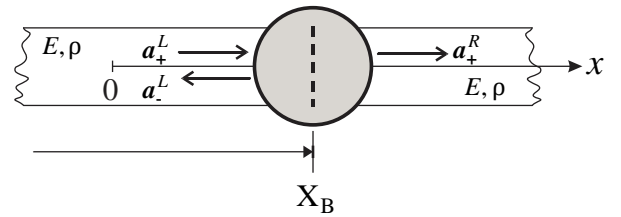
$x = X_L$ noktasındaki $\mathbf{f}(X_L)$ durum vektörünün bilindiğini kabul edelim. O zaman Denklem (19) uyarınca $\mathbf{f}(X_L) = \mathbf{X} \boldsymbol{\Lambda}(X_L) \mathbf{a}$ şeklinde yazılabilir. $x = X_R$ noktasındaki $\mathbf{f}(X_R)$ durum vektörü Denklem (21)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(X_R) &= \mathbf{X} \boldsymbol{\Lambda}(X_R) \mathbf{a} \\ &= \mathbf{X} \boldsymbol{\Lambda}(X_R - X_L) \mathbf{X}^{-1} \mathbf{f}(X_L) \\ &= \mathbf{P}_f(X_R - X_L) \mathbf{f}(X_L) \end{aligned} \quad (21)$$

Burada $\mathbf{P}_f(X_R - X_L)$, aynı ortamda $x = X_L$ noktasındaki durum vektörünü soldan sağa taşıyan matristir.

2.5.2 Sınırdan yansımaya ve geçiş

Şimdi m yığılı kütlelerinin olduğu $x = X_B$ gibi bir sınırdaki durumu inceleyelim. Bu noktanın sağındaki ve solundaki ortamın özelliklerinin aynı olduğunu ve soldaki ortamdan gelip sınırı geçen dalganın sağdaki ortamdan geri yansımadağını (yutucu sınır) varsayalım (Bk. Şekil 4).



Şekil 4. Sınırdan geçen ve yansıyan dalgalar

Sırası ile soldaki $x < X_B^-$ ve sağdaki $x > X_B^+$ ortamlarındaki yerdeğiştirmeleri Denklem (22)'de tanımlayalım.

$$\begin{aligned} V^L(x) &= A_+ e^{ikx} + A_+^N e^{kx} + A_- e^{-ikx} + A_-^N e^{-kx} \\ V^R(x) &= B_+ e^{ikx} + B_- e^{-kx} \end{aligned} \quad (22)$$

Geçiş ve yansımaya katsayılarını bulmak için dinamik ve geometrik sınır koşulları yazılacaktır. Sınırın sonsuz küçük

solunda $x = X_B^-$ noktası için durum vektörü $\mathbf{f}(X_B^-) = \mathbf{X} \Lambda(X_B^-) \mathbf{a}^L$ ve sonsuz küçük sağında $x = X_B^+$ için durum vektörü $\mathbf{f}(X_B^+) = \mathbf{X} \Lambda(X_B^+) \mathbf{a}^R$ şeklinde yazılır. Burada $\mathbf{a}^L = \{A_+, A_+, A_-, A_-\}^T$ ve $\mathbf{a}^R = \{B_+, 0, 0, B_-\}^T$ sırası ile sınırın solundaki ve sağındaki ortama ait dalga katsayıları vektörleridir. Yukarıda Denklem (8) ve (9) ile verilen sınır koşulları kullanılırsa dalga katsayısı vektörleri arasında Denklem (23)'de verilen bağıntı elde edilir.

$$\mathbf{a}^R = \bar{\mathbf{P}}(X_B) \mathbf{a}^L \quad (23)$$

Burada geçen $\bar{\mathbf{P}}(X_B)$ sınırdan soldan sağa doğru dalga katsayısı vektörlerini taşıyan matrisi olup açık hali Denklem (24)'de verilmiştir.

$$\bar{\mathbf{P}}(X_B) = [\Lambda(X_B^+)]^{-1} [\mathbf{X}]^{-1} \mathbf{P}_p(X_B) [\mathbf{X}] [\Lambda(X_B^-)] \quad (24)$$

Bu denklem yutucu sınır koşullarından bağımsız olarak herhangi bir sınırdan geçerlidir.

2.5.3 Periyodik yığılı kütlelerin bariyer etkisi

Bu aşamada η_{mass} adet sonlu sayıda yığılı kütlelerin bulunduğu geometrik ve malzeme özellikleri bakımından periyodik bir kiriş göz önüne alalım (Bk. Şekil 5). Sonlu bölge (bariyer) boyunca $H_{bar}(\omega)$ iletkenlik fonksiyonunu bulalım. Bariyerin uzunluğu L_{bar} , kütle sayısına bağlı olarak Denklem (25)'deki gibi bulunur.

$$L_{bar} = X_R^+ - X_L^- = (\eta_{mass} - 1)\ell \quad (25)$$

Burada, X_L^- : 1 inci kütlelerin sonsuz küçük solundaki noktanın x koordinatı ve X_R^+ : sonuncu kütlelerin sonsuz küçük sağındaki noktanın x koordinatıdır.

Bariyerdeki 1 inci kütlelerin solunda kalan kirişte dalga katsayısı vektörü $\mathbf{a}^L = \{A_+, A_+, A_-, A_-\}^T$ ise sonuncu kütlelerin sağında kalan kirişte dalga katsayısı vektörü $\mathbf{a}^R = \{B_+, B_+, B_-, B_-\}^T$ olur. B_- terimi radyasyon koşulu gereği sıfırdır. Ayrıca sınır koşulları gereği $\lim_{x \rightarrow \infty} V^L = 0 \rightarrow A_-^N = 0$ ve $\lim_{x \rightarrow \infty} V^R = 0 \rightarrow B_+^N = 0$

sağlatılmalıdır. $x = X_L^-$ noktasında durum vektörü Denklem (26)'deki gibi yazılır.

$$\mathbf{f}(X_L^-) = \mathbf{X} \Lambda(X_L^-) \mathbf{a}^L \quad (26)$$

$x = X_R^+$ noktasında ise durum vektörü Denklem (27)'deki gibi yazılır.

$$\mathbf{f}(X_R^+) = \mathbf{X} \Lambda(X_R^+) \mathbf{a}^R \quad (27)$$

$\mathbf{f}(X_L^-)$ ve $\mathbf{f}(X_R^+)$ durum vektörleri arasındaki bağıntı yayılım matrisleri yardımı ile Denklem (28)'deki gibi kurulur.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(X_R^+) &= \mathbf{f}(X_L^- + (\eta_{mass} - 1)\ell) \\ &= \mathbf{P}_p(m/2) [\mathbf{P}_c(\ell)]^{(\eta_{mass} - 1)} \mathbf{P}_p(m/2) \mathbf{f}(X_L^-) \\ &= \mathbf{P}_{bar} \mathbf{f}(X_L^-) \end{aligned} \quad (28)$$

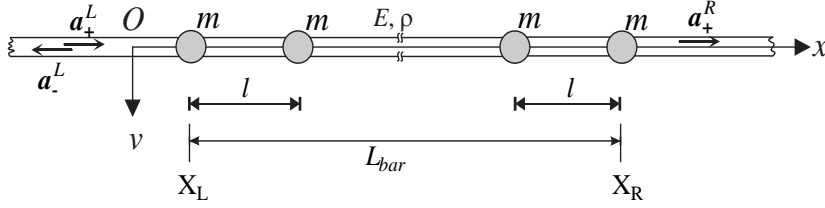
Burada \mathbf{P}_{bar} bariyer yayılım matrisi olup, bariyer boyunca durum vektörünün taşıdığı bilgiyi içerir. Bariyer öncesi ve sonrası dalga vektörleri arasındaki ilişki Denklem (29)'daki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}^R &= [\Lambda(X_R^+)]^{-1} [\mathbf{X}]^{-1} \mathbf{f}(X_R^+) \\ &= [\Lambda(X_R^+)]^{-1} [\mathbf{X}]^{-1} \mathbf{P}_{bar} \mathbf{X} \Lambda(X_L^-) \mathbf{a}^L \\ &= \mathbf{T}_{bar} \mathbf{a}^L \end{aligned} \quad (29)$$

Burada \mathbf{T}_{bar} soldan sağa doğru dalga katsayısı vektörlerinin iletim matrisidir. Problem bu hali ile dört bilinmeyenli dört denkleme indirgenmiştir. Eğer $A_+ = 1$ seçilirse diğer bilinmeyen dalga katsayıları bu denklem takımı çözülerek belirlenir.

Çözüm sonucunda bariyerden geçen ve yansıyan dalgalar için katsayılar Denklem (30)'daki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} A_+^N &= -\frac{T_{bar}(2,3) \cdot T_{bar}(3,1) - T_{bar}(2,1) \cdot T_{bar}(3,3)}{T_{bar}(2,3) \cdot T_{bar}(3,2) - T_{bar}(2,2) \cdot T_{bar}(3,3)} \\ A_- &= -\frac{T_{bar}(2,1) \cdot T_{bar}(3,2) - T_{bar}(2,2) \cdot T_{bar}(3,1)}{T_{bar}(2,3) \cdot T_{bar}(3,2) - T_{bar}(2,2) \cdot T_{bar}(3,3)} \\ B_+ &= T_{bar}(1,1) + T_{bar}(1,2) A_+^N + T_{bar}(1,3) A_- \\ B_-^N &= T_{bar}(4,1) + T_{bar}(4,2) A_+^N + T_{bar}(4,3) A_- \end{aligned} \quad (30)$$



Şekil 5. Sonlu bölgede periyodik yığılı kütle bariyeri

Ek olarak bu katsayıların kullanılması ile bariyere gelen ve bariyeri geçen dalga arasında genlik ve faz ilişkisini veren iletkenlik fonksiyonu [Denklem \(31\)](#)'de verilmiştir.

$$H_{bar}(\omega) = \frac{V^{out}}{V^{in}} = \frac{A_{\pm}}{B_{\pm}} e^{ik(X_R - X_L)} \quad (31)$$

Burada V^{in} ve V^{out} sırasıyla bariyer öncesi ve sonrası kırışteki giriş ve çıkış yerdeğiştirme değerleridir. [Denklem \(31\)](#) kullanılarak sonsuz periyodik bir yapının frekans bantlılık derecesi ile sonlu bölgede periyodik yapının kıyaslanabilir.

2.5.4 Yerdeğiştirme mod şekilleri

Şimdi bariyer boyunca yerdeğiştirme mod şeklini elde edelim. Bariyer içindeki yapıların dalga katsayı fonksiyonları, $x = X_L$ gibi bir sınır noktasının solundaki ve sağındaki katsayılar arasındaki ilişkiye dayalı olarak özyinelemeli olarak hesaplanabilir. Bariyer içindeki ilk birim hücrede katsayı fonksiyonu [Denklem \(32\)](#)'deki gibi elde edilir.

$$\mathbf{a}^{(1)} = \left[\Lambda(X_L^+) \right]^{-1} \left[\mathbf{X} \right]^{-1} \mathbf{P}_p \Big|_{X_L} \left[\mathbf{X} \right] \left[\Lambda(X_L^-) \right] \mathbf{a}^L \quad (32)$$

Yine ilk birim hücrede yerdeğiştirme fonksiyonu [Denklem \(33\)](#)'deki gibi elde edilir.

$$V^{(1)}(x) = \mathbf{a}^{(1)}_{(1,1)} e^{ikx} + \mathbf{a}^{(1)}_{(1,2)} e^{kx} + \mathbf{a}^{(1)}_{(1,3)} e^{-ikx} + \mathbf{a}^{(1)}_{(1,4)} e^{-kx}, \quad X_L^+ < x < X_L^- + \ell \quad (33)$$

Bu hesaplama şekli ($\eta_{mass} - 1$) sayıdaki birim hücre için tekrar edilerek bariyer boyunca yerdeğiştirme mod şeklinin değişimi belirlenmiş olur. Sırasıyla bariyerin solunda ve sağında kalan kırışte yerdeğiştirmeler [Denklem \(34\)](#)'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} V^L(x) &= A_+ e^{ikx} + A_+^N e^{kx} + A_- e^{-ikx}, \quad x < X_L^- \\ V^R(x) &= B_+ e^{ikx} + B_-^N e^{-kx}, \quad x > X_R^+ \end{aligned} \quad (34)$$

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, örnek bir durum olarak seçilmiş bir birim hücre tasarımına sahip periyodik yığılı kütleli bir kırışın davranışı ele alınmaktadır. Birim hücre, [Şekil 1b](#)'de gösterildiği gibi iki yığılı kütle ve bir kırış parçasından oluşmaktadır. Kırış parçasının uzunluğu $\ell = 1$ m ve malzeme özellikleri $\rho = 2500$ kg/m³, $E = 32$ GPa ve Poisson oranı $\nu = 0.2$ olarak seçilmiştir. Birim hücre için toplam kütle $m_c = m + m_{EB}$ dir. Burada $m =$ yığılı kütle ve $m_{EB} = \rho AL =$ yalnız kırış parçasının kütlesidir. Yığılı kütlelerin toplam kütleyle oranı $\alpha = m / m_c$ bağılı olarak kütlelerin dispersiyona olan etkisi araştırılmıştır.

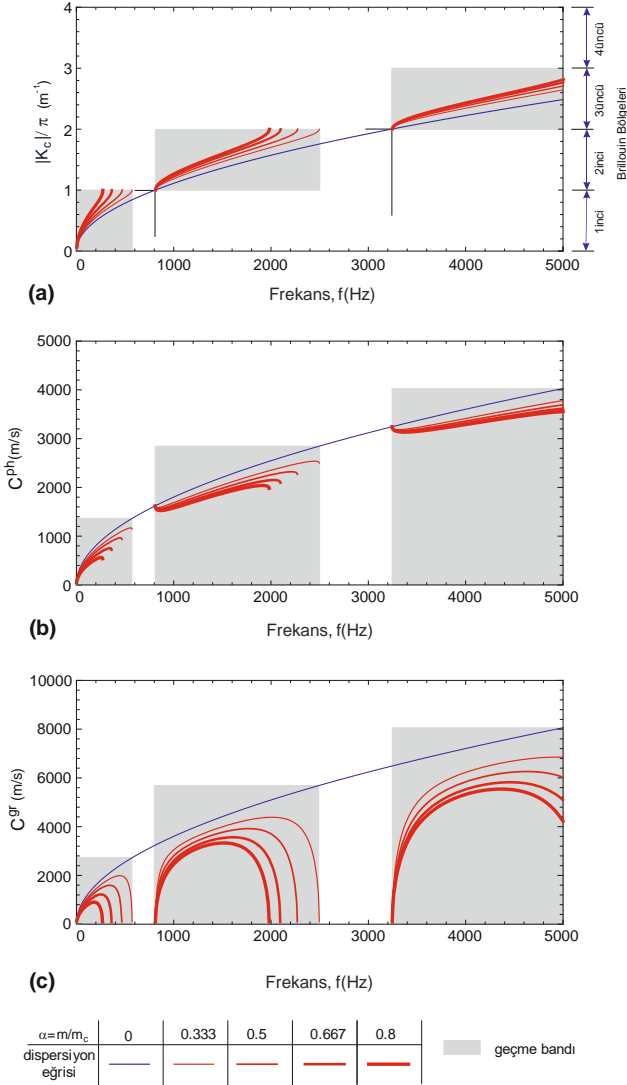
3.1 Sonsuz periyodik kırışın frekans spektrumu

Yalnız EB kırışında eğilme dalgalarının yayılımı dispersif olup bu ilişki [Şekil 6a](#)'da görülmektedir. Sonsuz periyodik yığılı kütleli kırışte yayılan eğilme dalgası, α kütle oranına bağılı olarak bant boşluklu bir dispersiyon ilişkisini göstermektedir ([Şekil 6a](#)). Dalga sayısının $k_c = \pi$ değeri, 1. Brillouin Bölgesi olarak bilinen sınıra karşılık gelir. Yığılı kütlelerin etkisi ile dalga sayılarının belli frekanslar için değer aldığı görülmektedir. Dalga sayılarının değer aldığı frekanslarda dalga yayılımı gerçekleşir (geçme bandı), diğer frekanslarda dalga yayılımı gerçekleşmez (durma bandı). Frekans spektrumunun bantlı yapısı, dalga saçılımı ve dispersiyonuyla oluşan dalga girişim mekanizmalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Eğilme dalgasının faz hızındaki değişimi, [Şekil 6b](#)'de verilmiştir. Seçilen malzeme özellikleri için boyuna dalga hızı $c_L = 3577.71$ m/s dir. Yığılı kütlelerin faz hızına etkisi, frekans ve kütle oranına bağılı olarak değişmekte ve yalnızca geçme bantlarındaki frekanslar için yayılım gerçekleşmektedir. Kütle oranı ($\alpha > 0$) için dalgalar, yalnız bir kırışe göre daha düşük hızlarda yayılır. Kütle oranı arttıkça geçme bantlarının nispeten daraldığı, kütlelerin bir mekanik filtre işlevi gördüğü ve faz hızlarının da azaldığı anlaşılmaktadır.

Eğilme dalgasının grup hızındaki değişimi, [Şekil 6c](#)'de verilmiştir. Yığılı kütlelerin α oranına bağılı olarak grup hızına etkisinin, frekansa göre değişimi benzer şekilde yayılımın geçme bantlarındaki frekans değerlerinde gerçekleşmektedir. Kütle oranı ($\alpha > 0$) için grup hızları

geçme bantlarının başlangıç ve bitişinde sıfırdır. Yalnız bir kırışte grup hızının, faz hızının 2 katı olduğu görülmektedir. Kütle oranının grup hızının değişimine olan etkisinin faz hızına göre daha fazla olduğu görülmektedir.

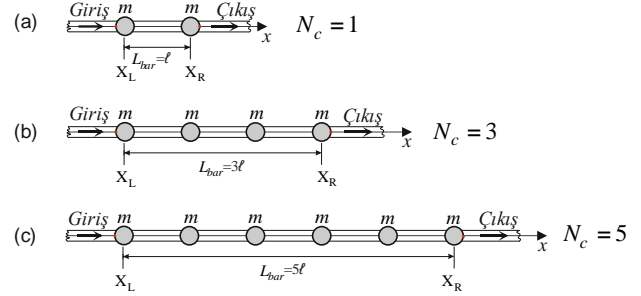


Şekil 6. Bir boyutlu periyodik yapıda, (a) dispersiyon ilişkisinin, (b) faz hızlarının ve (c) grup hızlarının kütle oranına bağlı değişimi

3.2 Sonlu periyodik kırışın iletkenlik cevabı

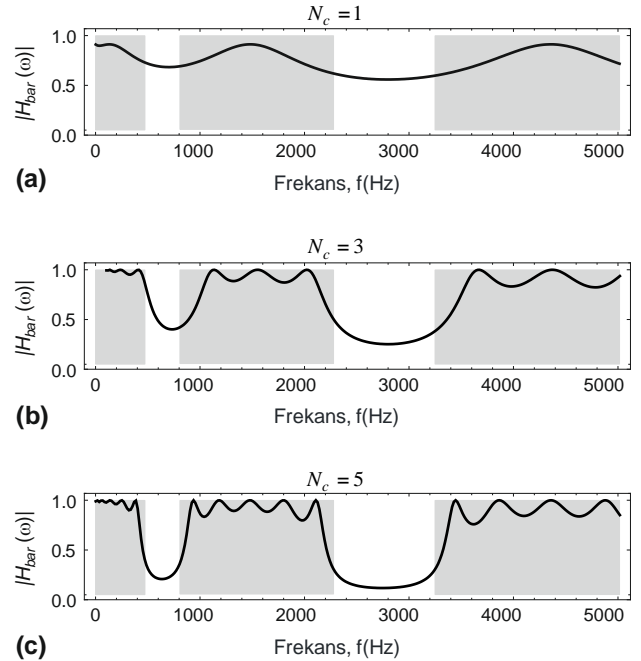
Sonsuz uzunluktaki bir kırışta sonlu bir bölgedeki periyodikliğin etkisi Şekil 7’de gösterildiği gibi, her biri sırasıyla $N_c = 1, 3, 5$ adet birim hücreden oluşan üç farklı bariyer üzerinden incelenecektir. Denklem (31) ile verilen $H_{bar}(\omega)$ iletkenlik fonksiyonu, ele alınan her bir bariyer tipi $\alpha = 1$ kütle oranı için $f \in (0, 5000 \text{ Hz})$ frekans aralığında incelenmiş ve sonuçları Şekil 8’de sunulmuştur. Bu denklem kullanılarak, sonsuz periyodik bir yapının frekans bantlılık cevabı ile birkaç hücreden oluşan sonlu bir bölgedeki periyodik yapı için elde edilen iletim cevabı kıyaslanmak istenmiştir.

Frekans cevabı açısından 1 veya 3 adet birim hücreden oluşan bariyerler için elde edilen bulguların sonsuz periyodik yapıya ait cevaba çok iyi uymadığı açıkça görülmektedir (Şekil 8a Şekil 8b).



Şekil 7. Sonlu bölgede (a) 1, (b) 2 ve (c) 5 hücreli bariyer tasarımı

Bununla birlikte, sadece 5 adet birim hücre ile oluşturulan bariyerin, iletkenlik cevabı, sonsuz ortama karşılık gelen yanıt ile oldukça uyumludur (Şekil 8c). Geçiş bandı frekanslarında iletim değeri yüksekken, durma bandı frekanslarında ise iletim değerleri düşüktür. Bu bulgu, ortaya çıkan Bragg saçılma mekanizmasının sonlu bir periyodiklik derecesinde bile frekans bantlı yapının oluşmasında ne kadar etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Sonlu bölgede $H_{bar}(\omega)$ iletkenlik fonksiyonunun kütle oranı $\alpha = 1$ değeri için (a) 1, (b) 3 ve (c) 5 birim hücreli bariyere göre değişimi

3.3 Sonlu periyodik kırışta yerdeğıştirmeler

Bu bölümde sonlu bir bölgede $N_c = 5$ hücreden oluşan bir bariyerde, periyodik yığılı kütlelerin yer değıştirme üzerine etkisi frekansa bağlı olarak incelenmiştir. Yığılı kütle oranı sırası ile $\alpha = 0.333, 0.5, 0.667, 0.8$ alınarak bu

oranlar için x -ekseni boyunca yer değiştirmelerin değişimi verilmiştir. Bariyer öncesinde birim genliğe sahip bir dalga alınmış ve soldan sağa doğru ilerleyen bu dalganın, bariyer de dahil $5L_{bar}$ uzunluğunda bir bölge boyunca, neden olduğu $V(x)$ 'in değişimi incelenmiştir. Bariyerin önünde, $V(x)$ 'in değişimi, gelen ve yansıyan dalganın girişim modelini göstermektedir. Bariyerin arkasında, sağa doğru yayılan tek bir dalga olduğu ve malzeme sönümü olmadığı için yerdeğiştirme genliği sabittir.

1'inci hal olarak $\alpha = 0.333$ "hafif" kütle oranı için bariyeri geçen dalganın yerdeğiştirme genliği, geçme ve durma bantları için araştırılmıştır. İlk iki geçme bandı frekans aralığı $f_{p1} \in (0, 572 \text{ Hz})$ ve $f_{p2} \in (810, 2498 \text{ Hz})$ 1'inci ve 2'nci durma bandı frekans aralığı $f_{s1} \in (573, 809 \text{ Hz})$ ve $f_{s2} \in (2499, 3242 \text{ Hz})$ dir. Geçme ve durma bandı içinde seçilen bir frekans değeri için bariyeri geçen dalganın genliğine bakılmıştır (Şekil 9). Her iki geçme bandı frekansları için gelen dalga neredeyse olduğu gibi iletilmiştir. Hatta 2'nci geçme bandı frekansları için bariyerin içinde genlikler artmıştır (Şekil 9a, Şekil 9c). 1'inci durma bandı frekansları için bariyeri geçince yerdeğiştirme genliği 0.4, 2'nci durma bandı frekansları için genlik 0.2 değerine düşmüştür (Şekil 9b, Şekil 9d). Durma bandında seçilen frekans değerleri için genlikler bariyeri geçince hızla düşmektedir.

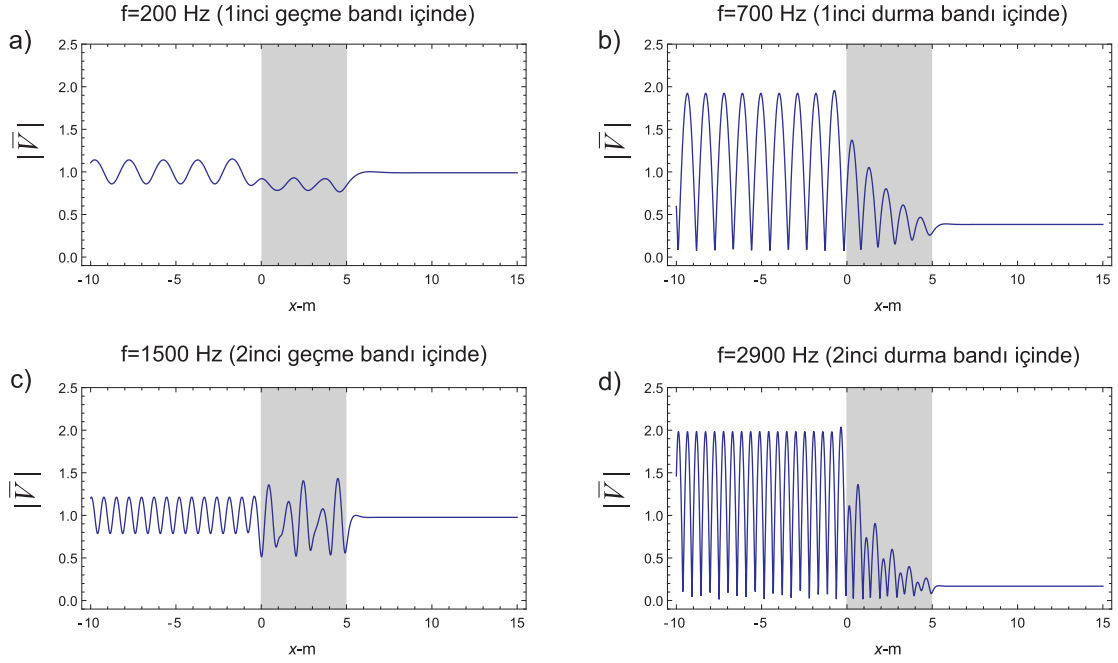
2'nci hal olarak $\alpha = 0.5$ "orta" kütle oranı için bariyeri geçen dalganın yerdeğiştirme genliği, geçme ve durma bantları için araştırılmıştır. İlk iki geçme bandı frekans aralığı $f_{p1} \in (0, 467 \text{ Hz})$ ve $f_{p2} \in (810, 2271 \text{ Hz})$, 1'inci ve 2'nci durma bandı frekans aralığı $f_{s1} \in (468, 809 \text{ Hz})$ ve

$f_{s2} \in (2272, 3242 \text{ Hz})$ dir. Her iki geçme bandı içinde seçilen frekans değerleri için bariyeri geçen dalganın genliğine bakıldığında gelen dalganın neredeyse olduğu gibi iletildiği görülmektedir. Hatta 2'nci geçme bandı frekansları için bariyerin içinde genlikler artmıştır (Şekil 10a, Şekil 10c). 1'inci durma bandı frekansları için yerdeğiştirme genliği bariyeri geçince 0.2, 2'nci durma bandı frekansları için genlik 0.1 değerine düşmüştür (Şekil 10b, Şekil 10d). Durma bandında seçilen frekans değerleri için genlikler bariyeri içinde üstel olarak düşmektedir. Yığılı kütle oranının artması genlikleri bağıl olarak daha da düşürmüştür.

3'üncü hal olarak $\alpha = 0.667$ "yüksek" kütle oranı için bariyeri geçen dalganın yerdeğiştirme genliği, geçme ve durma bantları için araştırılmıştır. İlk iki geçme bandı frekans aralığı $f_{p1} \in (0, 361 \text{ Hz})$ ve $f_{p2} \in (810, 2096 \text{ Hz})$ 1'inci ve 2'nci durma bandı frekans aralığı $f_{s1} \in (362, 809 \text{ Hz})$ ve $f_{s2} \in (2097, 3242 \text{ Hz})$ dir. Her iki geçme bandı içinde seçilen frekans değerleri için bariyeri geçen dalganın genliğine bakıldığında bir miktar azalma görülmektedir. Yer değıştirme genliği bariyeri geçince 0.75 değerine düşmüştür (Şekil 11a, Şekil 11c). Her iki durma bandında seçilen frekans değerleri için genlikler bariyeri içinde üstel olarak hızla azalmakta, 1'inci durma bandı frekansları için yerdeğiştirme genliği bariyeri geçince 0.1, 2'nci durma bandı frekansları için genlik 0.05 değerine düşmektedir (Şekil 11b, Şekil 11d).

4'üncü ve son hal olarak $\alpha = 0.8$ "çok yüksek" kütle oranı için bariyeri geçen dalganın yerdeğiştirme genliği, geçme ve durma bantları için araştırılmıştır. İlk iki geçme bandı frekans aralığı sırası ile $f_{p1} \in (0, 268 \text{ Hz})$ ve $f_{p2} \in (810, 1981 \text{ Hz})$ dir. 1'inci ve 2'nci durma bandı

1'inci hal: $N_c = 5$, $\alpha = m / m_c = 0.333$

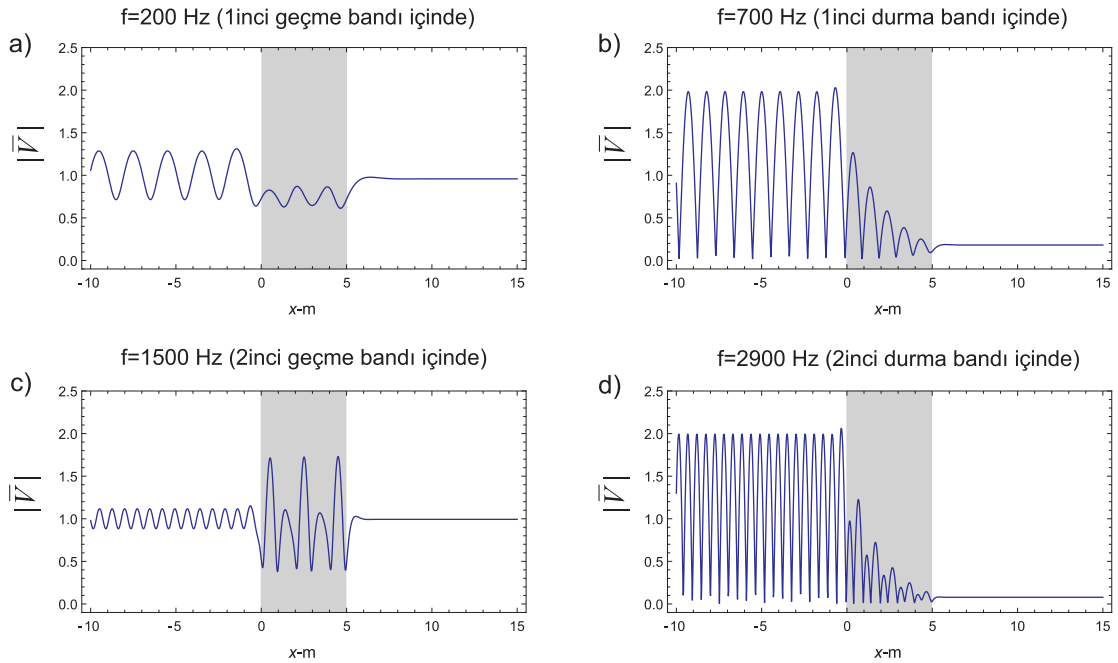


Şekil 9. 1'inci hal için sonlu bölgede bariyer etkisiyle yerdeğiştirme genliklerinin değişimi

frekans aralığı ise sırası ile $f_{s1} \in (269, 809 \text{ Hz})$ ve $f_{s2} \in (1982, 3242 \text{ Hz})$ dir. Her iki geçme bandı içinde seçilen frekans değerleri için bariyeri geçen dalganın

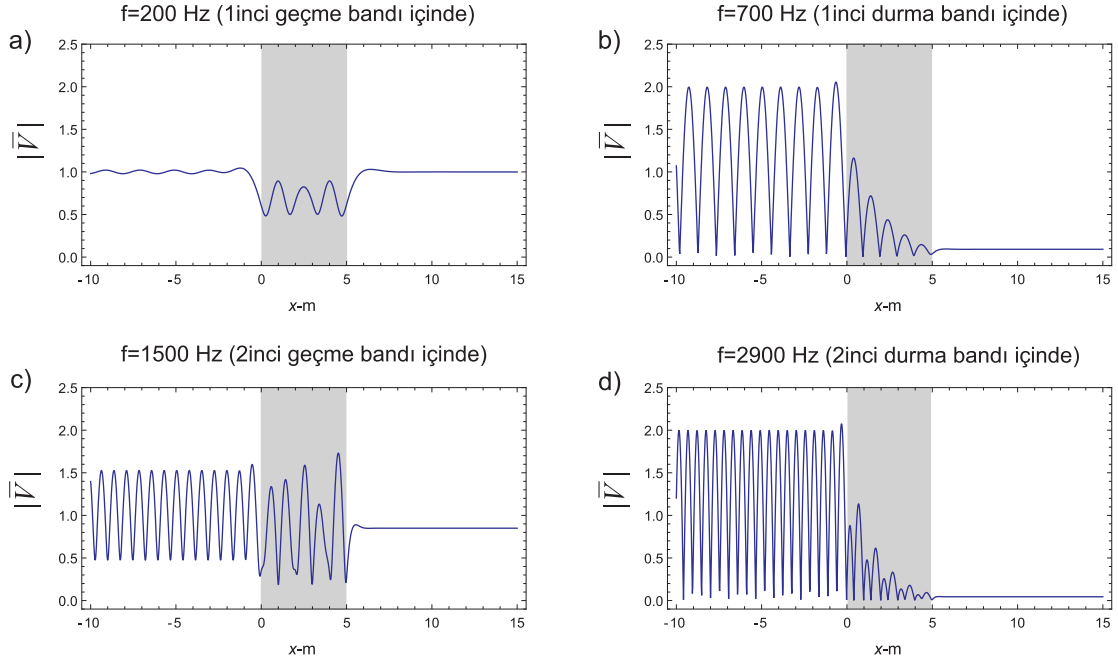
genliğine bakıldığında 0.75 değerine indiği görülmektedir (Şekil 12a, Şekil 12c). Her iki durma bandında seçilen frekans değerleri için genlikler bariyeri içinde üstel olarak hızla azalmakta, neredeyse sıfır değerine yaklaşmaktadır (Şekil 12b, Şekil 12d).

2'inci hal: $N_c = 5$, $\alpha = m / m_c = 0.5$



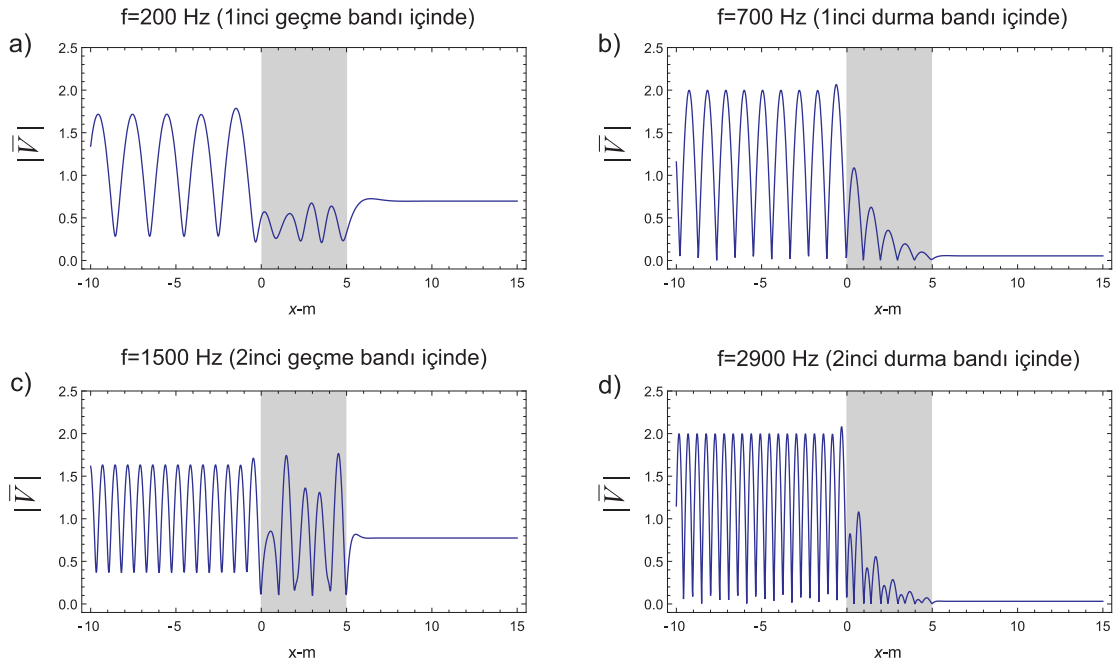
Şekil 10. 2'inci hal için sonlu bölgede bariyer etkisiyle yerdeğiştirme genliklerinin değişimi

3'üncü hal: $N_c = 5$, $\alpha = m / m_c = 0.667$



Şekil 11. 3'üncü hal için sonlu bölgede bariyer etkisiyle yerdeğiştirme genliklerinin değişimi

4'üncü hal: $N_c = 5$, $\alpha = m / m_c = 0.8$



Şekil 12. 4'üncü hal için sonlu bölgede bariyer etkisiyle yerdeğiştirme genliklerinin değişimi

4 Sonuçlar

Bu çalışmada sonsuz uzunluklu periyodik yığılı kütleli, bir EB girişinde meydana gelen dispersiyon olayı ve sonlu bir bölgede periyodik aralıklarla bulunan yığılı kütlelerin

(dalga bariyeri) yerdeğiştirme cevabı incelenmiştir. Ele alınan modelde yığılı kütlelerin ve girişin birbirine mükemmel şekilde yapışarak periyodik bir yapı oluşturduğu varsayılmıştır. Sonsuz periyodik giriş için dispersiyon

ilişkisi çıkarılmış daha sonra sonlu bölgedeki periyodikliğin dalga iletimine etkisi ortaya konmuştur.

Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir. Periyodik aralıklı yığılı kütleler, EB kirisinin frekans spektrumunda bantlı bir yapıya neden olmuştur. Kütlelerin etkisi ile dalga yayılımı sadece geçme bantlarında meydana gelmiş, faz ve hızları düşmüştür. Ayrıca durma bantlarında dalga iletimi engellenmiş, periyodik kütleler mekanik filtre gibi davranmıştır. Yığılı kütle miktarına bağlı olarak geçme bantlarının daralmış, kütle oranındaki artış faz ve grup hızlarında azalmaya sebep olmuştur.

Sonlu bölgede periyodik yığılı kütle olması halindeki iletkenlik cevabı, bariyere gelen dalga genliği ile bariyeri geçen dalga genliğinin oranı üzerinden elde edilmiştir. Yığılı kütlelerin (örneğin, 5 birim hücre) sonlu sayıda olması halinde bile periyodikliğin etkisi ile durma bantı frekanslarında iletkenlik değerlerinin düştüğü gösterilmiştir. Sonuçta bu bölge bir bariyer gibi davranmış ve kütle oranına bağlı olarak bariyerin arkasında yerdeğiştirme genliği durma bantı frekansı için hızla sıfıra gitmiştir.

Ele alınan bu basit modelde verilen sonuçlar sınırlı frekans aralığı ve hücre sayısını içermekte olup yapılan varsayımlar altında geçerlidir. Çalışmanın sınırlamalarına rağmen yığılı kütleli sonsuz ve sonlu uzunluktaki periyodikliğin, elastik davranışa etkileri hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Sonlu bir periyodik tasarımla sonsuz periyodikliğe yakın cevaplar elde edilmiştir. Böylece, tasarımda periyodikliğe yer vererek sönümleyicilere gerek kalmadan da sismik etkilerin azaltılabilmesi veya engellenmesi mümkün görülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %3

Kaynaklar

- [1] G. Floquet, Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques, Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure, 12, 47–88, 1883. <https://doi.org/10.24033/asens.220>.
- [2] L. Rayleigh, On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 24, 145–159, 1887. <https://doi.org/10.1080/14786448708628074>.
- [3] F. Bloch, Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern, Zeitschrift für Physik, 52, 555–600, 1929. <https://doi.org/10.1007/BF01339455>.
- [4] L. Brillouin, Wave propagation in periodic structures: electric filters and crystal lattices, Dover, New York, 1953.
- [5] D. M. Mead, Wave propagation in continuous periodic structures: research contributions from Southampton, 1964–1995, Journal of Sound and Vibration, 190, 495–524, 1996. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0076>.
- [6] P. Zhao, K. Zhang, and Z. Deng, Size effects on the band gap of flexural wave propagation in one-dimensional periodic micro-beams, Composite Structures, 271, 114162, 1–8, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114162>.
- [7] R. Chen and T. Wu, Vibration reduction in a periodic truss beam carrying locally resonant oscillators, Journal of Vibration and Control, 22, 270–285, 2016. <https://doi.org/10.1177/1077546314528020>.
- [8] S. Sgubini, F. Graziani, and A. Agnani, Elastic waves propagation in bounded periodic structures, Acta Astronautica, 15, 913–917, 1987. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(87\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0094-5765(87)90049-X).
- [9] A. Özmutlu, M. Ebrahimian and M. I. Todorovska, Wave propagation in buildings as periodic structures: Timoshenko beam with rigid floor slabs model, Journal of Engineering Mechanics, 144, 04018010, 1–14, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001436](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001436).
- [10] M. Iqbal, M. M. Jaya, O. S. Bursi, A. Kumar, R. Ceravolo, Flexural band gaps and response attenuation of periodic piping systems enhanced with localized and distributed resonators, Scientific Reports, 10, 10:85, 1–11, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56724-0>.
- [11] L. Liu and M. I. Hussein, Wave motion in periodic flexural beams and characterization of the transition between bragg scattering and local resonance, Journal of Applied Mechanics, 79, 011003, 1–17, 2012. <https://doi.org/10.1115/1.4004592>.
- [12] M. I. Hussein, M. J. Leamy and M. Ruzzene, Dynamics of phononic materials and structures: historical origins, recent progress, and future outlook, Applied Mechanics Reviews, 66, 040802, 1–38, 2014. <https://doi.org/10.1115/1.4026911>.
- [13] C. Y. Koh, D. A. Jorba and E. L. Thomas, Phononic metamaterials for vibration isolation and focusing of elastic waves, U.S. Patent 8,833,510, 16 Sep. 2014.
- [14] M. Ruzzene and A. Baz, Attenuation and localization of wave propagation in periodic rods using shape memory inserts, Smart Materials and Structures, 9, 805–816, 2000. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/6/310>.
- [15] L. Banakh, The vibroisolation properties of the lattices containing the lumped inclusions, Vibroengineering Procedia, 29, 237–242, 2019. <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21075>.
- [16] Y. Xiao, J. Wen, D. Yu, X. Wen, Flexural wave propagation in beams with periodically attached vibration absorbers: Band-gap behavior and band formation mechanisms, Journal of Sound and Vibration, 332, 867–893, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.09.035>.
- [17] Y. Xiao, J. Wen, G. Wang, X. Wen, Theoretical and experimental study of locally resonant and bragg band gaps in flexural beams carrying periodic arrays of beam-like resonators, Journal of Vibration and Acoustics, 135, 041006, 1–17, 2013. <https://doi.org/10.1115/1.4024214>.

- [18] Y. K. Lin and T. J. McDaniel, Dynamics of beam-type periodic structures, *Journal of Engineering for Industry*, 91, 1133–1141, 1969. <https://doi.org/10.1115/1.3591761>.
- [19] N. Fukuwa and S. Matsushima, Wave dispersion and optimal mass modelling for one-dimensional periodic structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23, 1165–1180, 1994. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290231102>.
- [20] D. Yu, Y. Liu, G. Wang, H. Zhao, J. Qiu, Flexural vibration band gaps in Timoshenko beams with locally resonant structures, *Journal of Applied Physics*, 100, 124901, 1–5, 2006. <https://doi.org/10.1063/1.2400803>.
- [21] D. Yu, J. Wen, H. Shen, Y. Xiao, X. Wen, Propagation of flexural wave in periodic beam on elastic foundations, *Physics Letters A*, 376, 626–630, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.11.056>.
- [22] T. Chen, Investigations on flexural wave propagation of a periodic beam using multi-reflection method, *Archive of Applied Mechanics*, 83, 315–329, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00419-012-0657-x>.
- [23] Z. Guo, M. Sheng and T. Wang, Flexural wave attenuation in a periodic laminated beam, *Journal of Engineering Research*, 5, 258–265, 2016.
- [24] R. Prasad and A. Sarkar, Broadband vibration isolation for rods and beams using periodic structure theory, *Journal of Applied Mechanics*, 86, 021004, 1–10, 2019. <https://doi.org/10.1115/1.4042011>.
- [25] Z. Zhang, T. Li, and Y. Tang, Traveling wave analytical solutions of vibration band gaps of composite periodic beams, *Journal of Vibration and Control*, 25, 460–472, 2019. <https://doi.org/10.1177/1077546318783557>.
- [26] F. Gilbert and G. E. Backus, Propagator matrices in elastic wave and vibration problems, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 10, 271, 1966. <https://doi.org/10.1007/BF02587859>.
- [27] S. B. Coskun, M. T. Atay, and B. Ozturk, Transverse vibration analysis of Euler-Bernoulli beams using analytical approximate techniques, in: E. Farzad (Eds.) *Advances in Vibration Analysis Research*, InTech, 1–25, 2011. <https://doi.org/10.5772/15891>.
- [28] B. Ozturk and S. B. Coskun, The Homotopy perturbation method for free vibration analysis of beam on elastic foundation, *Structural Engineering and Mechanics*, 37, 415–425, 2011. <https://doi.org/10.12989/sem.2011.37.4.415>.
- [29] B. Ozturk and S. B. Coskun, Analytical Solution for free vibration analysis of beam on elastic foundation with different support conditions, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1–7, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/470927>.
- [30] K. Torabi, D. Sharifi, and M. Ghassabi, A semi-analytical solution for free vibration analysis of a step beam with multiple concentrated masses using variational iteration method, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 22, 333–343, 2021. <https://doi.org/10.1080/15502287.2021.1882616>.
- [31] Ł. Domagalski, M. Świątek, and J. Jędrzyński, An analytical-numerical approach to vibration analysis of periodic Timoshenko beams, *Composite Structures*, 211, 490–501, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.007>.
- [32] S. Y. Lee, H. Y. Ke, and M. J. Kao, Flexural waves in a periodic beam, *Journal of Applied Mechanics*, 57, 779–783, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2897092>.
- [33] S. Y. Lee and H. Y. Ke, Flexural wave propagation in an elastic beam with periodic structure, *Journal of Applied Mechanics*, 59, S189-S196, 1992. <https://doi.org/10.1115/1.2899487>.
- [34] T. Belytschko and W. L. Mindle, Flexural wave propagation behavior of lumped mass approximations, *Computers & Structures*, 12, 805–812, 1980. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(80\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0045-7949(80)90017-6).
- [35] M. J. Leamy, Exact wave-based Bloch analysis procedure for investigating wave propagation in two-dimensional periodic lattices, *Journal of Sound and Vibration*, 331, 1580–1596, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.11.023>.
- [36] H. Lv and Y. Zhang, A wave-based vibration analysis of a finite Timoshenko locally resonant beam suspended with periodic uncoupled force-moment type resonators, *Crystals*, 10, 1132, 1–16, 2020. <https://doi.org/10.3390/cryst10121132>.
- [37] S. H. Kim and M. P. Das, Seismic waveguide of metamaterials, *Modern Physics Letters B*, 26, 1250105, 1–4, 2012. <https://doi.org/10.1142/S0217984912501059>.
- [38] A. Colombi, D. Colquitt, P. Roux, S. Guenneau, A seismic metamaterial: The resonant metawedge, *Scientific Reports*, 6, 27717, 1–6, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep27717>.
- [39] A. Palermo, S. Krödel, A. Marzani et al., Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves, *Scientific Reports*, 6, 39356, 1–10, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep39356>.
- [40] V. K. Dertimanis, I. A. Antoniadis, and E. N. Chatzi, Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers, *Journal of Engineering Mechanics*, 142, 04016060, 1–10, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.19437889.0001120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.19437889.0001120).
- [41] P. Persson, K. Persson, and G. Sandberg, Numerical study of reduction in ground vibrations by using barriers, *Engineering Structures*, 115, 18–27, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.025>.
- [42] P.-R. Wagner, V. K. Dertimanis, E. N. Chatzi, J. L. Beck, Robust-to-uncertainties optimal design of seismic metamaterials, *Journal of Engineering Mechanics*, 144, 04017181, 1–17, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.19437889.0001404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.19437889.0001404).
- [43] F. Sun and L. Xiao, Bandgap Characteristics and seismic applications of inerter-in-lattice metamaterials, *Journal of Engineering Mechanics*, 145, 04019067, 1–13, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.19437889.0001642](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.19437889.0001642).

- [44] K. F. Graff, Wave motion in elastic solids, Dover; London: Constable, New York, 1991.
- [45] Y. K. Lin and B. K. Donaldson, A brief survey of transfer matrix techniques with special reference to the analysis of aircraft panels, *Journal of Sound and Vibration*, 10, 103–143, 1969. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(69\)90132-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(69)90132-1).
- [46] B. R. Mace, Wave reflection and transmission in beams, *Journal of Sound and Vibration*, 97, 237–246, 1984. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(84\)90320-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(84)90320-1).





Manisa-Gürle köyü yöresinde bulunan kayaların sınıflandırılarak beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması

Classification of rocks in Manisa-Gürle village region and investigation of their usability as concrete aggregate

Adem Solak^{1,*} 

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 15030, Burdur, Türkiye

Öz

Günümüzde yapı inşasında en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olan beton; çimento, su, agreg ve katkı maddelerinin uygun oran optimizasyonu sağlanarak elde edilmektedir. Betonun fiziksel, kimyasal, mineralojik ve özellikle mekanik özelliklerinin istenilen düzeyde olması inşa edilen yapıların dayanımlı ve dayanıklı olması açısından önemlidir. Bu doğrultuda, beton karışımının önemli bir parçası olan agregaların seçimi beton özelliklerine etki eden önemli faktörlerden biridir. Agreg seçiminde sedimanter kökenli kayalardan olan kalker ve dolomitik yapıdaki kayaların kullanılması agreganın çimento ile aderansının güçlü olmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada Manisa-Gürle köyü yöresinde bulunan kayaların tanımlanıp sınıflandırılarak beton içerisinde agrega olarak kullanımının uygunluğunun araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, agrega numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri tespit edildikten sonra yıkanmış ve yıkanmamış agrega kullanarak 18 adet beton numunesi hazırlanmış ve 7, 14 ve 28 gün sonunda beton basınç dayanımları test edilmiştir. Çalışma sonucunda incelenen kayacın dolomitik kireçtaşı sınıfında yer aldığı, dolomitik kireçtaşı agregaların beton yapımında kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yıkanmış agrega kullanımının yıkanmamış agrega kullanımına göre beton basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Agreg, Dolomitik kireçtaşı, Beton agregası, Agreg ve beton deneyleri

1 Giriş

Ülkemizde artmakta olan nüfus oranına bağlı olarak yapılaşma oranlarında da artış görülmektedir [1]. Artan yapılaşma oranıyla birlikte yapılarda sıklıkla kullanılan yapı malzemelerinden biri olan beton gereksiniminde de artış meydana gelmektedir [2]. Beton hacminin yaklaşık %65-%75'ini, betonun temel bileşenlerinden olan agregalar oluşturmaktadır [3,4]. Bu doğrultuda, beton malzemenin ana bileşenlerinden olan agregaların seçimi betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Sedimanter kökenli kayalar olan kireçtaşlarının agrega olarak kullanımı çimento ile aderansın daha iyi sağlandığı bilinmektedir. Ülkemizde de yeterli miktarda bulunan

Abstract

Concrete, one of the most widely used building materials in building construction today; cement, water, aggregate and additives are obtained by ensuring the appropriate ratio optimization. The physical, chemical, mineralogical and especially mechanical properties of concrete are at the desired level in terms of the strength and durability of the constructed structures. In this direction, the choice of aggregates, which are an important part of the concrete mix, is one of the important factors affecting the concrete properties. The use of limestone and dolomitic rocks, which are among the rocks of sedimentary origin, in the selection of aggregates ensures that the adherence of the aggregate with cement is strong. In this study, it was aimed to identify and classify the rocks in the Manisa-Gürle village region and to investigate the suitability of their use as aggregates in concrete. In this context, after determining the physical, chemical, and mineralogical properties of aggregate samples, 18 concrete samples were prepared using washed and unwashed aggregates and concrete compressive strength was tested at the end of 7, 14 and 28 days. As a result of the study, it was determined that the rock examined was included in the dolomitic limestone class and that it was appropriate to use dolomitic limestone aggregates in concrete construction. In addition, it has been determined that the use of washed aggregates increases the compressive strength of concrete compared to the use of unwashed aggregates.

Keywords: Aggregate, Dolomitic limestone, Concrete aggregate, Aggregate and concrete experiments

kireçtaşları kimyasal veya organik etkiler ile birlikte deniz ve göl alanlarında bulunan maddelerin çökmesi ile meydana gelmektedir [5]. Birçok sektörde kullanım alanı bulan kireçtaşları günümüzde beton agregası olarak da tercih edilmektedir.

Başpınar Tuncay, Yağmurlu ve Ceylan [6] yaptıkları çalışmada, Karaöz mevkiinde bulunan dolomitik kireçtaşlarının beton agregası olarak kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda Karaöz bölgesinde yer alan dolomitik kireçtaşı agregaların beton karışımında kullanılmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Yağız [7] yaptığı çalışmada; Denizli ilinde yer alan dolomitik kireçtaşlarının yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Yaptığı araştırma sonucunda dolomitik kireçtaşının binaların dış cephesinde kullanılabilirliğini tespit etmiştir.

Altınsoy, Karahan, Çankaya ve Karabayır [3] çalışmalarında; Çanakkale Elmacıık Yöresinde bulunan kalker kayaçlarının beton içerisinde agrega olarak kullanımını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, kalker kayaçlardan elde edilen agregaların beton içerisinde kullanımında herhangi bir sakınca olmadığını belirtmişlerdir.

Çalışma kapsamında, Manisa ili gürlü köyü sınırları içerisinde bulunan taş ocağından temin edilen kayaç numunelerin karakterizasyon özellikleri incelenerek numunenin sınıflandırılması yapıldıktan sonra bu kayaçtan elde edilen agregaların beton içerisinde kullanımının uygunluğu araştırılmıştır.

2 Materyal ve yöntem

Bu çalışmada, Manisa ilinin Gürlü Köyü mevkiinden elde edilen agregalar kullanılmıştır (Şekil 1). Numune örnekleri Amiroğlu Madencilik Kömür İnşaat Hafriyat Nakliye San.Tic.A.Ş. firmasının saha alanının farklı bölgelerinden temin edilmiştir (Şekil 2).

Alınan numuneler homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra çeneli kırıcı aracılığıyla çalışmada uygulanacak deneyler için standartlara uygun agrega boyutlarına getirilmiştir.



Şekil 1. Manisa Gürlü köyü konumu



Şekil 2. Firma saha alanı genel görünüm

Çalışmada ilk olarak taş ocağında inceleme yapıldıktan sonra kayaç numuneleri alınmıştır. Numunelerin karakterizasyon özellikleri belirlendikten sonra numuneler,

0-4 mm, 4-11 mm ve 11-22 mm boyutlarında sınıflandırılarak deneysel çalışmalar için standartlara uygun olacak şekilde hazırlanmıştır.

Numuneler üzerine uygulanmış olan test/analiz listesi ve ilgili standartlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Manisa-Gürlü yöresinden temin edilen agregalara uygulanan test/analiz listesi ve standartları

Test/Analiz	Uygulanan Standart	Deneylerde Kullanılan Agrega Boyutu (mm)
Numune alma	TS 707	-
Kimyasal Analiz	TS EN 15309	0.100
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	TS EN 699	-
Tane Şekli Tayini-Yassılık İndeksi	TS EN 933-3	4-11 ve 11-22
Metilen Mavisini Deneyi	TS EN 933-9 + A1	0-4
Parçalanmaya Karşı Direncin Tayini (Los Angeles Metodu)	TS EN 1097-2	4-11 ve 11-22
Kuruma Büzülmesi	TS EN 1367-4	0-4, 4-11 ve 11-22
Tane yoğunluğu, su emme, gevşek yığın yoğunluğu,	TS EN 1097-6	0-4, 4-11 ve 11-22

Çalışmanın ikinci aşamasında yıkanmış ve yıkanmamış dolomitik kireçtaşı agregalar kullanılarak beton numune üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen beton numunelerinin 7,14 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen beton numunelerinin beton sınıfı; TS EN 206-1'de [8] klorürün sebep olduğu korozyonu ve zararlı kimyasal ortam etkisini önlemek için en düşük C30 beton sınıfı kullanılması önerildiğinden ayrıca Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'de [9] belirtilen betonarme binalarda kullanılacak olan en düşük beton sınıfının C25, önüretimli betonarme binalarda kullanılacak olan en düşük beton sınıfının ise C30 olması gerektiği öngörüldüğü üzere, yeterli işlenebilirliğe sahip ve mukavemet değerinin de yüksek olması bakımından C30 olarak hedeflenmiştir.

2.1 Agrega üzerinde uygulanan deneyler

2.1.1 Agregaların mineralojik ve kimyasal özellikleri

Çalışmada incelenen agrega numunelerinin mineralojik özellikleri X-Işını Kırınım (XRD) yöntemi, kimyasal özellikleri ise X-Işını Floresans (XRF) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

XRD analizi, X-Işını demetindeki ışınların kristale özel çeşitli yönlerde kırınımı olayına dayanan, bir yöntemdir. Bu yöntemle analiz aşamasında numune tahribata uğramadan analiz edilebilmektedir. XRD analiz sonuçları malzemenin fazları, bu fazların oranları, kristal boyutu, malzeme yapısında görülen değişimlerin tespit edilmesini sağlamaktadır [10].

XRF analizi ise, katı sıvı veya toz haldeki malzemelerin niteliksel ve niceliksel olarak değerlendirilmesini sağlayan yöntemdir. Bu yöntem ile malzeme içerisinde bulunan elementler oransal olarak analiz edilerek malzemenin kimyasal özelliği belirlenebilmektedir.

2.1.2 Agregaların tek eksenli basınç dayanımı

Beton içerisinde kullanılacak olan agregaların basınç dayanımlarının yüksek olması beklenmektedir. Düşük basınç dayanımına sahip olan agregaların betonda kullanılması durumunda beton dayanımı istenilen düzeyde olmamaktadır [11]. McNally'ye göre [12], kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarının tespit edilmesi, bu kayaçların kullanım alanlarını ve beton içerisinde agrega olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesinde doğrudan etkili olmaktadır. Beton içerisinde kullanılacak olan agreganın tek eksenli basınç dayanımının 100-200 MPa arasında olması beklenmektedir. 100 MPa'nın altında olduğu durumlarda agreganın betonda kullanımının uygunluğu aşınma direnci ile birlikte değerlendirilmelidir [3,13].

2.1.3 Agregaların yassılık indeksi değerleri

TS EN 933-3 standardına göre [14] agregaların yassılık indeksi katsayısı Denklem 1 kullanılarak belirlenmektedir.

$$Fli = \frac{m_i}{R_i} \times 100 \quad (1)$$

Burada;

Fli : Yassılık İndeksi Değerini,

% mi : Çubuklu elekten geçen malzeme miktarını, (g)

Ri : Toplam malzeme miktarını, (g) ifade etmektedir.

2.1.4 Metilen mavisi deneyi

İnce agregaların beton içerisinde kullanılmadan önce agrega içerisindeki kil miktarı metilen mavisi deney yöntemi ile tespit edilebilmektedir [15].

Metilen mavisi deneyi ince boyutlardaki agregalara uygulanabilmektedir. Metilen mavisi değeri TS 706 EN 12620+A1 standardına göre [16] Denklem 2'de verildiği şekilde formülize edilerek hesaplanmaktadır.

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

Bu formülde,

MB: Metilen Mavisi Değerini (%)

V1: Deneyde kullanılan metilen mavisi boyasının toplam hacmini (ml)

M1: İncelenen numune miktarını (g) ifade etmektedir.

2.1.5 Parçalanmaya karşı direncin tayini (Los Angeles metodu)

Agregaların darbeye ve aşınmaya karşı direncinin tespit edilebilmesi için Los Angeles aşınma deneyi yapılmaktadır. TS EN 1097-2 standardına göre [17] yapılan deney sonucunda Denklem 3'teki formül kullanılarak Los Angeles Katsayısı olarak nitelendirilen bir değer bulunmaktadır.

$$LA(\%) = \left(\frac{M_0 - M_1}{M_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

Burada;

LA: Los Angeles aşınma katsayısı (%),

M0: Deneye tabii tutulan numune miktarı (g),

M1: Deney sonrası +1,6 mm elek üzerinde kalan numune miktarı (g) anlamına gelmektedir.

2.1.6 Agregalarda kuruma büzülmesi

Çalışma kapsamında incelenen agrega numunelerine TS EN 1367-4 standardına [18] uygun olarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

2.1.7 Agregalarda tane yoğunluğu, su emme, gevşek yığın yoğunluğu, özgül ağırlık ve boşluk hacmi

Çalışmada kullanılan agregaların tane yoğunluğu, su emme oranı, gevşek yığın yoğunluğu, özgül ağırlığı ve boşluk hacimlerinin belirlenebilmesi için agregalar üzerine deneysel çalışmalar uygulanmıştır.

2.2 Beton karışımında kullanılan çimento özellikleri

Çalışma kapsamında üretilen beton numunelerinde CEM IV 32,5 N tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri; Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CEM IV 32,5 N kimyasal özellikleri

SiO ₂	41.15
Al ₂ O ₃	10.27
Fe ₂ O ₃	3.34
CaO	33.09
MgO	2.15
SO ₃	2.98
Na ₂ O	1.14
K ₂ O	1.38
Kızdırma Kaybı	3.70

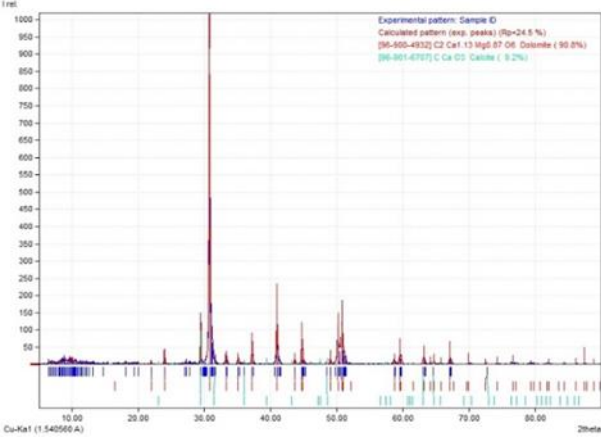
3 Bulgular

3.1 Agregaların mineralojik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi

Yapılan XRD analiz sonuçları Şekil 3'te XRF analizi sonuçları ise Tablo 3'te gösterilmiştir.

Numunenin XRD sonucunda, kayaçta bulunan dolomit oranının 2.89 değerinde pik noktaya ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte kayaç yapısında %9.2 oranında kalsit mineralinin de bulunması incelenen numunenin dolomitik kireçtaşı olduğunu göstermektedir.

TS EN 15309 standardı [19] kapsamında yapılan XRF analizi sonucunda; incelenen numunede CaO miktarı %36.63, MgO miktarı %13.37, SiO₂ miktarı 0.16 ve kızdırma kaybı değeri %48.1908 olarak tespit edilmiştir. Folk'a [20] göre numunenin dolomitik kireçtaşı olarak isimlendirilmesi mümkündür (Tablo 4).



Şekil 3. XRD analiz sonucu

Tablo 3. XRF analiz sonucu

Ana Oksit Element	Miktar (%)
SiO ₂	0.161
TiO ₂	0.001
Al ₂ O ₃	0.016
Fe ₂ O ₃	0.919
MgO	13.370
CaO	36.630
Na ₂ O	0.228
K ₂ O	< 0.0012
MnO	0.014
Cr ₂ O ₃	0.223
P ₂ O ₅	0.085
SO ₃	0.161
Kızdırma Kaybı	48.1908

Tablo 4. Karbonatlı kayaçların sınıflandırılması (Folk, 1959)

Kalsit Miktarı (%)	Dolomit Miktarı (%)	Tanımı
%95'den fazla	% 5'den az	Magnezyumlu Kireçtaşı
% 90-95	% 5-10	Kireçtaşı
% 50-90	% 10-50	Dolomitik Kireçtaşı
% 10-50	% 50-90	Kalkerli Dolomit
% 10'dan az	%90'dan fazla	Dolomit

3.2 Agregaların tek eksenli basınç dayanımının belirlenmesi

Bu çalışmada, 3 adet dolomitik kireçtaşı numunesine TS EN 699 standardı [21] kapsamında tek eksenli basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda 3 adet numunenin ortalama basınç dayanımı değeri 84 MPa olarak bulunmuştur.

3.3 Agregalarda yassılık indeksi değerlerinin belirlenmesi

Agregaların şekilsel özellikleri betonun işlenebilirliği ve su ihtiyacı üzerine doğrudan etkilidir [3]. Agregaların şekilsel özelliklerinin beton içerisinde kullanıma uygunluğunun tespit edilebilmesi için agregaların yassılık indeksi değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. TS 706 EN 12620+A1 standardına göre [16]; yassılık indeksi değeri %50'den fazla olan agregalar betonun işlenebilirliğini

azaltarak kırılabilirliğini arttırdığı için bu tür agregalar kusurlu olarak kabul edilmekte ve beton içerisinde kullanımı tercih edilmemektedir.

Agregalar bulunan yassılık indeksi katsayısına göre kategorize edilmektedir. Agregaların TS 706 EN 12620+A1 standardına göre [16] yassılık indeksi değerine yönelik sınıflandırılması Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Agregaların yassılık indeksine göre sınıflandırılması

Yassılık Endeksi	Kategori, FI
≤ 15	FI ₁₅
≤ 20	FI ₂₀
≤ 35	FI ₃₅
≤ 50	FI ₅₀
> 50	FI _{Beyan}
Serbest	FI _{NR}

Bu çalışmada dolomitik kireçtaşından elde edilen agregaların beton içerisinde kullanılmalarının uygunluğunu belirleyebilmek amacıyla 4-11 mm ve 11-22 mm boyutlarına sahip olan agrega numunelerine yassılık indeksi deneyi uygulanmıştır. Uygulanan deney sonucunda ortalama yassılık indeksi katsayısı değeri (FI) 4-11 mm boyutlarındaki numuneler için 7, 11-22 mm boyutlarına sahip numuneler için ise 8 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin FI 15 kategorisinde olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre kalkerli dolomit kayacının beton içerisinde agrega olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

3.4 Metilen mavisi deneyi

İnce agregalardaki kil miktarının fazla olması bu agregalar kullanılarak elde edilmiş olan betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir [4].

Yüzde olarak belirlenen metilen mavisi değerinin ince agregalar için minimum düzeyde olması beklenmektedir.

Bu çalışmada incelenen 0-4 mm boyut aralıklarındaki ince agregaların içerisindeki kil miktarını saptayabilmek amacıyla TS EN 933-9 + A1 standardına [22] uygun olacak şekilde metilen mavisi deneyi uygulanmış ve agregaların metilen mavisi değerinin %0,50 olarak bulunmuştur. Bulunan bu sayısal değerinin TS 706 EN 12620 + A1 standardında [16] belirtilmiş olan %3 değerinden az olduğu ve dolomitik kireçtaşından elde edilen agregaların içerisinde bulunan kil miktarının betonun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek bir değer aralığında olmadığı tespit edilmiştir.

3.5 Parçalanmaya karşı direncin tayini (los angeles metodu)

Özellikle hareketli yüklerin yoğun olduğu alanlarda dinamik etkilere bağlı olarak beton yüzeyinde aşınmalar meydana gelmektedir. Bu aşınmanın önlenmesinde beton içerisinde kullanılan agregaların aşınmaya karşı dirençlerinin yüksek olması önemlidir.

Agregalar, bulunan Los Angeles Katsayısı değerine göre kategorize edilmektedir. Agregaların TS 706 EN 12620+A1 standardına göre [16]. Los Angeles Katsayısı değerine yönelik sınıflandırılması Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Agregaların Los Angeles katsayısına göre sınıflandırılması

Los Angeles Katsayısı	Kategori, LA
< 15	LA15
< 20	LA20
< 25	LA25
< 30	LA30
< 35	LA35
< 40	LA40
< 50	LA50
>50	Beyan
Serbest	LA _{NR}

Çalışma kapsamında dolomitik kireçtaşı agregalarının parçalanmaya karşı direncinin belirlenebilmesi amacıyla 4-11 mm ve 11-22 mm boyutlarına sahip agrega numunelerine TS EN 1097-2 standardına göre [17]. Los Angeles deneyi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda Los Angeles katsayısı değeri 23 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer ile birlikte dolomitik kireçtaşı agregalarının TS 706 EN 12620 + A1 standardına göre [16]. LA25 kategorisinde olduğu görülmektedir.

3.6 Agregalarda kuruma büzülmesi bulguları

Betonda büzülmenin meydana gelmesi betonda çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Betonda büzülme meydana gelmesinin en önemli nedenlerinden biri de beton içerisinde kullanılan agrega özellikleridir. Bu nedenle beton içerisinde kullanılacak olan agregaların kuruma büzülmesi değerlerinin ilgili standart kapsamında belirlenmesi gerekmektedir.

Çalışma kapsamında incelenen agrega numunelerine TS EN 1367-4 standardına [18] uygun olarak gerçekleştirilen deney sonucunda agregaların kuruma büzülmesi değeri %0.034 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer standardta belirtilen %0.075 değerinin altında olmasından dolayı agregalar kuruma büzülmesi açısından uygundur.

3.7 Agregalarda tane yoğunluğu, su emme, gevşek yığın yoğunluğu, özgül ağırlık ve boşluk hacminin belirlenmesi

Agrega taneleri içerisinde köşeli ve kusurlu tanelerin miktarının fazla olması agreganın birim hacim ağırlığı değerinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır. Üretilen betonun mekanik özelliklerinin istenilen düzeyde olabilmesi için beton içerisinde kullanılan agregaların birim hacim ağırlık değerlerinin 1,3-1,85 kg/dm³ arasında olması gerekmektedir [3].

Ayrıca agregaların su emme miktarları agregaların özelliklerini belirleyici bir etkide bulunmaktadır. Beton içerisinde su emme oranı fazla olan bir agrega türünün kullanılması betonun dayanım ve dayanıklılığında düşüş meydana getirmektedir.

TS EN 1097-6 standardında [23] beton agregalarının su emme oranının %1'den küçük olması durumunda agregaların donma çözülme etkilerine karşı dirençli olduğu belirtilmiştir. Ancak donma çözülme etkisine dayanıklılık gösteren agregaların birçoğunun su emme oranının %1 değerinden fazla olduğu bilinmektedir.

Çalışmada incelenmiş olan dolomitik kireçtaşından elde edilen 0-4 mm, 4-11 mm ve 11-22 mm boyutlarındaki agrega

numunelerine uygulanmış olan deneyler sonucunda, tane yoğunluğu deneylerinin 0-4 mm'lik agregalar için 2.62, 4-11 mm'lik agregalar için 2.66 ve 11-22 mm'lik agregalar için ise 2.67 olduğu tespit edilmiştir.

Su emme değeri; 0-4 mm'lik numunelerde %1.2, 4-11 mm'lik numunelerde %0,5 ve 11-22 mm'lik numunelerde ise, %0,4 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin standartta belirtilen değerlere uygun olduğundan donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklı olacağı söylenebilmektedir.

Agregaların gevşek yığın yoğunluğu değerleri incelendiğinde ise, 0-4 mm'lik agregalarda 1.64, 4-11 mm'lik agregalarda 1.42 ve 11-22 mm'lik agregalarda 1.39 sayısal değerine karşılık geldiği görülmüştür. Bulunan bu deneylerin sonuçları ilgili standartlar doğrultusunda değerlendirildiğinde, dolomitik kireçtaşı agregaların beton agregası olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.

3.8 Beton numunelere uygulanan deneyler

3.8.1 Beton basınç dayanımı

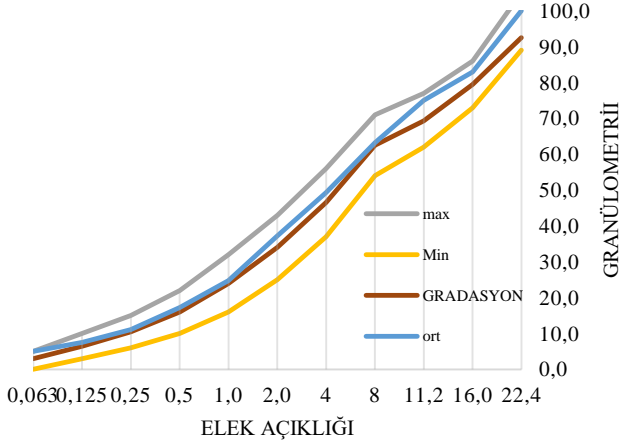
Bu çalışmada dolomitik kireçtaşı agregaların tane büyüklüğü dağılımı ile granülometri değerleri incelendikten sonra uygun optimizasyon koşulları sağlanarak toplam 18 adet beton örneğine 7,14 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Ayrıca çalışmada, beton basınç dayanımı üzerine yıkanmış ve yıkanmamış agrega kullanımının etkilerinin değerlendirilebilmesi için basınç dayanımı testi 9 adetinde yıkanmış, 9 adetinde ise yıkanmamış agrega kullanılarak hazırlanmış olan beton numuneleri üzerinde ayrı ayrı uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen dolomitik kireçtaşı agregaların tane büyüklüğü dağılımının belirlenebilmesi için TS 3530 EN 933-1 standardına [24] uygun olarak elek analizi deneyi gerçekleştirilmiştir. TS 802 standardında [25] C30/37 betonu için agregaların elek analizinde en büyük tane boyutu (D_{max}) 22,4 mm olduğu belirtilmiştir. $D_{max} = 22,4$ mm olan dolomitik kireçtaşı agregaların tane büyüklüğü dağılımları Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Dolomitik kireçtaşı agregaların tane büyüklüğü dağılımları

Elek Açıklığı mm	Mıcırtaş agrega (Manisa)			C30 Beton			
	18 % 11,2- 22,4m m	32 % 4- 11,2mm	50 % 0-4mm	Dizayn		Torelans limitleri	
				Elek otr	100% Karışım % si	Min	Max
22.4	100.0	100.0	100.0	100.0	92.50	89.0	105.0
16.0	25.0	100.0	100.0	83.0	79.50	73.0	86.0
11.2	0.0	100.0	100.0	75.0	69.30	62.0	77.0
8	0.1	41.2	100.0	63.2	62.50	54.0	71.0
4	0.1	10.3	99.1	49.3	46.50	37.0	56.0
2.0	0.1	8.0	69.3	37.2	34.00	25.0	43.0
1.0	0.1	5.0	46.3	24.8	24.00	16.0	32.0
0.5	0.1	3.0	32.5	17.2	16.00	10.0	22.0
0.25	0.0	0.0	22.2	11.1	10.50	6.0	15.0
0.125	0.0	0.0	15.0	7.5	6.50	3.0	10.0
0.063	0.0	0.0	10.0	5.0	3.00	0.0	5.0

Dolomitik kireçtaşı agregaların granülometri eğrisi incelendiğinde; gradasyon eğrisinin TS 802 standardında [25] belirtilmiş olan minimum ve maksimum değerleri arasında yer aldığı görülmektedir (Şekil 4). Bu sonuç, karışıma giren iri ve ince agrega miktarının birbirine yüzdece yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Dolomitik kireçtaşı agregaların granülometri eğrisi

TS EN 206-1 standardına göre [8] C30/37 sınıfı betonun 28 günlük dayanımı için su/çimento oranı 0,45 olarak belirlenmiştir.

TS 802 standardında [25] C30/37 sınıfına sahip betonların 1m³ numune için malzeme karışım miktarları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. 1m³ beton numunesi için malzeme karışım miktarları

Malzeme	Miktar (kg)
Çimento	450
Su	200
0-4 mm Agrega	840
4-11 mm Agrega	450
11-22 mm Agrega	390
Agrega Karışım Oranları (%)	
İnce Agrega	35.6
İri Agrega	64.4

Dolomitik kireçtaşından elde edilen agregalar kullanılarak üretilen 18 adet deney numunesi, kalıptan çıkarıldıktan sonra TS EN 12390-2 standardı [26] kapsamında, deney uygulama anına kadar (20 ± 2) °C sıcaklıktaki su içerisinde kür işlemine tâbi tutulmuştur.

TS EN 12390-3'e göre [27] sertleşmiş beton numunelerinde basınç dayanımı tayini için uygulanacak deney metodu kullanılarak betonun basınç dayanımı belirlenmiştir. Tablo 9 ve Tablo 10'da yıkanmış ve

yıkanmamış agrega kullanılarak üretilen sertleşmiş beton numunelerinin 7.14 ve 28 günlük beton basınç dayanımları verilmiştir.

Tablo 9. Yıkanmış dolomitik kireçtaşı agrega kullanılarak üretilen betonun basınç dayanımları

Numune	Kür Yaşı (gün)	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Numune	7	26.56	
2. Numune	7	23.66	25.44
3. Numune	7	26.09	
1. Numune	14	35.86	
2. Numune	14	32.24	34.43
3. Numune	14	35.18	
1. Numune	28	44.68	
2. Numune	28	41.87	43.57
3. Numune	28	44.15	

Tablo 10. Yıkanmamış dolomitik kireçtaşı agrega kullanılarak üretilen betonun basınç dayanımları

Numune	Kür Yaşı (gün)	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
1. Numune	7	21.65	
2. Numune	7	22.89	22.20
3. Numune	7	22.08	
1. Numune	14	30.56	
2. Numune	14	32.44	31.68
3. Numune	14	32.06	
1. Numune	28	33.47	
2. Numune	28	36.26	35.25
3. Numune	28	36.03	

Yapılan basınç deneyi sonucunda; betonun hesaplanan karışım mukavemeti C30 iken elde edilen sonuçların tümü C30 sınıfının üzerinde olduğu görülmüştür. Fakat yıkanmış agrega kullanımında görülen fark, agrega yıkanarak kullanıldığında betonun hesaplanan basınç dayanımının çok daha üzerine çıktığını göstermektedir. C30 sınıfı için hesaplanan karışımın C40 sınıfı beton elde edilmiştir.

Numunelerin 28 günlük ortalama basınç dayanım değerleri incelendiğinde, yıkanmış agrega kullanılarak hazırlanan betonun ortalama basınç dayanım değerinin 43.57 MPa, yıkanmamış agrega kullanılarak hazırlanan beton karışımının ortalama basınç dayanım değerinin ise 35.25 MPa olduğu görülmektedir.

4 Sonuçlar

Manisa-Gürle köyü yöresinde bulunan kayaçların tanımlanıp sınıflandırılarak beton içerisinde agrega olarak kullanımının uygunluğunun araştırılması amacıyla yapılmış olan bu çalışma sonucunda,

Çalışmada incelenen kayaçtan elde edilen agreganın mineralojik ve kimyasal özellikleri açısından değerlendirildiğinde dolomitik kireçtaşı agregası olduğu belirlenmiştir.

Dolomitik kireçtaşı agregaları ilgili standartlar kapsamında deneye tabi tutulduğunda yapılan deneyler sonucunda malzemenin beton yapımında agrega olarak kullanımının uygun olduğu saptanmıştır.

Dolomitik kireçtaşı agregalar kullanılarak üretilmiş olan beton numunelerin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarının çalışmada hedeflenen önüretimli betonarme binalarda kullanılacak beton kalitesini, klorürün sebep olduğu korozyonu ve zararlı kimyasal ortam etkisini önlemek için önerilen C30 sınıfı beton düzeyini sağladığı görülmüştür. Ayrıca yıkanmış halde kullanılan dolomitik kireçtaşı agregaların yıkanmamış agregalara göre daha fazla basınç dayanımını sağladığı gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar doğrultusunda dolomitik kireçtaşı kayacından elde edilen agregaların beton agregası olarak kullanımında herhangi bir sakıncaya rastlanılmamıştır.

Teşekkür

Agrega analizleri için Türk Standartları Enstitüsü Deney ve Kalibrasyon Merkezi Başkanlığı Yapı Malzemeleri Laboratuvarı Ankara Müdürlüğü'ne, XRD ve XRF analizleri için Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ve Doç. Dr. Barış Semiz'e teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %18

Kaynaklar

- [1] A. Çüçen ve Y. T. Altuncı, Yüksek yapıların yapım tekniklerinin incelenmesi. Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 5 (1), 20-32, 2022. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1039161>
- [2] Y. T. Altuncı ve C. Öcal, TS EN 196-1 standardında belirtilen üretim tekniğinin irdelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(1), 21-28, 2022. <https://doi.org/0.17798/bitlisfen.953562>
- [3] F. Altınsoy, N.Ş. Karahan, R. Çankaya ve A. Karabayır, Çanakkale elmacık yöresi kalker taşlarının beton agregası olarak uygunluğunun araştırılması. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 3,1, 48-58, 2017. <https://doi.org/10.28979/comufbed.304088>
- [4] Z. Arsoy, H. Çiftçi, B. Ersoy, T. Uygunoğlu ve B. Arslan, Afyonkarahisar bölgesi mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilebilirliğinin araştırılması. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(3), 503-516, 2019. <https://doi.org/10.31202/ecjse.554339>
- [5] R. S. Boynton, Chemistry and technology of lime and limestone edition. John Wiley and Sons Inc., 83-97,1980.
- [6] E. Başpınar Tuncay, F. Yağmurlu ve H. Ceylan, Karaöz (Antalya Türkiye) civarındaki dolomitik kireçtaşlarının beton agregası olarak kullanılabilirliği. SDÜ Teknik Bilimler Dergisi, 5(1), 48-57, 2015.
- [7] S. Yağız, Başçeşme formasyonu (Başçeşme-Denizli) dolomitik kireçtaşı üyesinin yapıtaşı olarak kullanılabilirliği. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13(3), 265-270, 2009.
- [8] TS EN 206-1, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, 2014.
- [9] TBDY (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara, 2018.
- [10] F. Semerci, Mardin kireçtaşının yapı malzemesi olarak kullanımına yönelik analizlerinin yapılması: kasımiye medresesi örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi. 2(2), 60-79, 2017. <https://doi.org/10.30785/mbud.342002>
- [11] B. Postacıoğlu, Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton (2), Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul,1987.
- [12] G. H. McNally, Soil and rock construction materials, E and FN Spon, First published, p. 403, London And New York, 1998.
- [13] G. Dursun, İstanbul anadolu yakasındaki kireçtaşlarının agrega kalitesi yönünden değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2004.
- [14] TS EN 933- 3, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 3: Tane Şekli Tayini- Yassılık Endeksi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [15] H. Özbebek ve H. Açık, İnce agregalarda yapılan metilen mavisi ve kum eşdeğerliği deney sonuçlarının beton özelliklerine ve maliyetine etkisi. Hazır Beton, 84-92, 2012.
- [16] TS 706 EN 12620+A1, Beton agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [17] TS EN 1097-2, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler-Parçalanma Direncinin Tayini için Metotlar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [18] TS EN 1367-4, Agregaların Isıl ve Yıpranma Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 4: Kuruma Büzülmesinin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [19] TS EN 15309, X Işını Floresans Yöntemiyle Elementel Bileşimin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [20] R.L. Folk, Practical petrographie classification of limestones: A.A.P.G. Bull., 43, 1-38, 1959.
- [21] TS EN 699. Tabii Yapı Taşları- Muayene ve Deney Metotları Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [22] TS EN 933 – 9 + A1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 9: İnce Malzeme Tayini- Metilen Mavisi Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.

- [23] TS EN 1097-6. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [24] TS 3530 EN 933-1/A1, 2007. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elme Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [25] TS 802, Beton Karışımı Hesap Esasları. Türk Standardı Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [26] TS EN 12390-2, Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi Türk Standartları Enstitüsü Ankara, 2002.
- [27] TS EN 12390-3, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini Türk Standartları Enstitüsü Ankara, 2001.





Donma-çözülme etkisi altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin Duncan-Chang modeli ile deneysel karşılaştırması

Experimental comparison of stress-strain relationships of clay soils under freeze-thaw effect with Duncan-Chang model

Veysel Özlü ¹, Müge Elif Orakoğlu Fırat ^{2*}

^{1,2} Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ Türkiye

Öz

Bu çalışmada, killi bir zemine ait gerilme-deformasyon ilişkileri Duncan-Chang modeli ile tahmin edilmiş olup, model parametreleri ve donma-çözülme çevrimleri arasındaki matematiksel ilişkiler açıklanmıştır. Deneysel ve matematiksel model sonuçları arasındaki korelasyonlar incelenerek, modelin donma-çözülme altındaki killi zeminin gerilme-deformasyon ilişkilerini ne ölçüde tahmin edebildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, farklı eğri uydurma fonksiyonları kullanılarak donma-çözülme döngü sayıları ve Duncan-Chang model parametreleri arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Grey korelasyon analizi, donma-çözülme etkisinin model parametrelerinin üzerindeki değişiminin göz ardı edilemeyeceğini göstermiştir. Duncan-Chang modelinin tanjant deformasyon modülünde bulunan model parametreleri oluşturularak, gerilme-deformasyon eğrilerinin donma-çözülme döngüleri altındaki değişimi konsolidasyonsuz- drenajsız zeminler için yüksek korelasyonlarla elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Donma-çözülme, Killi zemin, Duncan-Chang model, Regresyon analizi

1 Giriş

Donma-çözülme (D-Ç) süreçlerinde zemin değişime uğrayan çok fazlı bir sistem olduğundan hem fiziksel özellikleri hem de mekanik özellikleri büyük ölçüde değişmektedir. Ortam sıcaklığı düştükçe zemin bünyesindeki mevcut su buza dönüşür, hacim genişlemesi boşlukları artırır ve donma süreci zemin tanelerinin ayrılmasına ve parçacıkların kırılmasına sebep olur [1]. Donma sırasında zemin yapısında meydana gelen değişiklikler tamamen eski haline dönemez [2, 3]. Tekrarlı D-Ç döngülerinin etkisiyle, zemin yeni bir denge durumu kazanır ve su içeriği [4- 6], boşluk yapısı [7-9], hidrolojik özellikleri [5, 10], permeabilitesi [8, 11], mukavemet ve deformasyon [12, 13] gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli ölçüde değişiklikler gözlenir. Bu nedenle, zeminler mühendislik altyapısının bir parçası olarak kullanıldığında, uygun bir çözümün belirlenmesi her zaman gereklidir. D-Ç döngülerinden sonra, altyapı zemininin mekanik özellikleri, mevsimsel olarak donmuş bölgelerde geri dönüşü olmayan bir değişime uğramaktadır. Son yıllarda, konuyla ilgili araştırmalar, gerilme parametrelerinin D-Ç döngülerinden

Abstract

In this study, the stress-strain relationships of clayey soil were estimated by Duncan-Chang model, and the mathematical relationships between model parameters and freeze-thaw cycles were explained. By examining the correlations between the experimental study and the model outputs, it was determined to what extent the model was able to predict the stress-strain relationships of clay soils under freeze-thaw cycles. As a result, the relationship between the numbers of the freeze-thaw cycle and Duncan-Chang model parameters was revealed by using different curve fitting functions. Gray correlation analysis showed that the freeze-thaw effect on the model parameters cannot be ignored. By creating model parameters in the tangent deformation modulus of the Duncan-Chang model, the variation of stress-strain curves under freeze-thaw cycles was obtained with high correlations for unconsolidated-undrained soils.

Keywords: Freezing-Thawing cycles, Clay soil, Duncan-Chang model, Regression analysis

nasıl ve ne şekilde etkilendiğine odaklanmışlardır [14- 16]. Bu nedenle, bünye model parametreleri ile D-Ç döngüleri arasındaki ilişkiyi incelemek bir gerekliliktir.

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, zemin deformasyonu ve dayanım özellikleri ile doğrudan açıklanmaktadır. Mühendislik yapılarında altyapı zeminin bulunduğu mevcut duruma göre analiz için uygun bünye modelinin seçilmesi gereklidir [17]. Zeminler çeşitli çevresel etkilere maruz kaldığında, anizotropik, doğrusal olmayan ve zamana bağlı bir davranış sergilemektedir. Doğal koşullar altında zemin, yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme işlemlerine maruz kalır ve yenilme öncesinde doğrusal olmayan bir davranış gösterir. Ayrıca, zemin plastik deformasyona maruz kaldığında ise, kararsız bir durum sergilemektedir. Bu süreçler sonunda zemin, küçük gerilme oranları ile deneyimlenmektedir. Zeminlerin bu davranışı, lineer elastik-mükemmel plastik teorisi ile açıklanamaz [18].

Zeminler için geliştirilen bünye modelleri arasında, tipik doğrusal olmayan elastik model olan Duncan-Chang modeli, genellikle konsolide olmayan ve drenajsız üç eksenli deneylerde pekleşme gerilme-deformasyon eğrilerini

* Sorumlu yazar / Corresponding author, morakoglu@firat.edu.tr (M. E. Orakoğlu, Fırat)

Geliş / Received: 15.06.2022 Kabul / Accepted: 05.08.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1131247

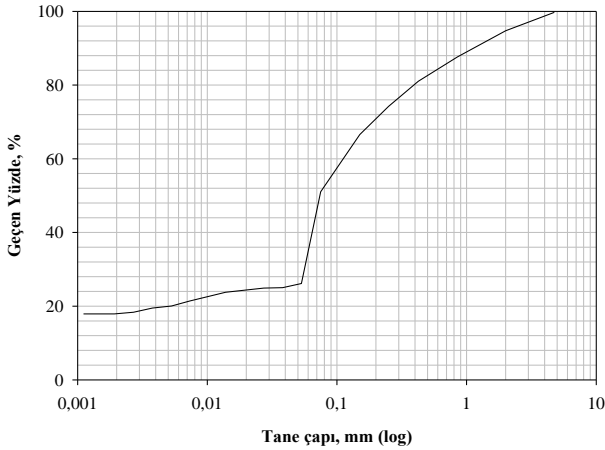
incelemek için ve farklı zeminlerin gerilme hesaplanmasında ve tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır [19-22].

Bu çalışmada, Elazığ ilinde açılmış olan bir temel çukurundan alınan killi bir zemine ait gerilme-deformasyon ilişkileri Duncan-Chang modeli ile tahmin edilmiş olup, model parametreleri ve donma-çözülme çevrimleri arasındaki matematiksel ilişkiler açıklanmıştır. Ayrıca, deneysel ve model çıktıları arasındaki korelasyonlar incelenerek, modelin donma-çözülme altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerini ne ölçüde tahmin edebildiği belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Zemin özelliklerinin belirlenmesi

Çalışmada kullanılan zemin numunesi Elazığ ilindeki Ataşehir Mahallesi'nde açılmış olan bir temel çukurundan temin edilmiştir. Bu zemin numunesinin laboratuvar çalışmalarından; likit limit değeri %58.23 ve plastisite indeksi %45.67, maksimum kuru yoğunluk 1.656 gr/cm³ ve optimum su içeriği %21.5 olarak belirlenmiştir. Zemin numunesinin birleştirilmiş sınıflandırma sistemine (USCS) göre sınıfı yüksek plastisiteli bir kil olan CH olarak belirlenmiştir. Şekil 1'de killi zemine ait dane boyu dağılım eğrisini gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan zemine ait dane boyu dağılım eğrisi

2.2 Donma-Çözülme testleri

Donma sıcaklıkları, zemin numunelerinin alındığı yerin yaklaşık ortalama minimum donma sıcaklığı dikkate alınarak seçilmiştir. Zemin örnekleri belirlenen donma sıcaklığında belli bir sürede kapalı sistem dondurma kabinine yerleştirilmiştir. Dondurma kabininin sıcaklığı ayarlanan sıcaklığa ulaştığında, numuneler ve ortam arasındaki sıcaklık dengesini korumak için belli bir süre tutulmuştur. Daha sonra zemin örnekleri nem kabini içine yerleştirilerek çözülme sürecine maruz bırakılmıştır. Tüm bu işlemler tek bir donma-çözülme döngüsü olarak kabul edilmiştir. Tablo 1'de çalışmada kullanılan zeminlere ait donma-çözülme test süreçleri sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan zemine ait donma-çözülme test süreçleri

Zemin Özellikleri			D-Ç sayısı	Sıcaklık*		
USCS sınıfı	w* (%)	γ_k^* (gr/cm ³)	N*	D (°C)	Ç (°C)	T (°C)
CH	21.5	1.656	0, 2, 5, 10	-18	20	-20

* w: Su içeriği; γ_k : Maksimum kuru birim hacim ağırlık; N: donma-çözülme döngü sayısı; D: Donma; Ç: Çözülme; T: Test sıcaklığıdır.

2.3 Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) üç eksenli basınç testleri

Bu çalışmada, UU üç eksenli basınç testleri ASTM D2850-95'ye göre yapılmıştır [23]. Numunelerin UU dayanımları Fırat Üniversitesi- Teknoloji Fakültesi-İnşaat Mühendisliği Bölümü-Zemin mekaniği laboratuvarında ELE markalı üç eksenli deney aleti ile belirlenmiştir. Donma-çözülme döngülerine tabi tutulan 38.0 mm çapında ve 76.0 mm yüksekliğindeki silindirik zemin numuneleri, dayanım parametrelerini belirlemek için üç eksenli basınç deney hücresi içine yerleştirilmiş ve hücreye su doldurularak, farklı oranlarda (100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa) yanıl hücre basıncı uygulanmıştır. UU yükleme altında kırılma kriterleri %25'lik kesme deformasyonu ile tanımlanmıştır. Gerilme hızı dakikada 0.780 mm'de sabit tutulmuştur.

2.4 Duncan-Chang hiperbolik zemin modeli parametreleri

Zeminlerin asal gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) ve birim deformasyon (ϵ) değerleri arasındaki ilişkiyel eğriler hiperboliktir. Bu nedenle, numune gerilimi ve birim deformasyon arasındaki ilişkiyi analiz etmek için Duncan-Chang modeli uygundur [24]. Kondner [25] farklı sayıda üç eksenli basınç test verisi kullanarak zemin gerilme-şekil değiştirme eğrisini analiz etmiş ve şu bağıntıyı önermiştir:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_i}{a + b\epsilon_i} \quad (1)$$

burada a ve b , üç eksenli basınç testi ile belirlenebilen parametrelerdir.

Birincil tanjant modülü (E_i) şu şekilde tanımlanır:

$$E_i = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon} \Big|_{\epsilon_i=0} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

Sonsuz bir birim deformasyonda, nihai asal gerilme, ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{ult}, değeri denklem (3) ile belirlenir:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \lim_{\epsilon_i \rightarrow \infty} \frac{\epsilon_i}{a + b\epsilon_i} = \frac{1}{b} \quad (3)$$

Hiperbolik ($\sigma_1 - \sigma_3$)- ϵ eğrisi için ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{ult} maksimum değeri, sonsuz deformasyon için bulunurken, zemin numuneleri için gözlemlenen maksimum yenilme, ($\sigma_1 - \sigma_3$)_f, sonlu bir deformasyon, ϵ_f , ile belirlenir ve hiperbolik eğrisini geçmeye zorlar. Gözlenen hata noktası [$\epsilon_f - (\sigma_1 - \sigma_3)_f$] boyunca bir hasar oranı, R_f , ile açıklanır;

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{1/b} \quad (4)$$

Denklem (1) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$a + b\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_i}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (5)$$

burada $\varepsilon_i - \varepsilon_i / (\sigma_1 - \sigma_3)$ grafiğinin eğimi b ve kesme noktası a parametresidir.

Hiperbolik model değişken bir parametre modeli olarak tanımlanmaktadır. Zeminin doğrusal olmayan gerilme-deformasyon ilişkisini modellemek için kullanılır. Model, Hansen [26] tarafından değiştirilmiş olup, gerilme ve şekil değiştirme arasındaki hiperbolik ilişki, Duncan ve Chang [24] tarafından dahil edilmiştir. Başlangıç elastisite modülü aşağıdaki denklem (6) ile tanımlanır:

$$E_i = P_a K \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (6)$$

burada K modül sayısıdır; n modül üssüdür; ve P_a atmosferik basınçtır (101.3 kPa'ya eşittir).

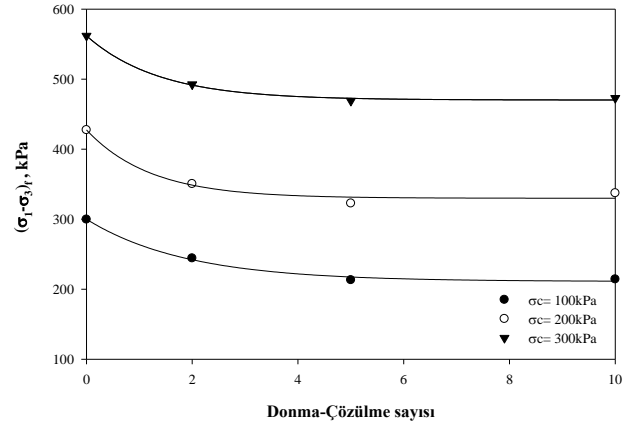
Gerilme-deformasyon ilişkisinde, E_t teğet modülü, kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerini de göz önüne alarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (7)$$

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) üç eksenli basınç testleri

Şekil 2'de farklı hücre basınçlarına ve farklı sayıda donma-çözülme testlerine maruz kalmış killi zeminlerin UU üç eksenli basınç test sonuçlarına göre elde edilmiş maksimum gerilme değerleri verilmiştir. Zemin donma periyoduna maruz kaldığında içindeki boşluk suyu buza dönüşür. Bu buz kuvveti, zemin parçacıklarının birbirinden ayrılmasına neden olur ve bu da boşluk suyu basıncını artırır. Ancak, çözülme sırasında artan boşluk suyu basıncı önceki durumuna geri dönemez. Bu nedenle donma-çözülme döngüleri genellikle zemin mukavemetini azaltır. Aynı hücre basıncı altında zemin numunesinin artan donma-çözülme döngülerinden sonra dayanımlarında azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca zemin numunelerinin donma-çözülme döngülerinden sonra gösterdikleri davranışlar kırılımdan sünek davranışa doğru olmuştur.



Şekil 2. UU deney sonuçlarına farklı D-Ç altında maksimum kayma gerilmeleri

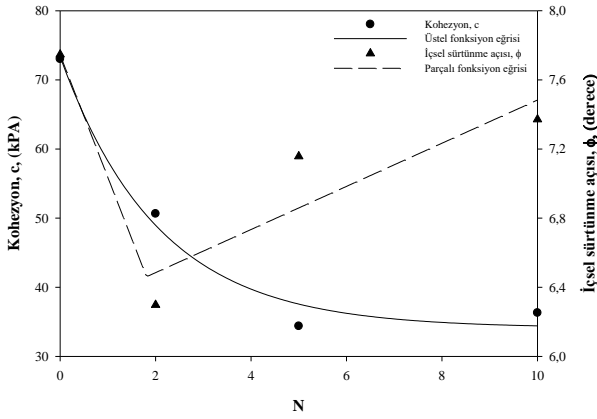
Donma-çözülme döngülerine maruz kalmış zeminlerin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri hesaplanmış ve Şekil 3'de sunulmuştur. c ve ϕ değerleri temel olarak parçacık boyutunun bileşimi, dizilimi ve parçacıklar arası bağlanma kuvvetinden etkilenen zeminin kayma mukavemetini değerlendirmek için iki önemli göstergedir [27, 28]. Deneysel verilere göre, donma-çözülme döngüleri arttıkça zeminin kohezyonunda azalma gözlenmiştir. Bununla birlikte, donma-çözülme döngülerinin bazı sayılarında (N) kil parçacıklarının sebep olduğu boşluklar ile ilgili olarak, numunelerin artan hacmi sebebiyle kohezyonda hafif bir artış gözlenmiştir. Diğer taraftan, içsel sürtünme açısı değerlerinde, N'deki artışla bir artış gözlenmiştir. c ve N arasındaki ilişki üstel fonksiyon ile açıklanırken (Denklem 8), ϕ ve N arasındaki ilişkiyi parçalı fonksiyon (Denklem 9) açıklayabilir. İki fonksiyonun parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

$$f(c) = a_1 \exp(-a_2 N) + a_3 \exp(a_4 N) \quad (8)$$

burada N numunelere uygulanan donma-çözülme döngü sayısını ifade etmektedir. a_1 , a_2 , a_3 ve a_4 uydurma eğrisinin parametreleridir.

$$\phi(N) = \begin{cases} \frac{Y_1(T_1 - N) + Y_2(N - N_1)}{(T_2 - T_1)} & N_1 \leq N \leq T_1 \\ \frac{Y_2(N_2 - N) + Y_3(N - T_1)}{(N_2 - T_1)} & T_1 \leq N \leq N_2 \end{cases} \quad (9)$$

burada T_1 bir sabit olup 1.8116'ya eşittir. Y_1 , Y_2 ve Y_3 parametreleri donma-çözülme döngü sayısı, N ile içsel sürtünme açılarının azalma oranlarını temsil eden eğimlerdir. N_1 , ilk iki donma-çözülme döngüsü arasındaki kritik döngü sayısıdır ve N_2 ise son iki donma-çözülme döngüsü arasındaki ikinci kritik döngü sayısını ifade etmektedir.



Şekil 3. Farklı donma-çözülme sayılarında kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri

Tablo 2. c, φ ve N arasındaki üstel ve parçalı fonksiyonlarının parametreleri

c (kPa)-N				
a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	R ²
39.273	0.4858	34.110	1.191E-012	0.9825
φ (°)-N				
Y ₁	Y ₂	Y ₃	T ₁	R ²
7.747	6.461	7.483	1.811	0.8794

3.2 Duncan-Chang model parametrelerinin tahmini

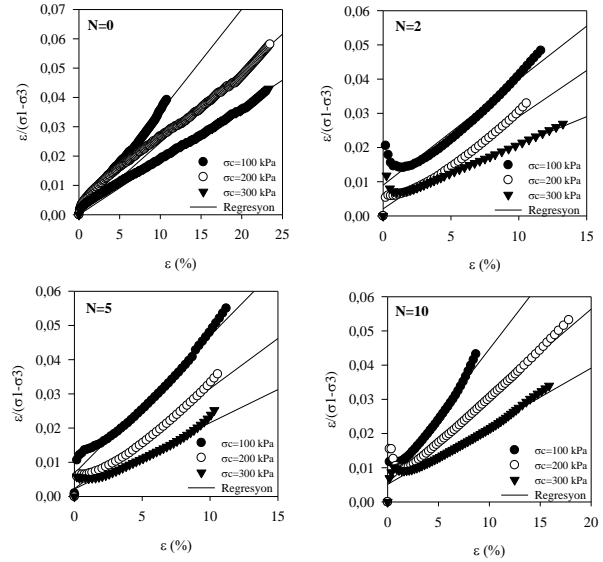
Denklem 7’de belirtildiği gibi Duncan-Chang modelinde zeminlerin tanjant modülünü üç temel faktör etkilemektedir. Bunlardan ilki, herhangi bir hücre basıncında malzemenin hasar oranına karar vermek için kullanılabilen, farklı hücre basınçlarında ortalama bir değerden belirlenen hasar oranı, R_f’dir; ikincisi, hücre basıncı ile ilgili ilk teğet modülü E_i’dir; ve üçüncüsü, aynı zamanda hücre basıncına bağlı kırılma mukavemeti (σ₁-σ₃)_f’dir.

UU üç eksenli testlerden elde edilen sonuçlar, Kondner [25] ve Duncan ve ark. [24] tarafından önerilen hiperbolik model parametrelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Şekil 4’ten farklı bir koordinat sistemine dönüştürülerek elde edilen gerilme-deformasyon ilişkisinin (ε- ε/(σ₁-σ₃)) birinci mertebeden lineer bir korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Numunenin gerilme-deformasyon eğrisi hiperbolik fonksiyona uygundur. Eğri uydurma çizgisinin y-kesişimi a parametresini gösterirken ve eğimi ise b parametresini ifade eder. a ve b parametrelerinin karşılığı sırasıyla başlangıç tanjant modülü, E_i ve nihai gerilme değeri (σ₁-σ₃)_{ult}’dir. Tablo 3’de ε- ε/(σ₁-σ₃) ilişkisine ait hiperbolik fonksiyonun parametreleri verilmiştir.

Tablo 3’de verilen a ve b parametrelerinden elde edilen farklı donma-çözülme döngüleri altında ve farklı hücre basınçlarına maruz kalmış zeminlerin başlangıç tanjant modülü (E_i) değerleri Şekil 5’de sunulmuştur.

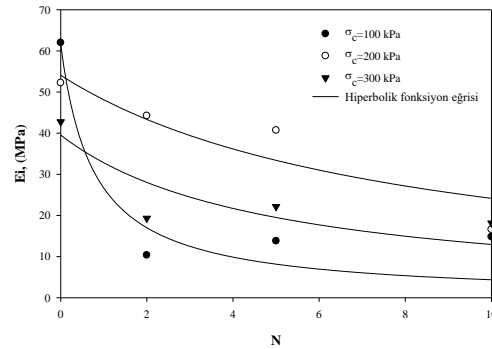
Tablo 3. ε- ε/(σ₁-σ₃) ilişkilerinden elde edilen a ve b parametreleri

N	σ _c =100 kPa		σ _c =200 kPa		σ _c =300 kPa	
	a (kPa ⁻¹) x E-05	b (kPa ⁻¹)	a (kPa ⁻¹) x E-05	b (kPa ⁻¹)	a (kPa ⁻¹) x E-05	b (kPa ⁻¹)
0	1.61	0.00329	1.91	0.0022	2.34	0.00169
2	9.68	0.00301	2.26	0.0027	5.18	0.00157
5	7.25	0.00396	2.46	0.0029	4.51	0.00191
10	6.75	0.00375	6.03	0.0025	5.51	0.00167



Şekil 4. a ve b parametrelerini elde etmek için çizilen ε- ε/(σ₁-σ₃) ilişkileri

Farklı hücre basınçları altında, zeminlerin başlangıç teğet modülleri N ile azalma eğilimi göstermiş olup, bu azalma oranı 5 donma-çözülme döngüsüne kadar daha hızlı olup, bu döngüden sonra daha yavaş düşme eğilimi göstermiştir. E_i ile N arasındaki regresyon ilişkisi hiperbolik fonksiyon ile uydurulabilir ve uydurma eğrisi parametreleri Tablo 4’de gösterilmektedir. Farklı hücre basınçları altında, E_i değeri artan donma-çözülme döngülerinden sonra azalma eğilimindedir.



Şekil 5. Farklı hücre basınçlarına maruz kalmış zeminin E_i- N ilişkileri

Tablo 4. E_i - N arasındaki hiperbolik fonksiyonun parametreleri

$f(E_i) = \frac{a_1 a_2}{a_2 + N}$		
a_1	a_2	R^2
61.629	0.763	0.8976

Duncan-Chang model parametrelerinden olan hasar oranı, R_f , ve modül parametreleri K ve n değerlerinin farklı donma-çözülme döngüleri altındaki değişimi Şekil 6a'da gösterilmiştir. Hasar oranı R_f , artan donma-çözülme döngülerinden sonra artan bir eğilim göstermiştir. 2 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış zeminlerde R_f değeri %16.35 oranında, 5 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış zeminlerde %21.49 oranında ve 10 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış zeminlerde %13.81 oranında artmıştır. Şekil 2'deki farklı sayıda donma-çözülme altında maksimum kayma gerilmeleri grafiğine göre, zemin numuneleri 5. donma-çözülme döngüsünden 10. donma-çözülme döngüsüne geçerken yeni bir denge durumu kazanmış bu döngüden sonra gösterdiği davranış maksimum kayma gerilmelerini çok az miktarda değiştirmiştir. Zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli değişikliklerin görüldüğü 5 donma-çözülme döngüsüne maruz kalmış zemin numunelerinin R_f değerlerinde de maksimum değerler gözlenmiştir. R_f değerleri ve donma-çözülme çevrim sayılarındaki ilişki Gauss fonksiyonu ile açıklanmış olup, Denklem 10'da verilen fonksiyona ait parametreler Tablo 5'de sunulmuştur.

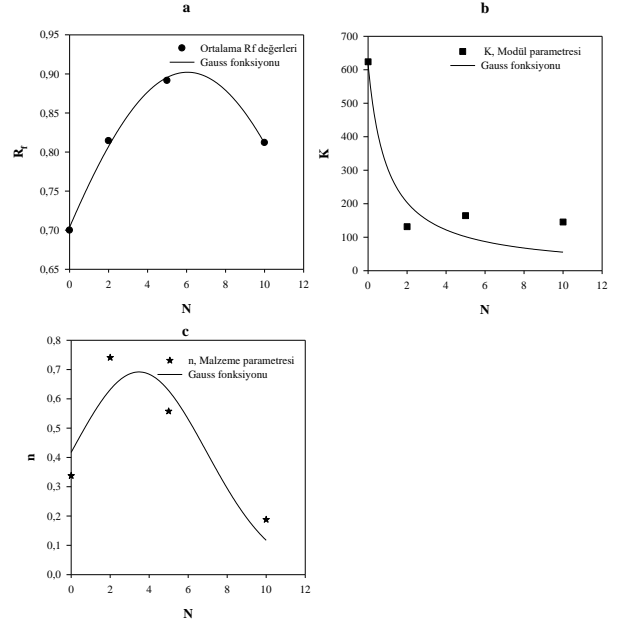
$$f(R_f) = a_1 \exp\left(-0.5\left(\frac{N - a_3}{a_2}\right)^2\right) \quad (10)$$

Tablo 5. R_f , K , n ile N arasındaki fonksiyonların parametreleri

R_f - N				K - N		
a_1	a_2	a_3	R^2	a_1	a_2	R^2
0.9021	8.5762	6.044	0.9956	618.3403	0.9823	0.8989
n- N						
a_1	a_2	a_3	R^2			
0.6917	3.4601	3.4797	0.8405			

Öte yandan, modül parametresi K , sabit bir hücre basıncında başlangıç tanjant modülünün sabit bir atmosfer basıncına oranını ($P_a=101.3$ kPa) gösterir. Donma-çözülme döngü sayısının artmasıyla K parametresinin değeri azalmış ve en keskin azalma donma-çözülme öncesinden 2 donma-çözülme maruz kalmış zemin örnekleri için gözlenmiştir. K ve N arasındaki ilişki hiperbolik fonksiyon ile açıklanmıştır (Şekil 6b). Tablo 5'de K ve N arasında kurulan hiperbolik ilişkinin katsayıları sunulmuştur. Bununla birlikte, malzeme parametrelerinden n , hücre basıncıyla ilk tanjant modülünün artan oranını yansıtır. Malzeme parametresi n , zeminin donma-çözülme maruz kalması ile başlangıçta artan bir eğilime sahipken, döngülerin artmasıyla azalma eğilimindedir. Şekil 6c'de gösterildiği üzere, Gauss fonksiyonu, model parametresi n ile döngü sayısı N

arasındaki ilişki için uygundur ve Tablo 5'de hesaplanan fonksiyon parametreleri verilmiştir.



Şekil 6. Duncan-Chang model parametrelerinin donma-çözülme döngüleri sayısı ile değişimi

3.3 Grey korelasyon analizi

Grey korelasyon analizinin hesaplama prosedürü kullanılarak [29], modeldeki sekiz parametre (c , ϕ , $\sigma_{F100kPa}$, $\sigma_{F200kPa}$, $\sigma_{F300kPa}$, R_f , K , n) ile donma-çözülme döngü sayısı (N) arasındaki Grey korelasyon derecesi Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Farklı donma-çözülme döngüleri için Grey korelasyon derecesi değerleri

	R_f	K	n
N	0.99381	0.738314	0.99248
N	$\sigma_{F100kPa}$	$\sigma_{F200kPa}$	$\sigma_{F300kPa}$
N	0.684534	0.611836	0.555858
N	c	ϕ	
N	0.9193	0.988247	

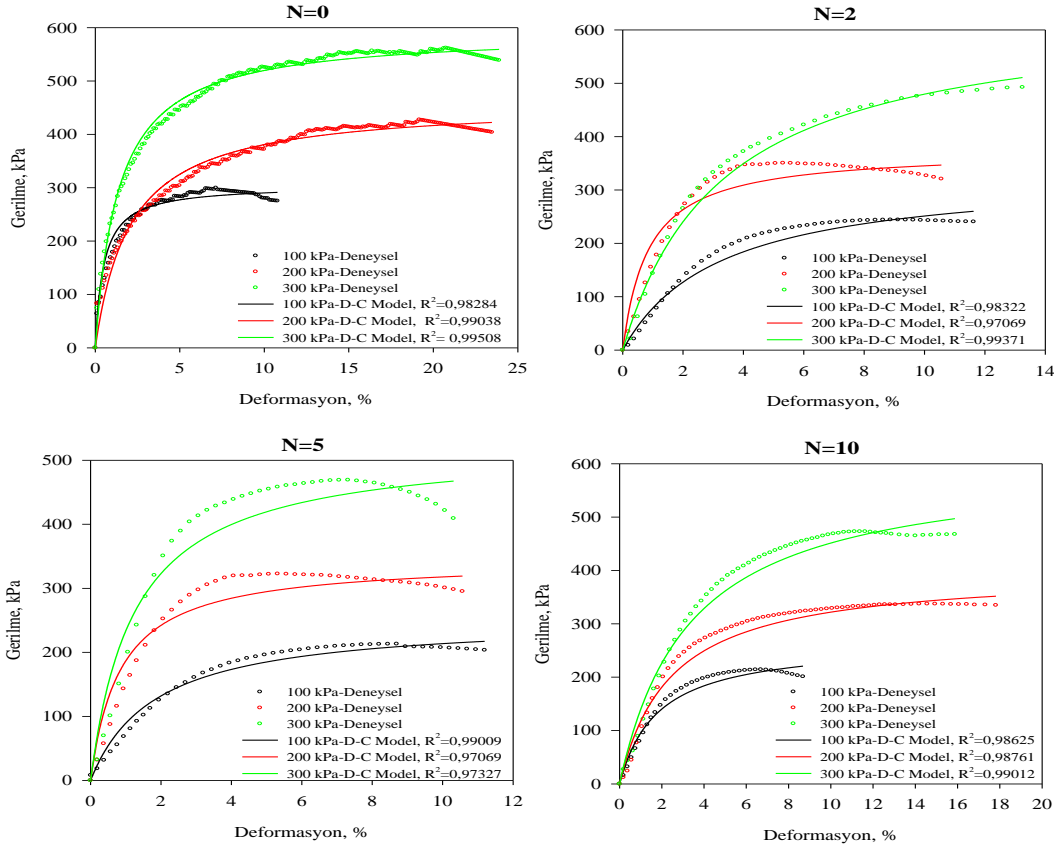
Modelde kullanılan verilerin korelasyonun anlamlılık derecesi olan 0.5'den büyük olduğu için model parametreleri ve test faktörleri arasındaki ilişki anlamlıdır. Donma-çözülme döngüleri için $R_f > n > \phi > c > K > \sigma_{F100kPa} > \sigma_{F200kPa} > \sigma_{F300kPa}$ olarak korelasyon dizisi belirlenmiştir. Burada, hasar oranı, malzeme parametreleri ve kayma direnci parametrelerinin donma-çözülme döngülerinin artan sayısı ile yenilme anındaki maksimum kayma gerilmesi (σ_f) değerlerine göre daha anlamlı bir ilişki sergilediği görülmektedir. Öte yandan, 100 kPa'lık hücre basıncına maruz kalmış zemin numunelerinin yenilme anındaki maksimum kayma gerilmesi (σ_{f-100} kPa), 300 kPa'lık hücre basıncına maruz kalmış zemin numunelerinin yenilme anındaki maksimum kayma gerilmesi (σ_{f-300} kPa) değerine

kıyasla donma-çözülme döngülerinden daha fazla etkilenmiştir. Bu durum, Roustaei ve ark. [30]'nın yapmış oldukları çalışmalarında donma-çözülme döngülerinin etkisinin daha küçük bir hücre basıncında, büyük hücre basıncına kıyasla daha belirgin olduğunu göstermişlerdir. Donma-çözülme döngülerinin artan sayıları, etki ettiği alanda büyük hasarlara ve çatlaklara sebep olurken, yüksek çevre basıncından kaynaklanan zemin danelerinin yeniden dizilimi ile bu çatlaklar birbirine yaklaşarak zemin mukavemeti iyileştirebilir.

3.4 Duncan-Chang modelinin doğrulanması

Bu çalışmada, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon eğrilerinden elde edilen model

parametrelerine bağlı olarak hesaplanan gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Farklı hücre basınçları altında ve farklı sayıda donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan zemin numunelerinin Duncan-Chang modeli kullanılarak tahmin edilen gerilme-deformasyon eğrileri ile deneysel gerilme-deformasyon eğrileri yüksek bir korelasyona sahiptir. Öte yandan, zeminlerin Duncan-Chang modeli tarafından tahmin edilen gerilme-deformasyon eğrileri, test sonuçlarını küçük deformasyon oranlarında, yani elastik deformasyonun meydana geldiği bölgede en iyi yansıttığı görülmektedir. Deformasyon arttıkça, model çıktıları ve test sonuçları arasındaki sapmalar artmaktadır.



Şekil 7. Farklı donma-çözülme döngülerinde deney sonuçları ile Duncan-Chang (D-C) modelin karşılaştırılması

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, killi bir zemin örneğinin gerilme-deformasyon ilişkileri Duncan-Chang modeli ile tahmin edilmiş olup, model parametreleri ve donma-çözülme döngüleri arasındaki matematiksel ilişkiler açıklanmıştır. Deneysel çalışma ve model çıktıları arasındaki korelasyonlar incelenerek, modelin donma-çözülme altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerini ne ölçüde tahmin edebildiği belirlenmiştir. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

(1) Maksimum donma-çözülme döngülerinden sonra, zeminlerin $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ değerleri 100 kPa'lık hücre basıncı için %28.48, 200 kPa'lık hücre basıncı için %21.08, 300 kPa'lık hücre basıncı için %15.82 oranlarında azalma göstermiştir.

Kayma direnci parametrelerinden kohezyon N'ye bağlı olarak azalma göstermiş olup, aralarındaki ilişki üstel fonksiyonla tanımlanmıştır. Diğer taraftan, N ile içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki parçalı fonksiyon ile açıklanmıştır. Her iki parametrenin de eğri uydurma sonuçları, korelasyon katsayısı değerlerinin $0.5 < R^2 < 1$ aralığında olmasından dolayı gerçek sonuçları iyi yansıttığını göstermiştir (c için; $R^2 = 0.9825$, ϕ için; $R^2 = 0.8794$).

(2) Duncan-Chang model parametrelerinden olan R_f ve n parametreleri ile N arasındaki ilişki Gauss fonksiyonuyla açıklanmış olup, K ve E_i parametreleri ile N arasındaki ilişki hiperbolik fonksiyonla açıklanmıştır. E_i ve K parametreleri artan donma-çözülme sayılarına bağlı olarak azalma eğilimi göstermiştir. Diğer taraftan, R_f ve n parametreleri de

numunelerin donma-çözölmeye maruz kalması ile başlangıçta artan bir eğilime sahipken, döngülerin artmasıyla azalmışlardır.

(3) Model parametreleri ve donma-çözölmeye döngü sayıları arasındaki Grey korelasyon analizi sonuçlarına göre, N' den en fazla etkilenen parametre hasar oranı R_f olmuştur. Öte yandan, korelasyon derecelerinin 0.5'den daha yüksek olduğundan, N etkisinin model parametrelerinin üzerindeki etkisi göz ardı edilemez.

(4) Model doğrulaması, hesaplanan ve deneysel gerilme-deformasyon eğrileri karşılaştırılarak yapılmıştır. Düşük deformasyon değerlerinde elastik deformasyon bölgesinde, model sonuçlarının deney sonuçlarıyla diğer bölgelere göre daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] O. B. Andersland and L. Branko, Frozen Ground Engineering. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.
- [2] D. Y. Wang, W. Ma, Y. H. Niu, X. X. Chang and Z. Wen, Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. Cold Regions Science and Technology, 48 (1), 34-43, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.008>.
- [3] Y. Lu, S. Liu, Y. Zhang, L. Wang and Z. Li, Hydraulic conductivity of gravelly soils with various coarse particle contents subjected to freeze-thaw cycles. Journal of Hydrology, 598, 126302, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126302>.
- [4] J. Li, Y. Zhao, A. Zhang, B. Song and R. L. Hill, Effect of grazing exclusion on nitrous oxide emissions during freeze-thaw cycles in a typical steppe of Inner Mongolia. Agriculture, Ecosystems & Environment, 307, 107217, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107217>.
- [5] Y. Han, Q. Wang, W. Xia, J. Liu, J. Wang, Y. Chen and J. Shen, Experimental study on the hydraulic conductivity of unsaturated dispersive soil with different salinities subjected to freeze-thaw. Journal of Hydrology, 583, 124297, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124297>.
- [6] B. Liu, H. Fan, W. Han, L. Zhu, X. Zhao, Y. Zhang and R. Ma, Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese Mollisol under freeze-thaw effect. Geoderma, 401, 115170, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115170>.
- [7] J. Shen, Q. Wang, Y. Chen, Y. Han, X. Zhang and Y. Liu, Evolution process of the microstructure of saline soil with different compaction degrees during freeze-thaw cycles. Engineering Geology, 106699, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106699>.
- [8] J. Xu, Y. Li, C. Ren, S. Wang, S. K. Vanapalli and G. Chen, Influence of freeze-thaw cycles on microstructure and hydraulic conductivity of saline intact loess. Cold Regions Science and Technology, 181, 103183, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103183>.
- [9] G. T. Zhao, W. L. Zou, Z. Han, D. X. Wang and X. Q. Wang, Evolution of soil-water and shrinkage characteristics of an expansive clay during freeze-thaw and drying-wetting cycles. Cold Regions Science and Technology, 186, 103275, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103275>.
- [10] M. Lv, Y. Wang and Z. Gao, The change process of soil hydrological properties in the permafrost active layer of the Qinghai-Tibet Plateau, CATENA, 210, 105938, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105938>.
- [11] Y. Lu, Y. Zhang, S. Liu, W. Guo and F. Xu, Mechanical behaviour and permeability of expansive soils mixed with scrap tire rubbers subjected to freeze-thaw cycles, Cold Regions Science and Technology, 199, 103580, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103580>.
- [12] S. Ahmadi, H. Ghasemzadeh and F. Changizi, Effects of A low-carbon emission additive on mechanical properties of fine-grained soil under freeze-thaw cycles, Journal of Cleaner Production, 304, 127157, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127157>.
- [13] F. Changizi, H. Ghasemzadeh, and S. Ahmadi, Evaluation of strength properties of clay treated by nano-SiO₂ subjected to freeze-thaw cycles, Road Materials and Pavement Design, 1-18, 2021. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1883466>.
- [14] Y. Liu, H. Deng, J. Xu, G. Tian, and J. Deng, Association study on the pore structure and mechanical characteristics of coarse-grained soil under freeze-thaw cycles, Minerals, 12(3), 314, 2022. <https://doi.org/10.3390/min12030314>.
- [15] X. Liu, X. Wei, and H. Qin, Characterizing compressive strength of compacted saline loess subjected to freeze-thaw cycling with wave velocity, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(4), 2022. <https://doi.org/10.1007/s10064-02202663-6>.
- [16] A. Yorulmaz, O. Sivrikaya, and F. Uysal, Evaluation of the bearing capacity of poor subgrade soils stabilized with waste marble powder according to curing time and freeze-thaw cycles, Arabian Journal of Geosciences, 14(5), 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06749-5>.
- [17] B. Huang, R. J. Bathurst, and K. Hatami, Numerical study of reinforced soil segmental walls using three different constitutive soil models, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(10), 1486-1498, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000092](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000092).
- [18] W. Zhang, J. Ma, and L. Tang, Experimental study on shear strength characteristics of sulfate saline soil in Ningxia region under long-term freeze-thaw cycles, Cold Regions Science and Technology, 160, 48-57, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.01008>.

- [19] J. H. Xiong, X. Y. Kou, F. Liu, and M. J. Jiang, Applicability of Duncan-Chang model and its modified versions to methane hydrate-bearing sands, *Advanced Materials Research*, 347–353, 3384–3387, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.34735-3.3384>.
- [20] J. Liu, D. Chang, and Q. Yu, Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand, *Engineering Geology*, 210, 23–32, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.05.019>.
- [21] C. Yan, Y. Cheng, M. Li, Z. Han, H. Zhang, Q. Li, F. Teng and J. Ding, Mechanical experiments and constitutive model of natural gas hydrate reservoirs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (31), 19810–19818, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.135>.
- [22] X. Liu, J. Liu, Y. Tian, D. Chang, and T. Hu, Influence of the freeze-thaw effect on the Duncan-Chang model parameter for lean clay, *Transportation Geotechnics*, 21, 100273, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100273>.
- [23] ASTM D2850-95, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- [24] J. M. Duncan and C. Y. Chang, Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1629–1653, 1970. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001458>.
- [25] R. L. Kondner, Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 115–143, 1963. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000479>.
- [26] J. B. Hansen, Discussion of hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(4), 241–242, 1963. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000542>.
- [27] E. Amiri, H. Emami, M. R. Mosaddeghi, and A. R. Astarai, Shear strength of an unsaturated loam soil as affected by vetiver and polyacrylamide, *Soil and Tillage Research*, 194, 104331, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104331>.
- [28] M. Wang, S. Meng, X. Yuan, Y. Sun, J. Zhou, X. Yu and L. Chen, Research on freezing-thawing correction coefficients of shear strength parameters of seasonal frozen soil, *Journal of Rock Mechanical Engineering*, 37, 3756–3764, 2018. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2016.1317>.
- [29] J. L. Deng, Introduction to grey system theory. *Journal of Grey System*, 1(1): 1-24, 1989.
- [30] M. Roustaei, A. Eslami and M. Ghazavi, Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters, *Cold Regions Science and Technology*, 120, 127-137, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.011>.





İstatistiklerle ülkemizdeki açık hat demiryolu ulaşımındaki gelişmeler

Developments in open line rail transportation in our country with statistics

Recep Koray Kıyıldı^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Bu makalede ülkemizde açık hatlar üzerinde ve özellikle hemzemin geçitlerde meydana gelen kazalar incelenerek değerlendirilmiştir. Ülkemizde demiryolu altyapı işletmecisi olan Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) Genel Müdürlüğü son yıllarda hemzemin geçitlerde iyileştirme çalışmalarını hızlandırmıştır. Bunun içinde geçitlerde gerek koruma sistemleri yönünden, gerek kaplama cinsi yönünden hızlı bir dönüşüm başlatılmıştır. Özellikle hemzemin geçitlerde ölümlü kazaların önüne geçmek, trafikte seyir halindeki araçların tren beklemelerini azaltmak için modernizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Makalede TCDD tarafından tutulan istatistikler incelenerek yapılan modernizasyon çalışmalarının kaza ve olaylara nasıl yansıdığı elde edilen verilere göre değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Hemzemin geçit, Tren kazası

1 Giriş

Günümüz dünyasında gelişen ulaşım sistemleri insan hayatına olumlu etkiler yaratırken makinelerin bulunduğu her ortam da olduğu gibi, ulaşım sistemlerindeki makineler de belli riskler oluşturabilmektedir. Sayısı gittikçe artan ulaşım araçları -özellikle büyük şehirlerde- trafik yoğunluğunun artmasına, insanların trafikte daha çok zaman geçirmesine sebep olmaktadır. Bu trafik yoğunluğunu azaltmak için çalışmalar sürekli devam etmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda daha hızlı ve konforlu toplu ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi ve insanların toplu taşıma sistemlerini kullanılmaya teşvik edilmesi amaçlanmaktadır.

Yapılan çalışmalar hem şehir içi trafiğini, hem de şehirlerarası trafiği daha akıcı hale getirmeye yöneliktir. 1990'lı yıllara kadar karayolu araçlarının yetersizliği ve yüksek fiyatı sebebiyle insanlar genellikle demiryolu taşımacılığını tercih etmişlerdir. Bu yıllardan sonra özel araç üretimi ve sahipliğinin artmasıyla toplu ulaşım araçlarından özel araçlara geçiş yaşanmıştır. Ancak gelişen teknoloji ile özellikle demiryolu ve havayolu ulaşım araçlarındaki gelişmeler insanları zaman kazanmak adına daha çok bu ulaşım alanlarına çekmiştir. Zaman kavramının öneminin arttığı çağımızda, havayolu taşımacılığı ve yüksek hızlı tren taşımacılığı da bu kavram bakımından en iyi alternatif ulaşım sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelişen demiryolu sektörü arkasında bazı güvenlik açıklarını da beraberinde getirmektedir. Yönetimler bu güvenlik

Abstract

In this article, the accidents that occur on open lines and especially at level crossings in our country are examined and evaluated. The General Directorate of Turkish State Railways (TCDD), which is the railway infrastructure operator in our country, has accelerated the improvement works at level crossings in recent years. Within this, a rapid transformation has been started in the passages in terms of both protection systems and coating type. Modernization studies are carried out in order to prevent fatal accidents especially at level crossings, to reduce train waiting of vehicles in traffic. In the article, the statistics kept by TCDD were examined and how the modernization works reflected on the accidents and incidents was evaluated according to the data obtained.

Keywords: Railway, Level crossing, Train accident

açıklarının giderebilmek için çeşitli yöntemler geliştirme çabasıdır. Bu yöntemleri mümkün olduğunca insan komutasında değil de bilgisayar tabanlı kontrol sistemleri yardımıyla kumanda edebilmek ve insan hatasını sifira indirmek için çalışılmaktadır.

Demiryolu sektöründe geliştirilen trafik güvenliği sistemleri ile olumlu sonuçlar alınması sadece demiryolu trafik güvenliği ile sınırlı kalmaktadır. Demiryolu güzergahına yaklaşan diğer hareketliler açısından herhangi bir koruyuculuğun olmaması riskleri tamamen ortadan kaldırmaya yetmemektedir. Demiryolu ulaşım sistemi için demiryolu araçları dışında risk teşkil eden unsurlar; güzergahta bulunan diğer hareketliler ve karayolu hareketlileri ile demiryolu araçlarını kesiştiren hemzemin geçitlerdir. Demiryolu ulaşım sistemini oluşturan araçlarla temas edebilecek unsurlar güvenlik zafiyeti oluşturmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek için de özellikle güzergah ve geçitlerde meydana gelebilecek olumsuzlukları önlemek için güvenlik sistemlerinin geliştirilmesi ve risklerin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Ulaşım sistemlerinde hangi sistem olursa olsun kaza istenmeyen bir durumdur. Bu sistemler misyonlarını önce emniyet kavramıyla bütünleştirmek isterler. Kaza ve olayların önlenmesi için yatırımlar yapılır. Demiryollarında da kaza ve olayların önlenmesi için yatırımlar yapılmakta kaza sonrası oluşacak maddi hasarlar ve can kayıpları ile prestij kayıplarının önüne geçmek için önceden tedbirler alma yoluna gidilmektedir. Özellikle de hemzemin geçit

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: rkoray@ohu.edu.tr (R. K. Kıyıldı)

Geliş / Received: 08.07.2022 Kabul / Accepted: 24.08.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1142613

kazalarında can kaybı olasılığının yüksek olması ve oluşabilecek tepkiler açısından geçitleri modernize etme çalışmalarına önem verilmektedir. Bununla beraber, açık hatlarda kaza ve olaylar konusunda hemzemin geçitlere nazaran önleyici sistemlerin tam manasıyla uygulanması yapılamamaktadır.

Demiryolu, çekilen taşıtların belli bir yönden, şaşmaması ve sürtünme direncinin azaltılması için yapılan araştırmalardan doğmuştur. 19. Yüzyılın başlarından itibaren demiryolu modern bir şekilde işlemeye başlamıştır. Buhar makinesinin icadından önce bazı madenlerde ray sistemi görülmektedir. Maden ocağından çıkarılan madenler, ray sistemi üzerinde hareket eden kasalara yüklenerek işçiler yada hayvanlar yardımıyla çekilerek maden dışarı ulaştırılmaktaydı. Bu 1550'lerde Fransa'daki Alsace maden ocaklarında tahta raylar kullanılarak yapılmıştır. Tahta rayların çabuk deformasyon olması insanları madeni raylara yöneltti. Madeni rayların ilk kullanılması 1776 da İngiltere'de Sheffield'da başlamıştır.

Zamanla insanların daha hızlı ulaşım istemeleriyle yeni gelişmeler olmuştur. Sanayi devrimiyle gelişen buharlı makineler demiryollarında da kullanılmıştır. Bunun yanında gelişen demir sanayisinin geliştirdiği ürünlerle modern demiryolculuğu hızlanmıştır. Bu konudaki ilk çalışmaları 1769 da Fransız Nicolas Cugnot, 1786 de İngiliz William Murdoch, buhar gücünü, karayolu araçlarında kullanmayı deneyerek yapmışlardır. 1801 de Richard Trevithick, buhar gücüyle çalışan lokomotif demiryolu üzerinde denemiştir. Aynı türden denemeleri 1811 'de Blenkinsop ve 1813'de Branton yapmışlarsa da pek olumlu sonuç alamamışlardır. Bunun başlıca sebebi bu yıllarda kullanılan demir raylarının, lokomotifin ağırlığına dayanamıyor olmasıydı. Malzemedeki kalite yetersizliği buharlı çekicilerin kullanılma girmesini bir süre geciktirmiştir. Bu problemin çözümünü George Stephenson, daha sağlam ray ve daha gelişmiş lokomotif yaparak ortaya koymuştur. Yaptığı çalışmayla Darlington maden ocağını Stocton limanına bağlayan bir demiryolu hattını inşa etmiştir. 1825 yılında ulaşım için bu hatta lokomotifin çektiği tren saatte 20 km hızla hareket ederek, yolculuğunu tamamladı 1829 yılında eskisinden daha süratli bir lokomotif geliştiren Stephenson Liverpool ile Manchester arasına demiryolu hattı yaparak 1830 tarihinde hizmete sokmuştur.

Bu gelişmeler doğrultusunda buharlı trenlerin işlediği demiryolları diğer ülkelerde de faaliyete geçmeye başlamıştır. Osmanlı Devleti'nin Anadolu toprakları üzerinde yapılan ilk demiryolu, imtiyazı 1856 yılında verilen İzmir-Aydın demiryoludur. Rumeli toprakları üzerinde yapılan ilk demiryolu ise, imtiyazı 1857 yılında verilen Köstence-Çemavoda (Boğazköy) hattıdır. Bu dönemden sonra Cumhuriyet dönemine kadar yaklaşık 12000 km demiryolu inşa edilmiştir [1].

Cumhuriyetten sonra ise Türkiye topraklarında kalan demiryolu uzunluğu 4136 km dir. 1923 ten günümüze kadar ise toplam demiryolu uzunluğu; 9131 km ana hat, 2395 km istasyon ve iltisak hattı ve 1213 km yüksek hızlı tren hattı olmak üzere toplam 12710 km demiryolu ağına erişilmiştir [2]. TCDD Genel Müdürlüğü verilerine bakıldığında - mevcut konvansiyonel hatlarda şehir geçişlerinde birim

müdürlükleri olan Demiryolu Bakım Müdürlükleri bünyesinde- yalnızca özellik arz eden şehir geçişleri dışında bir hat kesiminin tamamen güvenlik amacıyla ihata altına alınması şeklinde bir uygulama görülmemiştir. Bu tür bir uygulamanın altyapısının oluşturulmadan yapılmaya çalışılması mümkün değildir. Bunun başlıca sebebi ise kent geçişlerinde çoğu zaman kenti ikiye bölen demiryolu hattından karşıdan karşıya geçmeye çalışan insanların olması ihtimalinin bulunmasıdır. Böyle bir durumda insanlara yeni bir geçiş alternatifi sunmadan, hattın ihata altına alınması, insanların geçiş için kaçak geçişler oluşturmaya çalışılmasına imkan verecektir. Aslında bu açılan kaçak geçişler kaza riskinin daha fazla artmasına sebep olmaktadır. Kent içi geçişlerde güvenlik duvarı oluşturulmadan önce, alternatif geçiş güzergahlarının belirlenmesi, geçiş için uygun modelin seçilmesi alt/üst geçit hangisine karar verilmişse projesi yapıp hizmete açılmasından sonra, açık hattın ihata ile güvenlik altına alınması gereklidir. Ülkemizde kent içi geçişlerin ihata altına alınması ile ilgili herhangi bir istatistik bilgi bulunmamaktadır. Ancak demiryolu güzergahı etrafında nüfus yoğunluğu fazla olan hat kesimlerinde, kent içi görüş mesafesi kısa olan hat kesimlerinde ihata uygulamaları yapılmaktadır. Genellikle istasyon sınırları ihata ile korunmaktadır. Yüksek hızlı tren hatlarında ise açık hat veya kent içi geçiş fark etmeksizin tamamen yüksek güvenlikli panel çit uygulaması ile bütün hat kesimi koruma altına alınmaktadır. Bu işlem demiryolu inşaatı sırasında ve işletmecilik başlamadan önce yapılmalıdır. Örneğin Eskişehir'de yüksek hızlı trenin kent içi geçişi yer altına alınarak hem yüksek güvenlik oluşturulmuş, hem de kent içinde güzergahı kalan alanlar başka şekilde değerlendirilmiştir.

Demiryolu ve karayolunun birbirini aynı kotta kestiği bölgeye hemzemin (eş düzey) geçit denir. Burada demiryolu ve karayolunun aynı kotta olması ve birbirini belli bir açıda kesmesi gerekmektedir. TCDD hemzemin geçitler için 'Demiryolu hemzemin geçitlerinde alınacak tedbirler ve uygulama esasları hakkında yönetmelik, 2013 yılında resmi gazete de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir [3]. Bütün hemzemin geçitler bu yönetmelik çerçevesinde inşa edilmekte ya da bu yönetmeliğe uygun hale getirilmektedir. Aynı yönetmeliğe göre tren hızlarının 160 Km/h ve üstü olduğu hızlı tren ve yüksek hızlı tren demiryolu güzergahlarında hemzemin geçit tesis edilemez ibaresi gereği yalnızca konvansiyonel hatlarda hemzemin geçit uygulamalarıyla karşılaşmaktayız.

TCDD tarafından emniyet yönetim sistemi kurulması çalışmaları 2008 de başlamıştır. 2014 de Emniyet Yönetim Sistemleri Müdürlüğü kurularak görevlilerin sorumlulukları tanımlanmıştır [4]. Daha sonraki senelerde demiryolu düzenleme kurulu tarafından demiryolu emniyet yönetmenliği hazırlanarak 2015 de yayımlanmıştır. Bu yönetmenlik ile altyapı işletmecilerine, demiryolu tren işletmelerine ve şehir içi raylı toplu ulaşım yapan işletmelere emniyet sertifikası verilmesi ve emniyet yetkilendirilmesi verilmesi sağlanmıştır [5].

Yıllara göre elde edilen istatistikler neticesinde demiryolu kaza oranlarının önemli bir kısmını hemzemin geçit kazalarının oluşturduğu görülerek, hemzemin geçit

güvenlik önlemlerinin artırılmasına önem verilmiştir. Trafik yoğunluğuna bağlı olarak alt ve üst geçit yapımına ağırlık verildiği görülmektedir.

İki farklı ulaşım türünün kesiştiği hemzemin geçitler kaza riskinin yüksek olduğu güzergah bölümleridir. Hemzemin geçit kazaları, bir demiryolu aracı ile hemzemin geçidi kullanan bir veya daha fazla karayolu aracının veya hemzemin geçidin diğer kullanıcılarının (yaya, hayvan ve diğer nesnelere) çarpışması olarak tanımlanmaktadır [6]. Türk Standartları Enstitüsü tarafından, TS-13643 Demiryolu uygulamaları-hatlar- demiryolu hatlarının altından üstünden ve paralel geçişler için kurallar 2014 de yayınlandı [7]. Bu sayede hat üzerinde yapılacak yeni geçişlerde ve iyileştirmelerde bu kurallar dikkate alınarak daha güvenli geçiş koşulları sağlanmıştır.

Türkiye'deki hemzemin geçitlerin emniyet değerlendirme süreçleri, dünyada kullanılan kompleks ağırlıklıdır. Bazı ve istatistiksel yöntem bazlı modeller ile yürütülen süreçler seviyesine çıkarılmaya çalışılmıştır. Ayrıca modelin kullanımı, hemzemin geçit emniyet değerlendirme çalışmalarını, matematiksel ve sistematik bir çerçeveye taşımaktadır. Bundan dolayı, modelin kullanımıyla zaman içerisinde elde edilecek bulguların ve dolayısıyla tecrübelerin de sayısal bir temelde toplanması sağlanmış olacaktır. Böylece hemzemin geçit emniyetini etkileyen faktörler ile kazalar arasındaki ilişkinin daha sistematik ve sayısal bir veriyle yorumlanıp, iyileştirme/iptal etme yapılacak olan hemzemin geçitlerin irdeleme, tasarım ve işletme süreçlerinin kaynakların daha verimli kullanıldığı ve emniyetin daha detaylı bilgilerle değerlendirildiği bir hal alacağı umut edilmektedir [8].

Ülkemizde mevcut demiryolu hatlarında güvenlik önlemleri kent içi alanlarda yaygınlaşmaya başlamış olsa da yeni inşa edilen hatlarda güzergahı izole etme çalışmaları daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılan ihata sistemleri farklılık göstermekle beraber, bölgedeki insanların kültürel farklılıklarına göre de ihata tipi belirlenebilmektedir. Öyle ki daha önce yüksek güvenli panel çit yapılmış olan bir bölge insanlar tarafından sürekli tahrip edilip yaya geçiş bölgesi oluşturulmaya çalışılmış, neticesinde ise panel çit yerine betonarme duvar yapılması ile çözüm aramaya kadar gidildiği görülmüştür. Her ne kadar beton duvar bu işin üst sınırı olsa da görsellik açısından bakıldığında beton duvar uygulaması özellikle şehir içinde estetik bir görüntü ortaya çıkmasına sebep olmuştur [9]. Uygulanmış örnekleriyle demiryolu sinyalizasyon sistemleri hakkında Altan [10] tarafından bir kitap yayınlamıştır. Avrupa birliği uyum sürecinde demiryollarında emniyet konusunda yapılan uyum çalışmaları ve yenilikler Güler [11] tarafından açıklanmıştır.

Bu makalede geçitlerin tasarımının güvenlik açısından önemini ortaya koyabilmek için yapılan çalışmalar ve sonuçları değerlendirilerek ortay koyulmuştur. Güzergah ve geçitlerle ilgili çalışmalar aktarılıp ülkemiz demiryolundaki uygulanış şekilleri ile ilgili bilgiler anlatılmıştır. Gerek açık hat güzergâhlarında, gerek hemzemin geçitlerde diğer hareketlilerle demiryolu araçları arasındaki güvenlik kriterlerinin mevcut durumu ile son 20 yıla ait verileri

incelenip bunlara dayalı değerlendirmeler yapılarak sonuçlar çıkarılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

TCDD APK Dairesi başkanlığı tarafından yayımlanan TCDD İstatistik yıllıklarından [12,13,14,15] son 20 yıla ait veriler toplanarak, istatistiksel olarak değerlendirilmiş bazı sonuçlar çıkarılmıştır. Bu kapsamda değerlendirilen veriler ilgili resmi kurumlardan alınan dokümanlar, ilgili yönetmelik ve standartlar ile internet ortamından elde edilen bilgiler kullanılarak elde edilmiştir.

Demiryolu ulaşımında, açık hat güzergâhlarında ve özellikle hemzemin geçitlerde diğer hareketlilerle demiryolu araçları arasındaki güvenlik kriterlerinin iyileştirilmesi ana problem olmuştur. Hemzemin geçitler iki farklı ulaşım hattının kesişme noktası olup hassas noktalar. Dolayısıyla buralarla ilgili her türlü veri saklanmaktadır. Hemzemin geçitlerle ilgili hemzemin geçit sicil fişleri oluşturularak geçitlerin temel özellikleri, koruma ve kaplama cinsleri, yeri, hangi hat kesiminde olduğu, standartlara uyup uymadığı ve geçitlerle ilgili görseller bu fişlere işlenmektedir. Yapılan her değişiklik sonrası bu fişler güncellenerek saklanmaktadır. Demiryolu altyapı işletmecisi olan TCDD hemzemin geçitlerle ilgili genel bir çalışma başlatmış 2002 yılından sonra mümkün olduğunca hemzemin geçit sayılarının düşürülmesi için yatırımlar yapılmıştır. Bu konuda oldukça ilerleme sağlanmıştır. Geçitlerde meydana gelen kaza ve olaylardan doğan maliyetler incelendiğinde, geçit modernize maliyetlerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Yapılan modernizasyonlarla trenlerin fazla beklemesi, tamir maliyetleri, karayolu araçlarının zarar görmesi ve en önemlisi de can kayıplarının yaşanmasının önüne geçilmektedir.

Tablo 1 de verilen yıllara göre Türkiye'deki hemzemin geçit sayıları değişimi incelenirse, 2002 ile 2019 yılları arasında hemzemin geçit sayılarında % 42 lik bir azalma olmuştur. Bu azalış demiryolu altyapı işletmecisinin bu işe verdiği önemi göstermektedir. Bu azalmanın daha da artması kazalardaki azalmayı da beraberinde getirecektir.

Kapatılan hemzemin geçitlerin yerine ya alt/üst geçit yapılmış ya da geçit tamamen ortadan kaldırılmıştır. Geçidin tamamen kapatılması, ilgili yönetmelikte belirtildiği üzere birbirine yakın ya da fiziki şartları sağlamayan hemzemin geçitlerdir. Hemzemin geçitlerin alt/üst geçide dönüştürülmesinde, öncelik olarak mevcut geçitlerle ilgili aşağıdaki incelemelerin çok etraflı bir şekilde yapılması gereklidir.

- Hemzemin geçidin kaza geçmişine ilişkin veriler hangi yöndedir?
- Geçmişe yönelik karayolu ve demiryolu trafiği verilerinden hareketle, gelecek için öngörülerde bulunulduğunda elde edilen veriler hangi yöndedir?
- Hemzemin geçidin konumlandırıldığı mülkün özellikleri nelerdir?
- Acil durum yolları mevcut mudur?
- Okul taşıtları için ayrı bir yol ayrılmış mıdır?

- Mevcut uyarı aygıtları hangi türdendir?
- İyileştirme çalışmalarının uygulanabilirliği var mıdır?
- Hemzemin geçide kaplama yapılmasının, konumlandırıldığı çevreye ekonomik bir katkısı olacak mıdır?
- Tehlikeli madde taşıyan ağır vasıtalar için ayrı bir geçiş yolu belirlenmiş midir? [16].

Bu sayılan faktörler denetlenirken geçit yerinde yapılacak gözlemler, yerinde yapılan anketler, araç sayımları, yaya sayımlarıyla analizler yapılarak geçitin türüne, yapısına karar verilmelidir. Doğal olarak bu yapılan iyileştirmelerin tüm güzergah boyunca yapılması hem sürüş hızını artıracak hem de geçitleri kullananların güvenliğini daha fazla sağlayacaktır. Bunun yanında yapılan geçitlerin ve sağlanan güvenlik önlemlerinin denetlenerek kullanımının kontrolü son derece önemlidir.

Tablo 1. Yıllara göre Türkiye’de hemzemin geçit sayıları [12,13,14,15]

Yıl	Hemzemin Geçit Sayısı
2002	4810
2003	4520
2004	4280
2005	4078
2006	4015
2007	3850
2008	3854
2009	3555
2010	3476
2011	3418
2012	3351
2013	3314
2014	3110
2015	3110
2016	3010
2017	3010
2018	2909
2019	2788

Hemzemin geçitlerdeki azalma hem demiryolu hem de ilgili karayolu güvenliğine katkı sağladığı gibi, azalan geçitlerin modernize edilmesine de olanak sağlamaktadır. Gelişen teknolojiye bağlı olarak dünyadaki örneklerin incelenerek gerek koruma sistemleri olarak, gerek kaplama cinsine bağlı olarak ülkemizdeki geçitlerin modernize edilmesi de yakından takip edilmektedir.

Sinyalizasyon sistemlerindeki gelişmeler, birbiriyle entegre çalışan hemzemin geçit koruma sistemlerinin de gelişmesine neden olmuştur. İnsan hayatına verilen önemin artması, kaza sonrası bekleme ve kaza maliyetlerinin yüksek olması geçitlerdeki koruma sistemlerinin geliştirilmesine ve modernizasyonuna sebep olmuştur.

Tablo 2. 2004 sonu itibari ile TCDD bünyesinde koruma şekillerine göre hemzemin geçit sayıları [12]

Tipi	Bölgeler							Toplam
	1	2	3	4	5	6	7	
Bekçili Bariyerli (I)	13	28	109	30	5	41	32	258
Otomatik Bariyerli (II)	52	17	10	18	13	36	14	160
Kontrollü Hemzemin Geçit (I+II)	65	45	119	48	18	77	46	418
KontROLSÜZ (Serbest) Hemzemin Geçit	183	522	720	612	381	480	964	3862
Toplam	248	567	839	660	399	557	1010	4280

Tablo 2 de TCDD 2004 istatistik yılığında alınan verilere göre ülkemizde bulunan mevcut hemzemin geçitlere ait koruma sistemleri sayıları verilmiştir. Tablo incelendiğinde mevcut 4280 adet hemzemin geçidin yalnızca 418 adedi otomatik veya bekçili bariyer korumalı, 3862 adedi ise korumasız serbest hemzemin geçit olduğu görülmektedir. Korumalı hemzemin geçitlerin tüm geçit sayısına göre sadece % 10 oranında olduğu görülmektedir.

2004 yılından 2019 yılına gelindiğinde geçit sayılarında azalma olduğu gibi geçit koruma sistemlerindeki modernizasyon çalışmalarının farkı Tablo 3 de görülmektedir. 2004 yılında 418 olan korumalı hemzemin geçit sayısı 2019 yılında 1127 ye çıkmıştır. Asıl önemli karşılaştırma ise 2019 yılına gelindiğinde korumalı geçitlerin toplam geçitlere oranının % 40 a çıkmasıdır.

Hemzemin geçitler modernize edilirken işin maliyet boyutu da göz önüne alınmaktadır. Bu sebeple bütün geçitlerin koruma sistemlerinin modernize edilmesi beklenemez. Bunun için belirlenmiş kıstas hemzemin geçitlerin seyir momentleridir. Koruma sistemlerinde olduğu gibi hemzemin geçitlerde yapılan modernizasyon çalışmalarında geçidin fiziki şartlarının iyileştirilmesi de yatırımlardan nasibini almış ve geçitlerin kaplama iyileştirilmeleri de yıllara göre yapılagelmiştir. Şu ana kadar yapılan ve denenen kaplama çeşitlerinden en iyi performansı kauçuk kaplama vermiş ve buna bağlı olarak kauçuk kaplama yapılması yaygınlaşmıştır. Kauçuk kompozit kaplama 2013 yılından itibaren uygulanmaya başlanmış ve şu ana kadar en verimli kaplama şekli olmuştur.

Tablo 4’te TCDD 2004 istatistik yılığında alınan verilere göre Türkiye’de 2004 ve 2019 yıllarında uygulanan geçit kaplama uygulamalarının sayıları verilmiştir. 2019 yılı uygulamalarına bakıldığında kauçuk kaplama uygulamasının oldukça arttığı görülmektedir.

Tablo 3. 2019 sonu itibari ile TCDD bünyesinde koruma şekillerine göre hemzemin geçit sayıları [15]

Tipi	Bölgeler							Toplam
	1	2	3	4	5	6	7	
Bekçili Bariyerli (I)	6	21	100	6	4	50	18	205
Otomatik Bariyerli (II)	93	180	183	199	83	102	82	922
Kontrollü Hemzemin Geçit (I+II)	99	201	283	205	87	152	100	1127
KontROLSÜZ (Serbest) Hemzemin Geçit	25	176	197	200	276	214	573	1661
Toplam	124	377	480	405	363	366	673	2788

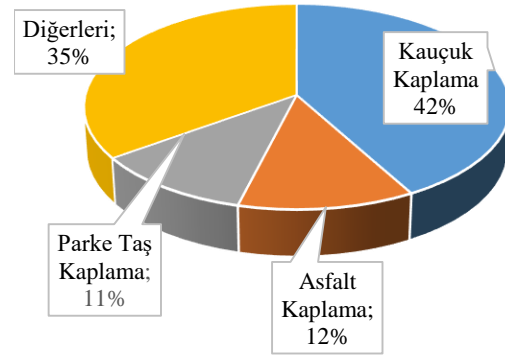
Tablo 4. 2004 Sonu itibari ile TCDD bünyesinde kaplama şekillerine göre hemzemin geçit sayıları [12]

Tipi	Bölgeler							Toplam
	1	2	3	4	5	6	7	
Lastik Kaplama	-	1	-	-	-	-	1	2
Asfalt Kaplama	30	38	215	57	9	52	102	503
Parke Taş Kaplama	2	6	31	8	-	84	6	137
Çelik Kaplama	-	26	-	-	-	-	-	26
Beton Kaplama	-	-	9	1	-	3	2	15
Diğerleri (Ahşap-doğal taş-stabilize)	216	496	584	594	390	418	899	3597
Toplam	248	567	839	660	399	557	1010	4280

2004 yılında en kullanışlı kaplama çeşidi olarak asfalt ve parke taş kaplama olduğu halde bu iki kaplama çeşidinin toplama oranı % 15 olarak gözükmemektedir. 4280 adet geçidin 683 adedi (%16 sı) standartlara uygun kaplama çeşidi olduğu geri kalan 3597 adet (%84) geçidin ise standart dışı kaplama olduğu görülmektedir.

Tablo 5. 2019 sonu itibari ile TCDD bünyesinde kaplama şekillerine göre hemzemin geçit sayıları [15]

Tipi	Bölgeler							Toplam
	1	2	3	4	5	6	7	
Kauçuk Kompozit Kaplama	116	190	240	152	89	222	159	1168
Asfalt Kaplama	8	22	65	123	51	30	38	337
Parke Taş Kaplama	-	-	134	13	20	57	86	310
Diğerleri (Ahşap-doğal taş-stabilize)	-	165	41	117	203	57	390	973
Toplam	124	377	480	405	363	366	673	2788



Şekil 1. Kaplama şekillerine göre 2019 yılı geçit oranları [15]

Şekil 1 de 2019 yılı verilerine göre 2788 adet geçidin 973 adedi (% 35) standart dışı iken, 1815 adedi (% 65) standart kaplamadır. Bu standart kaplama çeşitleri içinde ise en kullanışlı olan kauçuk kaplama oranı % 42 dir, halen modernize edilen hemzemin geçitlerin kaplanması da kauçuk kaplamaya dönüştürülmektedir.

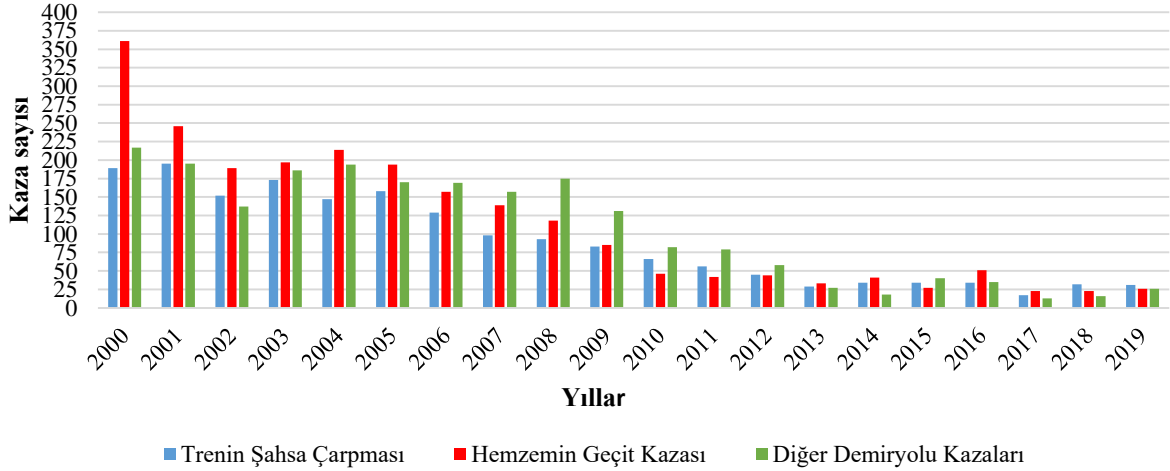
3 Bulgular ve tartışma

TCDD işletmesi 2017 yılına kadar altyapı ve tren işletmeciliğini bir arada yapan, raylı sistem işletmeciliğini tekeline bulunduran bir kuruluş iken 2016 yılında çıkarılan demiryollarının serbestleştirilmesi ile ilgili kanun ile tren işletmeciliği ile altyapı işletmeciliği olarak ikiye ayrılmıştır. Bununla birlikte özel teşebbüsün tren işletmeciliğinin de önü açılmıştır. Yatırımcı ve hizmet amacı güden kuruluş olarak demiryolu altyapı işletmecisi (DAİ), tasarrufundaki

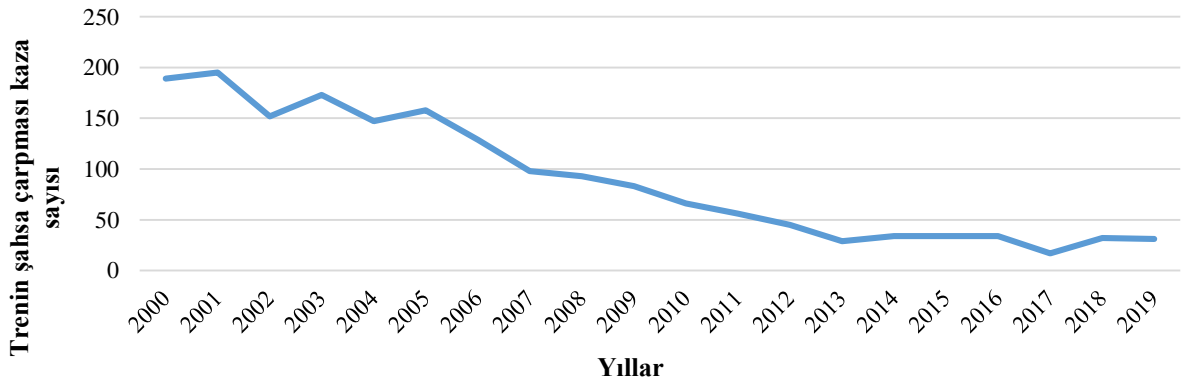
demiryolu altyapısını güvenli bir şekilde işletmek ve demiryolu tren işletmecilerinin hizmetine sunmak hususunda yetkilendirilmiş kamu tüzel kişileri ve şirketleri olarak tanımlanmıştır. Demiryolu altyapı işletmecisinin insiyatifindeki demiryolu ağı üzerinde tren işletmeciliği yapan Demiryolu Tren İşletmecisi (DTİ) ise, ulusal demiryolu altyapı ağı üzerinde yük ve/veya yolcu taşımacılığı yapmak üzere yetkilendirilmiş kamu tüzel kişileri ve şirketleri olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla 2017 yılından itibaren demiryolu altyapı işletmecisi sadece yeni demiryolu ağı kurmak, mevcut demiryolu ağını modernize edip bakım ve onarım faaliyetlerini yerine getirmek üzere görevlendirilmiştir. Bu durum ise mevcut altyapı işletmeciliğinde uzmanlaşmaya yönelmeyi sağlamıştır.

TCDD işletmesinin esas amaçlarından biri emniyetli taşımacılık misyonudur. Emniyetin daha üst sınırlara çıkarılması için geçmişe yönelik kaza ve olayların istatistikî verilerinin oluşturularak, bu veriler ışığında açıkların tespit edilmesi ve buna göre tedbir alınması ve yatırım yapılması amaçlanmaktadır. Bunun için 2011 yılında kurum içinde Emniyet Yönetim Sistemi birimi (EYS) kurulmuştur. Bu birim yaşanan kaza ve olayların istatistiklerini tutmak, kaza ve olayların kök nedenlerini araştırıp çözüm önerileri sunmak üzere teşkilatlandırılmıştır.

Tablo 6 da TCDD istatistik yıllıkları verilerinden hazırlanan hemzemin geçit ve açık hat şahsa çarpma kazaları sayıları verilmiştir. Şekil 3 de verilen grafik incelenirse Türkiye’de işletilen demiryollarında 2000–2019 yılları arasında yaşanan kazalarda büyük bir düşüşün yaşandığı görülmektedir. 2000 yılında 767 olan demiryolu kaza sayısı 2017 yılında 53’e kadar düşmüş olsa da 2019 yılında 83 adet olarak kayıtlara geçmiştir. Bu sayılardan da anlaşılacağı üzere ülkemizde toplam demiryolu kazaları 2000 yılına göre 2019 yılında % 89 azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde trenin şahsa çarpması olarak nitelendirilen kaza sayısı da 189 dan 31’e düşerek % 84 lük bir azalma ve hemzemin geçit kaza sayısı da 361 den 26 gibi çok düşük rakamlara düşerek % 93 gibi bir azalmanın olduğu görülmektedir. Bu durumun personelin hizmet içi eğitimine verilen değer, sinyalizasyon sistemleri ile otomasyona geçilmesinden kaynaklı insan hatalarının en aza indirgenmesi gibi nedenlerin sonucu olarak değerlendirilebilir. Trenin şahsa çarpması olarak nitelendirilen kaza türleri içine istasyon içinde yolcu trenlerine inme binmelerde yaşanan kazalar, intihar vakaları ve açık hatlarda yaşanan tren-şahıs kazaları olarak açıklanmaktadır.



Şekil 2. 2000-2019 arası TCDD kaza sayısı grafiği [12,13,14,15]



Şekil 3. 2000-2019 arası trenin şahsa çarpması kaza grafiği [12,13,14,15]

Tablo 6. Yıllara göre Türkiye’ de meydana gelen tren kazası sayıları ve bu kazalara bağlı ölü sayıları [12,13,14,15]

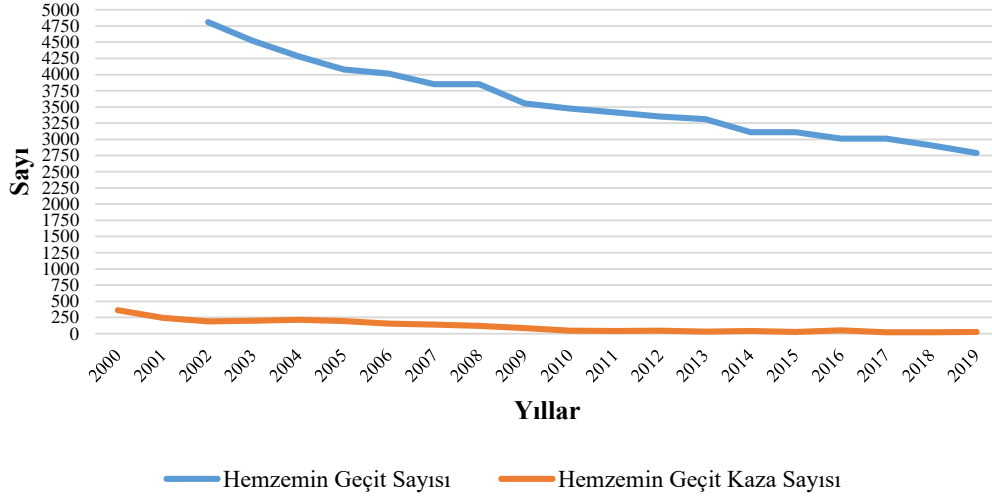
Yıllar	Kaza Çeşitleri				Ölü Sayısı			
	Trenin Şahsa Çarpması	Hemzemin Geçit Kazası	Diğer Demiryolu Kazaları	Toplam	Trenin Şahsa Çarpması	Hemzemin Geçit Kazası	Diğer Demiryolu Kazaları	Toplam
2000	189	361	217	767	112	60	13	185
2001	195	246	195	636	105	49	11	165
2002	152	189	137	478	77	43	9	129
2003	173	197	186	556	99	54	9	162
2004	147	214	194	555	91	77	50	218
2005	158	194	170	522	100	43	10	153
2006	129	157	169	455	67	28	6	101
2007	98	139	157	394	63	43	2	108
2008	93	118	175	386	64	37	10	111
2009	83	85	131	299	43	38	8	89
2010	66	46	82	194	39	25	5	69
2011	56	42	79	177	32	36	3	71
2012	45	44	58	147	27	23	5	55
2013	29	33	27	89	20	23	2	45
2014	34	41	18	93	21	43	1	65
2015	34	27	40	101	26	23	1	50
2016	34	51	35	120	22	58	-	80
2017	17	23	13	53	12	21	8	41
2018	32	23	16	71	22	15	39	76
2019	31	26	26	83	25	24	5	54
Toplam	1795	2256	2125	6176	1067	763	197	2027

Şekil 3 e göre trenin şahsa çarpması olarak nitelendirilen kaza sayılarında da büyük bir azalış olduğu görülmektedir. Kaza kök sebeplerine göre intihar olaylarını çıkarırsak çarpma vakalarının düşüş sebeplerini de özellikle de kent içi geçişlerde yapılan ihata uygulamaları, buna bağlı yapılan alt/üst geçitler ve bilgilendirme ve demiryolu kültürünün yaygınlaştırılması olarak sıralayabiliriz.

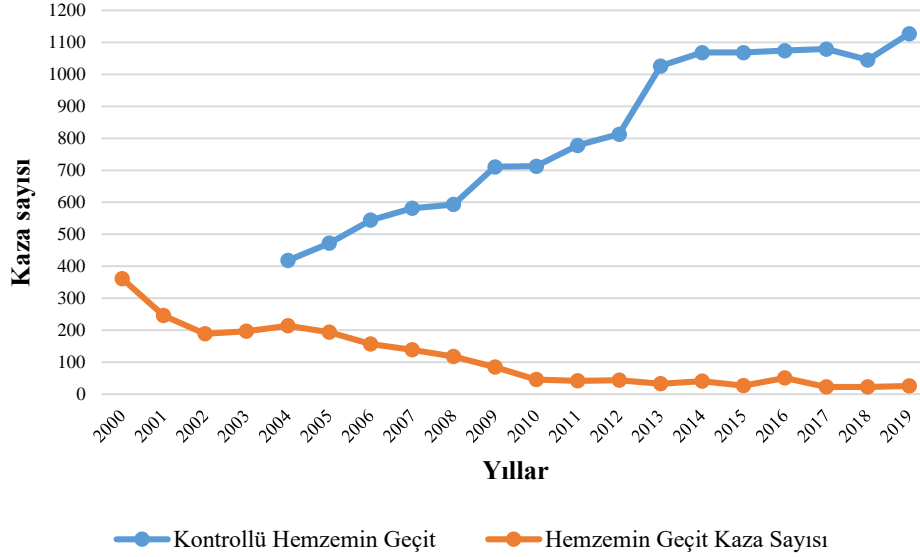
Şekil 4’de Türkiye’de bulunan hemzemin geçit sayısı ile hemzemin geçit kaza sayıları karşılaştırması yapılmış olup, hemzemin geçit sayısındaki azalma kaza sayılarında da azalmaya sebep olmuştur. 2000 ile 2019 yılları arasında

hemzemin geçit sayılarında % 42 lik bir azalma görülürken hemzemin geçit kazalarında % 93 lük bir azalma olmuştur. Aynı şekilde hemzemin geçitlerin kontrollü hale getirilmesi de kaza sayılarında düşüşe sebep olmuştur.

Şekil 5 da kontrollü hemzemin geçit ile kaza sayıları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Geçitlerin kontrollü hale getirilmesi kaza oranlarında düşüşe sebep olduğu görülmektedir. 2004 yılı ile 2019 arasında kontrollü hemzemin geçit sayısında % 170 lik bir artış olurken bu artışa ters oranda aynı yıllar arasında kaza sayılarında % 88 lik bir azalma olmuştur.



Şekil 4. Hemzemin geçit- kaza sayısı karşılaştırma grafiği [12,13,14,15]



Şekil 5. Kontrollü hemzemin geçit- kaza sayısı oranı [12,13,14,15]

4 Sonuçlar

Hemzemin geçitler noktasal alanlar olduğundan, emniyet ve güvenlik çalışması yapılabilen tekil olarak korunabilen elemanlar olduğu halde, açık hat güzergahları gerek yayılımı gereği, gerek geçtiği alanların niteliği gereği, gerekse tam koruyucu sistemlerin geliştirilmemiş olması sebeplerinden emniyet ve güvenlik açıklarının meydana geldiği noktalar. Demiryolu güzergahlarında tren-diğer canlı etkileşimi ile oluşabilecek güvenlik açıklarının önüne geçebilmek çok zor bir durumdur. Bu durumu asgariye indirmek için yalnızca yüksek hızlı tren güzergahlarında uygulaması yapılan hattı ihata alma işi, insanlar üzerinde etkili olsa da diğer yabani hayvanlar açısından kısmi koruma sağlamaktadır.

Güzergah üzerinde güvenliği sağlayıcı sistemler geliştirilene kadar trenlerin kendi güvenliğini kendilerinin sağlaması gereklidir. Ülkemizde ve dünyada son yıllarda

demiryolu taşımacılığına verilen önemin artmasıyla güzergah üzerinde seyrüseferi olumsuz yönde etkileyebilecek hareketleri önlemek için yapılan çalışmalar farklı konseptleri içermektedir. Bunlar içinde akıllı titreşim algılayıcı sistemler ile sese duyarlı güvenlik seçenekleri üzerinde çalışılmaktadır.

Tablo 6 da elde edilen sonuçlar incelendiğinde; 2000 yılı verilerine göre hesaplanan oranlara göre, tüm demiryolu kazalarının % 47 sini hemzemin geçit kazaları oluşturmaktadır, bu oran neredeyse tüm kazaların yarısına yakını oluşturmaktadır. Böyle bir durumda hemzemin geçitlerin mümkünse kapatılması, kapatılıp yerine alt/üst geçit yapılması ya da en iyi şekilde modernize edilmesi kaçınılmaz bir durum olarak görünmektedir. Açık hatta ya da istasyon içinde demiryolu üzerinde yaşanan 3. şahıslarla ilgili kazaları oluşturan trenin şahsa çarpması kazaları ise % 25 olarak görülmektedir. Modernize edilmemiş,

iyileştirilmemiş ve tedbir alınmamış trafik altında hemzemin geçit ve trenin şahsa çarpması kazaları ülkemiz demiryolu kazalarının % 72 sini oluşturmaktaydı. Yıllara göre verilere baktığımızda oranlar her ne kadar birbirine yakın olsa da kaza sayılarını göz önünde bulundurduğumuz da hem hemzemin geçit kazalarında hem de trenin şahsa çarpması kazalarında büyük bir düşüş olduğunu görmekteyiz. Örneğin 2019 yılı verileri incelendiğinde tüm demiryolu kazaları içinde hemzemin geçit ve trenin şahsa çarpması kazalarının oranlarındaki düşüş açık olarak görülmektedir.

Makalede ortaya koyulan tablo verileri ve çizilen grafiklerden de anlaşılacağı üzere, hemzemin geçit sayılarının azalması ya da alt/üst geçitlere çevrilmesi, geçitlerin modernize edilip bariyerli hale getirilmesi ve mümkün olduğunca yapılmaya çalışılan kent içi demiryolu geçişlerinin ihata altına alınması kazaların dolayısıyla can kayıplarının ve maddi kayıpların azalmasına yol açtığı açık olarak görülmektedir. Ancak alınan tedbirler geçit kazalarını azaltmış ama tamamen bitirememiştir. Literatüre göre geçit kazalarını sıfır yapmanın tek yolu, hemzemin geçit sayısını sıfır yapmakla mümkün olacaktır. Ama bütün teknolojik otomasyon sistemlerinin geliştirilmesinin yanında insanların da demiryolu ve hemzemin geçitler hakkında bilinçlendirilmesi ve donanımlı hale getirilmesi güvenliği daha da üst seviyeye çıkaracaktır.

Açık hatlarda alınabilecek önlemleri sıralayacak olursak: Tarımsal hareketlerin bulunduğu alanlarda hayvan geçişleri için sanat yapılarına önem verilmelidir. Demiryolu kültürünün yaygınlaştırılması gerekmekte olup hat boyunca diğer canlı hareketlerinin olabileceği kısımlarda işaret levhaları artırılmalıdır. Kent içi geçişlerde her ne kadar koruma sistemleri olsa da bu koruma sistemlerinin nüfus potansiyeline göre değil her yerleşim bölgesine yapılması daha uygun olacaktır. Alt/üst geçitlerin sayılarının artırılması yerinde olacaktır. Yapılan alt/üst geçitlerin kullanımının ergonomik olmasına, kullanılmasının kolay olmasına dikkat edilmesi gerekir. Yapılan kent içi ihata sistemlerinin çalışması sürekli kontrol edilmeli ve kaçak geçişlere anında müdahale edilmesi olası kazaları önlemede faydalı olacaktır. Farklı sanat yapılarının bulunduğu hat kesimlerinde (tünel köprü viyadük) giriş çıkış portallarına dikkat çekici uyarı levhalarının yanına sesli ve ışıklı uyarılarının da konulması emniyeti artırıcı yönde olacaktır. Mevcut yüksek hızlı tren hatlarında ihata uygulaması hat boyunca yapılmakta olup, takibi ve korunması da düzenli olarak yapılmaktadır. Yerel yönetimler ve kolluk kuvvetlerinin desteklemesi de güvenlik seviyesini yükseltmektedir. Konvansiyonel hatlarda şehir içi geçişlerde yapılmış koruma ihatalarının bir şekilde delinerek izinsiz geçişlerin yapılması durumunda uygulanacak cezalar caydırıcı olmalıdır. Elektrifikasyonlu bölgelerde özellikle üst geçit ve köprülerde anti Vandalizm çit uygulaması aksatılmamalı ve yüksek gerilim levhaları ile desteklenmelidir. Açık hatlarda alınmış güvenlik önlemleri yeterli gibi görünse de periyodik bir şekilde kontrol edilmesi zorunludur. Alınan güvenlik önlemlerine, yapılan geçitlere zarar vererek sabote edenlere caydırıcı cezalar verilmelidir. Her yerde olmasa da bir çok şehir içi geçişlerde ihata

uygulaması ile güvenlik koridoru oluşturulmalıdır. Dikkat çekici işaret levhalarının sayısı artırılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] S. Tamçelik, Osmanlı dönemi demiryollarının tarihi gelişimi içerisinde siyasi ve iktisadi sosyal etkileri. Erdem, 484-488, 2000.
- [2] TCDD Genel Bilgiler, <http://www.tcdd.gov.tr>, 2022.
- [3] T.C. Resmi Gazete, Demiryolu hemzemin geçitlerinde alınacak tedbirler ve uygulama esasları hakkında yönetmelik, 28696 sayılı Resmi Gazete, Ankara, 2013.
- [4] Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD), TCDD Emniyet Yönetim Sistemi El Kitabı. TCDD Yayınları, Ankara, 2017.
- [5] T.C. Resmi Gazete, Demiryolu Emniyet Yönetmeliği, 29537 sayılı Resmi Gazete, T.C. Resmi Gazete Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, Ankara, 2015.
- [6] M. Kozak, Hemzemin geçitlerdeki kaplama çeşitleri ve güvenliğe etkisinin araştırılması. SDÜ Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 2(1). 1-11, 2012.
- [7] TS-13643, Demiryolu Uygulamaları-Hatlar-Demiryolu Hatlarının Altından Üstünden ve Paralel Geçişler İçin Kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [8] G. Bayazıt, Demiryolu hemzemin geçitlerinde emniyet değerlendirmesi: Türkiye için örnek bir model oluşturma. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [9] M. Iıcalı, Demiryollarında ihata uygulaması ve dünyadan örneklerin değerlendirilmesi raporu. İstanbul, 2016.
- [10] K. Atlan, Uygulanmış Örnekleriyle Demiryolu Sinyalizasyon Sistemleri, Dilek Ofset Matbaacılık Yayınevi, Sivas, 2016.
- [11] H. Güler, Demiryollarında emniyet, Türkiye Mühendislik Haberleri, Ulaştırma, İnşaat Mühendisleri Odası Dergisi, TMH -496-2017/4.
- [12] TCDD İstatistik Yıllığı, 2000-2004, TCDD APK Dairesi Başkanlığı, ISSN 1300-2503, Ankara, 2004.
- [13] TCDD İstatistik Yıllığı, 2005-2009, TCDD APK Dairesi Başkanlığı, ISSN 1300-2503, Ankara, 2009.
- [14] TCDD İstatistik Yıllığı, 2010-2014, TCDD APK Dairesi Başkanlığı, ISSN 1300-2503, Ankara, 2014.
- [15] TCDD İstatistik Yıllığı, 2015-2019, TCDD Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, ISSN 1300-2503, Ankara, 2019.
- [16] Y. Yılmaz, Türkiye'de hemzemin geçitlerde yaşanan tren kazaları ve bu kazaları azaltmak için öneri ve düzenlemeler, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2013.





Effect of column cross section and concrete compressive strength on the resistance of RC columns subjected to axial loads and loads created by creep

Kolon enkesitinin ve beton basınç dayanımının eksenel yüklere ve sünmeden dolayı oluşan yüklere maruz kalan betonarme kolonlarda dayanıma etkisi

Abdulhamit Nakipoğlu¹ , Mohammed Gamal Al-Hagri^{2,*} , Mahmud Sami Döndüren³ 

^{1,2,3} Konya Technical University, Civil Engineering Department, 42130, Konya, Türkiye

Abstract

Reinforced concrete buildings that are not properly designed, constructed, or supervised, might not have the resistance to bear even their own weight. When the effects of deformation in the concrete over time are added to the loads, great damages and even collapses can be seen. In this study, the performance of reinforced concrete buildings under axial loads was investigated. The effect of creep in concrete over time was also evaluated. Creep deformation has been integrated into the analysis with a simple method. A total number of 20 8-storey reinforced concrete frame buildings were modeled via ETABS. In each model, only column dimensions and concrete compressive strengths have been changed. The models were analyzed under the combined effect of axial loads and creep. As a result, the effect of concrete compressive strength and column dimensions on collapse in reinforced concrete buildings under the mentioned effects was examined. The results showed that column dimensions should be much high to prevent collapse when low strength concrete is used in buildings. In addition, a formula that can be used to determine the parameters of concrete quality and column cross-sectional areas required against collapse is proposed for the preliminary design of similar types of buildings.

Keywords: ETABS, Axial loads, Creep, Concrete compressive strength, Columns dimensions

1 Introduction

It is a known fact that Turkey has almost turned into an earthquake laboratory as a result of the numerous earthquakes it has experienced. Naturally, structures in Turkey are designed and built to be earthquake resistant. In fact, it would be more accurate to say that this is what it should be. Because many mistakes are made intentionally or not, during the analysis, design, and construction stages of structures. The causalities of these mistakes exceed those of earthquakes in some cases.

If we clarify the said mistakes; they can be sorted as non-compliance with standards, inappropriate site selections, poor quality and inadequate material selections, lack of supervision and control, etc. Although we try to build our buildings to be earthquake resistant, it is a sad fact that we often encounter some structures that were built with these

Öz

Uygun şekilde tasarlanmayan, inşa edilmeyen veya denetlenmeyen betonarme binalar kendi ağırlığını bile taşıyacak dayanıma sahip olmayabilir. Yüklere, betonda zamanla meydana gelen deformasyon etkileri de eklendiğinde büyük hasarlar hatta çökmeler görülebilmektedir. Bu çalışmada, betonarme binaların eksenel yükler altındaki performansı araştırılmıştır. Betonda zamanla oluşan sünme etkisi de değerlendirilmiştir. Sünme deformasyonu basit bir yöntemle analize entegre edilmiştir. ETABS ile toplam 20 adet 8-katlı betonarme çerçeve bina modellenmiştir. Her bir modelde sadece kolon boyutları ve beton basınç dayanımları değiştirilmiş olup diğer tüm değerler ve ölçüler aynıdır. Modeller, eksenel yüklerin ve sünmenin birleşik etkisi altında analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bahsedilen etkiler altında betonarme binalarda beton basınç dayanımı ve kolon boyutlarının çökmeye etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, binalarda düşük dayanımlı beton kullanıldığında, kolon boyutlarının çökmeyi önlemek için çok yüksek olması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca, benzer tipteki binaların ön tasarımı için çökmeye karşı gerekli olan beton kalitesi ve kolon kesit alanı parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir formül önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: ETABS, Eksenel yükler, Sünme, Beton basınç dayanımı, Kolon boyutları

mistakes have collapsed only with its own weight, even when there is no earthquake effect. Some examples of this situation are the collapsed Zumrut Apartment in Konya, Turkey which took the lives of 92 people in February 2004, the failure of Hicret Apartment in Diyarbakir, Turkey that caused 93 people to die in 1983, the building located in Istanbul, Turkey, which collapsed in February 2007, the 5-storey building in Gaziantep, Turkey, which collapsed in August 2021 (Figure 1). The buildings in the figure contained some of, if not all, the above-mentioned problems. Now, if we see the earthquake as innocent and try to correct our own mistakes, we can prevent the new ones, even if we cannot bring back all the losses we have experienced.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: (mg.alhagri@gmail.com) (M. G. Al-Hagri)

Geliş / Received: 15.03.2022 Kabul / Accepted: 06.09.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1088498

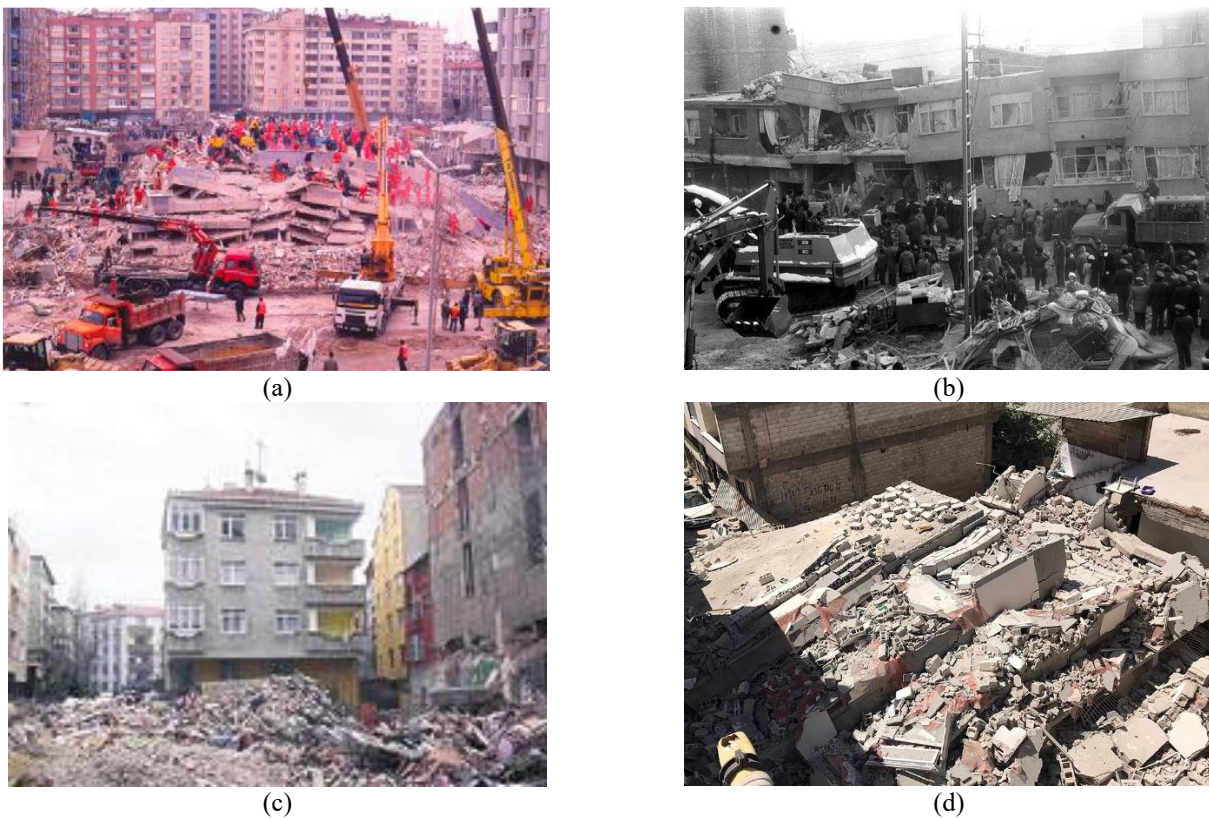


Figure 1. Some examples of buildings collapsed under their own weight (a) Zumrut Apartment, Konya, Turkey [1] (b) Hicret Apartment, Diyarbakir, Turkey [2] (c) A building in Istanbul, Turkey [3] and (d) A building in Gaziantep, Turkey [4]

If we think from a technical point of view, the main effect in the failure of these and similar buildings is the axial loads and the deformations that occur under the influence of these loads [1, 5]. Besides the deformations caused by axial loads, the creep effect that occurs in concrete over time plays a very important role in failure of structures. Many studies have been carried out on axial loads and creep effect in reinforced concrete buildings. Blanc et al. [6] investigated creep deformations in columns in high-rise reinforced concrete buildings. At the end of the study, they proposed a new methodology to calculate creep. Kern et al. [7] examined the effect of creep on the behavior of concrete under static load and cyclic load. The research indicated that cyclic deformations are considerably more than creep strains although they have similar stress levels. Liu et al. [8] analyzed the relationship between the creep strain rate, stress level and creep parameters in concrete under high stress. In the study a damage model for creep effect was proposed to determine the creep parameters. The authors suggest that it can be used to estimate the deformation tendency of surrounding concrete in time after chamber or tunnel excavation. Zou et al. [9] experimentally investigated the effects of creep and shrinkage in reinforced concrete shear walls used in high-rise buildings in their study. The results of the study indicated that the rate of time-dependent strains depends on the element shape. Fang et al. [10] investigated the effects of creep, shrinkage, and temperature on load distribution in slabs in reinforced concrete buildings during construction. The study showed that creep effect, can re-

distribute the load and decrease the maximum load of slab from 3% to 16% for common construction schemes. Elçi and Terzi [11] investigated the effect of loading age of concrete on creep. In the study, it was confirmed that the creep deformation decreased as the loading age increased.

Despite the bad effect of creep, in practice, creep is not properly taken into account due to the complexity of the creep phenomenon and the unclear calculations. Thus, it is very important to deal with this phenomenon with simpler approaches to remove the existing complexity. When talking about creep, the most important two parameters are strength of concrete and cross-sectional area of the load bearing elements. In this study, the effects of concrete quality and column dimensions on the performance of the structure against axial loads and creep are investigated in reinforced concrete frame structures. In the study, the creep effect was examined with a very simple method, staying on the technically safe side. ETABS 19.1.0 structural analysis program was used for the analysis. Twenty different building models were created. The models are completely symmetrical and identical in every aspect, except for concrete compressive strengths and column dimensions. Models are not affected by any lateral loading, but only by axial loads. In the study, the performance of vertical bearing elements under the combined effect of axial load and creep has been investigated. As a result, it has been seen how the concrete quality and column dimensions affect the performance of the structures under these effects, and a

simplified formula has been proposed for the design of similar buildings.

2 Analytical method

In the study, 20 models whose bearing system consists of reinforced concrete frames were examined. Models were prepared in ETABS structural analysis program and analyzed under vertical loads. First of all, internal forces of the ground story columns of the models were obtained. At the same time, the creep deformations in the ground story columns under these loads were determined. Creep deformations were converted to equivalent axial load values using the simplified linear elastic method. Equivalent axial loads from creep were added to the normal force values obtained as a result of the analysis, and the total axial loads in the columns were determined. The axial load carrying capacities of the columns were also calculated. The resulting axial load values were compared with the determined load carrying capacities, and the performances of the models in this respect were evaluated.

2.1 Details of the models

Models have 5 openings in both the x and y directions. All openings are 4 meters. The models have 8 stories, and the heights are 3.5m on all stories. Concrete compressive strength in the models is a variable parameter and ranges from 8MPa to 55MPa. All the rebars used are made of S420 steel with a yield strength of 420MPa. The modulus of elasticity of the rebar was taken as 200GPa. Beams are 25cm wide and 30cm deep. A total of $4\phi 12$ reinforcement was used in the beams, $2\phi 12$ at the bottom and $2\phi 12$ at the top. The columns are formed in square cross-sections and the section dimensions are variable parameters and vary between 30cm and 75cm. In all the models, longitudinal reinforcement ratio is 0.01 in the columns, which represents the minimum requirements of Turkish Building Earthquake Code TBEC [12]. The floors are in the form of slabs and are 12 cm thick. The infill walls were considered as a load on the beams. Plan and 3D views of the models are shown in Figure 2.

The study was started based on the minimum column dimensions according to TBEC [12], i.e., 30x30cm columns were used in the first model. As a result of the analyzes done, the minimum concrete compressive strength required to prevent collapse was determined as approximately 55MPa and Model-1 was created with these values. Then, the compressive strengths were gradually reduced by 5MPa in each model and the minimum column dimensions required in current situations were determined.

2.2 Load cases

In each model, 4.5kN/m^2 dead load (G) and 2kN/m^2 live load (Q) were loaded on the slabs in addition to the self-weights of the elements which comply with TS498 [13]. A wall load of 5kN/m was applied to the beams. Top story beams were not loaded. There is no lateral load in the models such as earthquake, wind etc. It should be noted that while determining the internal forces for the models, the load combination used for the design of new buildings (i.e. $1.4G+1.6Q$) was not considered. Since this study focuses on

existing structures, G+Q load combination was taken into consideration.

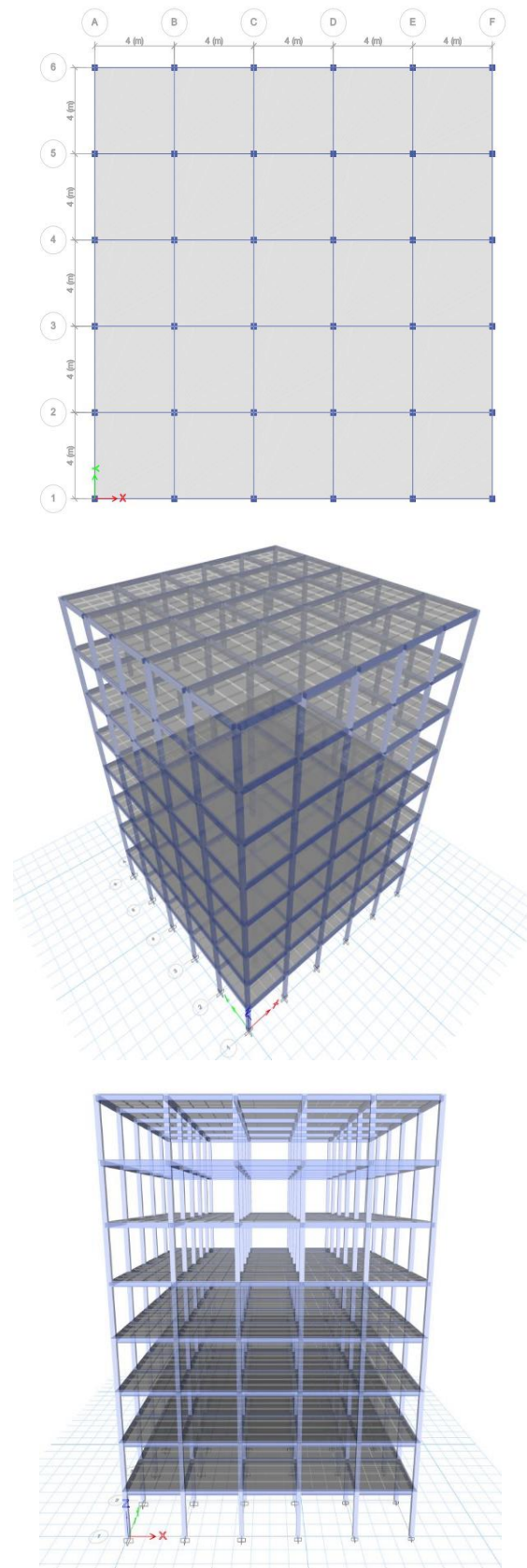


Figure 2. Plan and 3D views of the models

2.3 Calculation method

2.3.1 Calculation of creep

Creep deformation, which is expected to occur after 2-3 years in the ground story columns of the models, was calculated using Equation 1 according to TS500 [14].

$$\varepsilon_{ce} = \left(\frac{\sigma_{c0}}{E_c} \right) \times \phi_{ce} \quad (1)$$

In the equation, ε_{ce} is the creep strain, σ_{c0} is the nominal stress in the concrete when a permanent load is applied, and ϕ_{ce} is the creep coefficient. While calculating the nominal stresses, only the dead load effect N_G is taken into account among the internal forces occurred in the columns. The creep coefficient depends on the age of the concrete at the time of loading, the relative humidity of the environment and the equivalent thickness of the elements. The creep coefficient was taken from a table available in TS500 [14].

In the models, the age of the concrete at the time of loading is taken as 200 days. The environment to which the ground story columns are exposed to is dry, and the relative humidity is 50%. Equivalent thicknesses in the elements were determined according to Equation 2 as in TS500 [14].

$$L_e = \frac{2A_c}{u} \quad (2)$$

Here, L_e is the equivalent thickness, A_c is the cross-sectional area, and u is the cross-sectional circumference. Equivalent thicknesses vary according to the column dimensions in the models.

The elasticity modulus in concrete was determined using Equation 3 according to TS500 [14].

$$E_c = 3250\sqrt{f_c} + 14000 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

Here, E_c is the modulus of elasticity of the concrete and f_c is the characteristic concrete compressive strength.

2.3.2 Converting creep deformations to equivalent axial loads

Since simplicity is one of the aims of the study, it is assumed that the elements and materials behave elastically and linearly. This approach has been also adapted in the literature [15]. The creep deformations in the columns were converted into equivalent axial loads according to Equation 4.

$$N_{ce} = \frac{\delta \times \frac{NL}{AE}, \quad \varepsilon_{ce} = \frac{\delta_{ce}}{L}}{(A \times E_c \times \varepsilon_{ce} \times L)} = A \times E_c \times \varepsilon_{ce} \quad (4)$$

In the equation, δ represents the amount of elongation, N axial load, L element height, A cross-sectional area, E modulus of elasticity, and N_{ce} creep deformation converted to equivalent axial load.

2.3.3 Total axial load values in the columns

The total axial load values in the columns were determined by adding the equivalent axial load values obtained from the creep to the internal normal forces. (Equation 5)

$$N_T = N_{G+Q} + N_{ce} \quad (5)$$

Here, N_T represents the total axial load value and N_{G+Q} represents the element axial load value obtained by the G+Q load combination.

2.3.4 Axial load carrying capacities

Since the models are symmetrical in all the directions and are analyzed only under axial loads, when the internal forces were examined, almost no moment occurred in the elements in terms of both bending and torsion. In this case, the capacity calculation was made with Equation 6, considering only the axial load situation.

$$N_{max} = 0.85 \times (A_c - A_{st}) \times f_c + A_{st} \times f_y \quad (6)$$

Here, N_{max} represents the axial load carrying capacity, A_{st} is the reinforcement area, and f_y is the characteristic yield strength of reinforcement.

3 Results

As mentioned before, Model-1 was created using minimum column dimensions according to TBEC [12]. Preliminary analyzes were made for this situation and the minimum concrete compressive strength was determined as 55MPa to prevent collapse under the effect of axial loads and creep. It should be noted that although TS500 [14] doesn't account for concrete compressive strengths higher than 50MPa, at the end of the preliminary analyzes, it was found that 50MPa was not sufficient to resist the combined load created by both axial loads and creep. Consequently, 55MPa concrete compressive strength was considered. Then, in Model-2, the concrete compressive strength was reduced by 5MPa, and this model analyzed starting from the same column dimensions. According to the analysis, it was seen that these dimensions were not sufficient. For this reason, the columns were enlarged by 5cm in both directions. Model 2 was reanalyzed with the new dimensions and the failure situation was examined. Then the same method was followed for all other models. As a result, 20 models were obtained. The concrete compressive strengths and column dimensions of the models are shown in Table 1. In the table, f_c is the concrete compressive strength, b is the column width and h is the column depth. As a result of the analysis, columns with maximum internal forces were determined in all models. The normal force values of these columns are shown in Table 2. Table 3 shows the creep parameters calculated according to Equation 1, 2 and 3, and the equivalent axial load values converted from them according to Equation 4 in the ground story columns under the effect of N_G internal forces. The axial load values specified in the Table 3 were combined according to Equation 5 and the maximum total axial load

Table 1 The concrete compressive strengths and column dimensions of the models

Model number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Concrete compressive strength, f_c (MPa)	55	50	50	45	40	35	35	30	25	25
Column dimensions, $b=h$ (cm×cm)	30×30	30×30	35×35	35×35	35×35	35×35	40×40	40×40	40×40	45×45
Model number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Concrete compressive strength, f_c (MPa)	20	20	16	16	12	12	8	8	8	8
Column dimensions, $b=h$ (cm×cm)	45×45	50×50	50×50	55×55	55×55	60×60	60×60	65×65	70×70	75×75

Table 2 The maximum normal force values of the columns

Model number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N_G (kN)	1425.7	1442.1	1425.7	1442.1	1442.1	1464.3	1442.1	1464.3	1491.3	1464.3
N_{G-Q} (kN)	1684.4	1699.7	1684.4	1699.7	1699.7	1721.3	1699.7	1721.3	1747.9	1721.3
Model number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
N_G (kN)	1522.3	1491.3	1557.1	1522.3	1557.1	1595.5	1595.5	1637.6	1683.1	1732.2
N_{G-Q} (kN)	1778.8	1747.9	1813.5	1778.8	1813.5	1851.9	1851.9	1893.9	1939.4	1988.5

Table 3 Creep parameters and its equivalent normal load

Model number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ_{ce}	1.900	1.785	1.900	1.785	1.785	1.670	1.785	1.670	1.555	1.670
ϵ_{ce} (10^{-4})	7.899	5.682	8.139	5.870	6.081	4.600	6.324	4.806	3.786	5.053
N_{ce} (kN)	2708.9	2574.2	2708.9	2574.2	2574.2	2445.5	2574.2	2445.5	2318.9	2445.5
Model number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ϕ_{ce}	1.440	1.555	1.325	1.440	1.325	1.210	1.210	1.095	0.980	0.865
ϵ_{ce} (10^{-4})	3.073	4.013	2.526	3.248	2.700	2.123	2.312	1.830	1.451	1.149
N_{ce} (kN)	2192.1	2318.9	2063.1	2192.1	2063.1	1930.6	1930.6	1793.1	1649.5	1498.3

Table 4 Maximum total loads and load carrying capacities

Model number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_c (MPa)	55	50	50	45	40	35	35	30	25	25
$b=h$ (cm×cm)	30	30	35	35	35	35	40	40	40	45
N_T (kN)	4393.3	4393.3	4273.9	4273.9	4273.9	4273.9	4166.8	4166.8	4166.8	4066.8
N_{max} (kN)	4437.4	4057.5	5438.8	4920.8	4402.8	3884.8	5000.4	4323.0	3645.6	4548.8
N_T / N_{max}	0.990	1.083	0.786	0.869	0.971	1.100	0.833	0.964	1.143	0.894
Model number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f_c (MPa)	20	20	16	16	12	12	8	8	8	8
$b=h$ (cm×cm)	45	50	50	55	55	60	60	65	70	75
N_T (kN)	4066.8	3970.9	3970.9	3876.6	3876.6	3782.5	3782.5	3687.0	3588.8	3486.8
N_{max} (kN)	3690.7	4498.2	3650.3	4364.3	3337.9	3924.4	2702.5	3127.5	3586.5	4079.5
N_T / N_{max}	1.102	0.883	1.088	0.888	1.161	0.964	1.400	1.179	1.001	0.855

values on the ground story columns of the models were calculated. In addition, axial load carrying capacities were determined by Equation 6. Load/capacity ratios were also determined in the models. All these values are shown in Table 4.

If the N_T / N_{max} ratios given in Table 4 are examined, it is seen that in Models 2, 6, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, collapse will occur under the effect of creep and axial loads. In order to better understand the results given in the table, a graph has been created in Figure 3 based on the column dimensions and the concrete compressive strengths for models 1, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, which can safely bear these effects.

In the graph, the combined effect of concrete compressive strengths and column dimensions, which makes the models bear the effects on them without collapse, is presented. As can be clearly seen from the graph, the effect

of column dimensions on axial load carrying capacity is much higher in models with low concrete strength. In models with high strength, column dimensions do not change the capacity much.

In addition, Equation 7 was determined by using the curve formed in the graph. By means of this equation, the required column dimensions and concrete compressive strength can be determined approximately in order to prevent collapse under the effects of axial loads and creep in similar buildings.

$$b = 185.61 \times (f_c)^{-0.442} \quad (7)$$

In the equation, b is the column size in square columns, and f_c is the concrete compressive strength. As can be seen from the figure, the coefficient of determination (R^2), which

represents the quality of the curve-fitted equation, has a value of 0.9903. According to Gupta et al. [16] and Rahmani et al. [17] when the value of R^2 is more than 0.7, it indicates that the equation can be efficiently used to describe the relationship between the studied parameters.

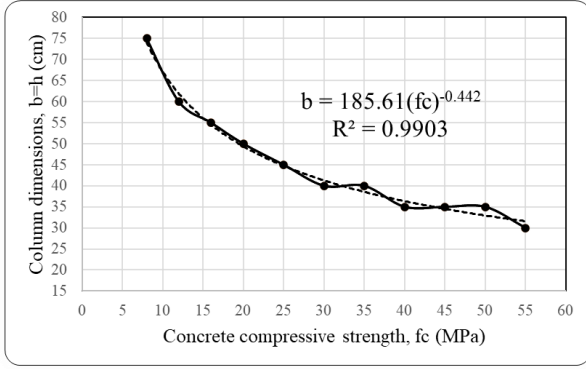


Figure 3 Relationship between the compressive strength and the column dimensions

4 Conclusions

In this study, the performance of reinforced concrete frame buildings under their own weight and extra axial loads was investigated. The creep effect was also taken into account in the analysis. In order to eliminate the existing complexity of the creep effect, a linear and elastic simple method was used in the study. A total of 20 models were created, which have different column dimensions and concrete compressive strengths. The effect of these parameters on the collapse of the structure were investigated.

When the results obtained are examined, it has been seen that the column dimensions must be unreasonably high in order to prevent collapse in structures where low strength concrete is used. On the other hand, in structures with high strength concrete, a little change in the column dimensions is sufficient to prevent collapse.

In case of having low concrete quality, which is one of the most important problems encountered, since the concrete compressive strength of the existing structure cannot be changed, column dimensions of the buildings should be enlarged with various strengthening methods, and the buildings should be made safe against axial loads and creep effects. In this sense, this study will be an example of retrofitting projects for existing buildings. In addition, the formula proposed as a result of the study will be an important source of preliminary information for designers in the design of similar buildings.

On the other hand, although the models having load/capacity ratios lower than 1.0 are accepted as safe in this study, it is thought that, according to Ersoy et al. [18], in structures with these ratios greater than 0.8, failure may occur over time due to the creep effect. For this reason, the authors recommend increasing the column dimensions and concrete compressive strengths suggested in the existing study for similar studies to be carried out in the future, and so reducing the mentioned ratio to below 80% for a safer approach.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 10

References

- [1] M.Y. Kaltakci, M. Kamanli, M. Ozturk, M.H. Arslan, H.H. Korkmaz, Sudden complete collapse of Zumrut apartment building and the causes, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27 (4), 381-390, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.19435509.0000337](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.19435509.0000337).
- [2] Antoloji Diyarbakir, https://twitter.com/ant_diyarbakir/status/1242989421311537152?lang=ru, Accessed 20 October 2021.
- [3] H. Gemici, <https://v3.arkitera.com/h14803-zeytinburnu-enkaz-altinda.html>, Accessed 21 October 2021.
- [4] M.A. Parlak, <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/gaziantep-5-katli-bos-bina-coktu/2320992>, Accessed 21 October 2021.
- [5] M.Y. Kaltakci, M.H. Arslan, H.H. Korkmaz, M. Ozturk, An investigation on failed or damaged reinforced concrete structures under their own-weight in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, 14 (6), 962-969, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.12.005>.
- [6] C.M. Blanc, A.O. Sánchez, I.F. Navarro, Analytical characterisation of axial shortening due to creep of reinforced concrete columns in tall buildings, *Engineering Structures*, 228, 111584, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111584>.
- [7] B. Kern, N. Oneschkow, A.L. Podhajecy, L. Lohaus, S. Anders, M. Haist, Comparative analysis of concrete behaviour under compressive creep and cyclic loading, *International Journal of Fatigue*, 153, 106409, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106409>
- [8] W. Liu, H. Zhou, S. Zhang, S. Jiang, Constitutive model of concrete creep damage considering the deterioration of creep parameters, *Construction and Building Materials*, 308, 125047, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104135>
- [9] D. Zou, T. Liu, J. Teng, C. Du, B. Li, Influence of creep and drying shrinkage of reinforced concrete shear walls on the axial shortening of high-rise buildings, *Construction and Building Materials*, 55, 46-56, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.034>
- [10] D. Fang, H. Xi, X. Wang, C. Zhang, Influences of shrinkage, creep, and temperature on the load distributions in reinforced concrete buildings during construction, *Tsinghua Science and Technology*, 14 (6), 756-764, 2009.
- [11] H. Elçi, M. Terzi, Betonarme yapılar da sünmenin kesit tesirlerine etkisi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7 (1), 43-63, 2005.
- [12] TBEC 2018, Turkish Building Earthquake Code. Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency, Ankara, Turkey, 2018.

- [13] TS498, Turkish Standard, Design Loads for Buildings. Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey, 1997.
- [14] TS500, Turkish Standard, Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures. Turkish Standards Institution, Ankara, Turkey, 2000.
- [15] A. Nakipoglu, A. Unal, M. Kamanli, Damage analysis of Golyazi Apartments building failed under axial loads: A case study in Konya, Turkey, *Structures*, 30, 409-417, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.020>.
- [16] T. Gupta, R.K. Sharma, S. Chaudhary, Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume, *International Journal of Impact Engineering*, 83, 76–87, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.05.002>
- [17] T. Rahmani, B. Kiani, M. Shekarchi, A. Safari, Statistical and experimental analysis on the behavior of fiber reinforced concretes subjected to drop weight test, *Construction and Building Materials*, 37, 360–369, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.068>
- [18] U. Ersoy, G. Ozcebe, and T. Tankut, Reinforced concrete. METU Press, Ankara, 2008.





Derin sinir ağları modeli ile standardize yağış indeksi tahmini

Standard precipitation index estimation with deep neural network model

Levent Latifoğlu^{1,*} 

^{1,*}Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Kayseri Türkiye

Öz

Kuraklık, yaşamı doğrudan etkileyen ve çok çeşitli olumsuz etkileri olan doğal bir afettir. Kuraklığı tahmin etmek üzere farklı kuraklık indeksleri kullanılmaktadır. Bu indekslerden en yaygın olarak kullanılanlardan biri de Standardize Yağış İndeksidir (SYİ). Gerçekleştirilen çalışmada Türkiye'ye ait Rize, Konya ve Şanlıurfa illerinin 3, 6, 9 ve 12 aylık SYİ verileri 1-3 ileri zamanlı olarak tahmin edilmiştir. Tahmin çalışmasını gerçekleştirmek üzere Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları (Long Short Term Memory Networks, LSTM) ve Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek Ağlarından (Bidirectional Long Short Term Memory Networks, biLSTM) oluşan Derin Sinir Ağları modelleri geliştirilmiştir. Tahmin performansını değerlendirmek üzere Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE), Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error, MSE), Korelasyon katsayısı (Correlation Coefficient, R) ve Belirlilik katsayısı (Determination Coefficient, R²) parametreleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar tahmin parametreleri ve saçılma grafikleri ile değerlendirildiğinde biLSTM içeren derin sinir ağları modelinin performansının oldukça iyi olduğu ve 3 ileri zamanlı tahminde bile yüksek korelasyona sahip sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kuraklık, Standardize yağış indeksi, Derin sinir ağları, LSTM, biLSTM

1 Giriş

Kuraklık, toplumların yanı sıra tarımsal ve hidrolojik sistemler üzerinde de önemli etkisi olan, yağış eksikliği ile karakterize edilen karmaşık yapıya sahip ve döngüsel bir olaydır [1, 2]. Gün geçtikçe artarak küresel ve yerel bir sorun haline gelen kuraklık, toprağın bozulmasıyla birlikte çöllerleşmeye, sosyal problemlere, kıtlığa ve yoksullaşmaya neden olmaktadır [3,4]. İklim değişikliği ile ilgili çalışmalarda son yıllarda kuraklığa dikkat çekilmekte olup tarımsal veya çevresel yönetime yardımcı olmak üzere kuraklık riskini analiz ve tahmin etmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Ancak, bu durum, son zamanlarda, yağış miktarı hakkında fikir veren ve nihayetinde kuraklıkları izleme yeteneğini geliştiren çok sayıda modelleme yaklaşımının geliştirilmesiyle mümkün olmaktadır. Kuraklık yönetim ve tahmin tekniklerini geliştirmeyi amaçlayan kuraklık risk analizi, kuraklığın mekânsal değişkenliğine dayanmaktadır ve esas olarak kuraklıkların büyüklüğü, süresi, yoğunluğu ve mekânsal boyutuna odaklanılmaktadır.

Abstract

Drought is a natural disaster that directly affects life and has a wide variety of negative effects. Different drought indices are used to predict drought. One of the most widely used of these indices is the Standardized Precipitation Index (SPI). In this study, the 3, 6, 9 and 12-month SPI data of Rize, Konya and Şanlıurfa provinces of Turkey were estimated 1-3 forward time. Deep Neural Networks models consisting of Long Short Term Memory Networks (LSTM) and Bidirectional Long Short Term Memory Networks (biLSTM) have been developed to perform the prediction study. The Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), Correlation Coefficient, R and Determination Coefficient (R²) parameters were used to evaluate the forecasting performance. When the results obtained are evaluated with the performance parameters and scatter plots, it has been shown that the performance of the deep neural network model with biLSTM is quite good and that high correlation results can be obtained even in 3 forward-time predictions.

Keywords: Drought, Standard precipitation index, Deep neural networks, LSTM, biLSTM

Diğer doğal afetlerden farklı olarak, kuraklıkların oluşma süresi yavaştır [5]. Kuraklıkların sonuçları, kuraklığın başlangıcına, ekosistemler ve hidrolojik sistemler tarafından algılandıkları zamana göre uzun sürelerde ortaya çıkmaktadır. Bu özelliği nedeniyle, kuraklığı başlangıcında uyarabilen bir kuraklık izleme sistemi, kuraklığın en olumsuz etkilerinin önemli bir şekilde azaltulmasına yol açabilecektir.

Günümüzde kuraklığın mekânsal ve zamansal boyutu ile şiddetini belirlemeye yönelik Standart Yağış Buharlaşma İndeksi (Standardized Precipitation Evapotranspiration index, SPEI), Palmer Kuraklık Şiddet İndeksi (Palmer Drought Severity Index, PDSI), Etkili Kuraklık İndeksi (Effective Drought Index, EDI) ve Keşif Kuraklık İndeksi (Reconnaissance Drought Index, RDI) gibi birçok farklı kuraklık indeksi hesaplanmaktadır [6-9]. Ancak McKee ve diğerleri tarafından geliştirilen Standardize Yağış İndeksi (SYİ, Standardized Precipitation Index, SPI), diğerlerine göre birçok avantajı olan etkili bir kuraklık indeksidir [10,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: latifoglu@erciyes.edu.tr (L. Latifoğlu)

Geliş / Received: 18.07.2022 Kabul / Accepted: 28.09.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1145279

11]. SYİ sadece yağış verilerini gerektirmesi nedeniyle hesaplanması diğer indekslerden daha kolaydır. Böylece, akarsu akışı, evapotranspirasyon ve toprak nemi bilgileri gibi diğer parametrelerin kolayca erişilebilir olmayabileceği, verinin az olduğu bölgelerde kuraklık risk analizi ve tahmininde oldukça faydalıdır. SPI, hem zaman hem de mekân açısından karşılaştırılabilir ve birden fazla zaman ölçeği için hesaplanabilmektedir [12,13]. Böylece kuraklıkların süresinin, büyüklüğünün ve yoğunluğunun belirlenmesine olanak sağlayarak çeşitli kuraklık türlerini hidrolojik, tarımsal veya çevresel olarak tanımlamaktadır. Olasılıksal temellere dayanarak hesaplanması kuraklık analizinde önemli yer tutmasına yol açmıştır ve dünyanın birçok bölgesinin kuraklık analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle SYI tahmini kuraklık analizinde önemli olmaktadır.

Herhangi bir hidrolojik olayın tahmini, fiziksel, kavramsal ya da veriye dayalı bir yaklaşım kullanılarak yapılabilmektedir. Ancak veriye dayalı modeller değişken sayısı bakımından daha az bilgi gerektirdikleri ve daha kısa sürelerde geliştirilebildikleri için fiziksel temelli modellere göre bir takım avantajlara sahiptir. Veriye dayalı modellerin geliştirilmesinde Özyinelemeli Hareketli Ortalama (Autoregressive Moving Average, ARMA) modellerin kullanıldığı lineer yaklaşımların yerini son yıllarda Yapay Zeka modellerine dayalı lineer olmayan yaklaşımlar almaktadır [14, 15].

Adamowski ve arkadaşları Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektörleri ve Dalgacık Sinir Ağları kullanarak 3 aylık ve 12 aylık SYİ tahmini üzerine çalışmıştır. Çalışmanın sonucunda Dalgacık Sinir Ağları yaklaşımının tahmin performansını artırdığını göstermiştir [16]. Khan ve arkadaşları, Dalgacık Dönüşümü, Özyinelemeli Entegre Hareketli Ortalama (Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA) ve Yapay Sinir Ağları kullanarak SYİ ve Standart Yıllık Yağış İndeksinin başarıyla tahmin edilebileceğini göstermiştir [16]. Çitakoğlu ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, akarsu akış kuraklık indeksini Dalgacık Modeli ve Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neural-Fuzzy Inference Systems, ANFIS) kullanarak tahmin etmiştir [17]. Literatür çalışmaları incelendiğinde SYİ'nin geçmiş değerlerini kullanarak SYİ ve kuraklık tahmini yapan modellerde YSA, Destek Vektör Makineleri ve Karar Ağaçları içeren makine öğrenimi tekniklerinin kullanıldığı görülmüştür [18].

Ayrıca derin sinir ağları mimarilerinden olan Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları (Long Short Term Memory Networks, LSTM) finans, iklim çalışmaları, çevresel değişkenler gibi farklı çalışma alanları için sıklıkla kullanılmasına rağmen, kuraklık endekslerinin tahminine yönelik çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir [19-21]. Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları (Bidirectional Long Short Term Memory Networks, biLSTM) ile yapılan tahmin çalışmaları incelendiğinde kuraklık tahminine yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada SYİ'nin Derin Sinir Ağları kullanılarak tahmin performansı analiz edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmanın temel katkıları aşağıda maddeler halinde yer almaktadır.

1- Türkiye'de yer alan Rize, Konya ve Şanlıurfa illerine ait 3,6, 9 ve 12 aylık SYİ değerleri tahmin edilmiştir.

2- Tahmin çalışmasında LSTM katmanından oluşan bir derin sinir ağı mimarisi ve karşılaştırma amaçlı biLSTM katmanından oluşan ikinci bir derin sinir ağı mimarisi geliştirilmiştir. SYİ değerlerinin (3, 6, 9 ve 12 aylık) 1 ileri tahmini ile iki modelin performansı karşılaştırılmıştır.

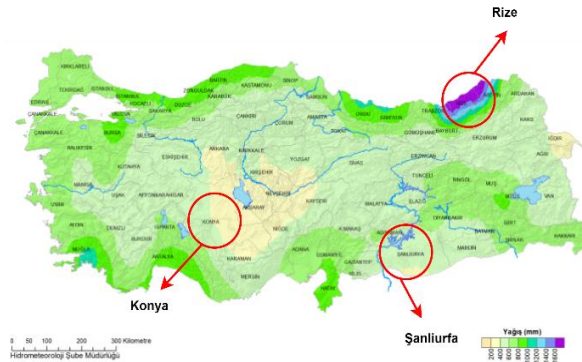
3- Daha sonra biLSTM mimarisi ile SYİ'nin 1-3 ileri tahmini gerçekleştirilmiştir.

Belirtilen amaçlar kapsamında literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamış olup, derin sinir ağları ve SYİ'nin ileri tahmin performansının analizi açısından bu çalışma özgün katkılar içermektedir.

2 Materyal ve metod

2.1 Çalışma alanı

Tahmin çalışmasında Türkiye'nin iç kısımlarında yer alan ve kapalı havza karakteristiğine sahip olan Konya ili, güney doğusunda yer alan Şanlıurfa ili ve kuzey doğusunda yer alan Rize iline ait 1981-2021 yılları arası aylık yağış verileri kullanılmıştır. SYİ'ni elde etmek için kullanılan yağış verileri, NASA'nın POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) adlı çevrimiçi halka açık veri tabanından elde edilmiştir [22]. Bu veri tabanı, 0,5° enlem ve 0,5° boylam çözünürlüğe sahip olma avantajına sahiptir. Rasool Al-Kilani ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada NASA/POWER veri setinin kuraklık tahmini için uygun bir veri seti olduğunu göstermiştir [23].



Şekil 1. Rize, Konya ve Şanlıurfa illerinin yıllık alansal yağış normalleri haritasındaki konumu [24]

Rize ili Türkiye yağış ortalamasının üzerinde yağış almakta olup taşkın olaylarının sıklıkla ortaya çıktığı bir şehirdir.

Konya ilinde yağış şekli çoğunlukla konvektiftir ve Türkiye ortalamasının altında yağış almaktadır. Şanlıurfa ili de Türkiye ortalamasının altında yağış almaktadır.

Rize şehrine ait verilerin en düşük aylık ortalama yağış değeri 0.27 mm/m², en yüksek aylık ortalama yağış değeri 10.90 mm/m²'dir. Konya şehrine ait verilerinin en düşük aylık ortalama yağış değeri 0.0 mm/m², en yüksek aylık ortalama yağış değeri 5.77 mm/m²'dir. Şanlıurfa şehrine ait verilerinin en düşük aylık ortalama yağış değeri 0.0 mm/m², en yüksek aylık ortalama yağış değeri 7.6 mm/m²'dir. Şekil 1 de üç farklı yağış rejimine maruz illerin 1991-2020 yıllarına sahip yıllık alansal yağış normalleri haritasında [24] konumu görülmektedir

2.2 Standardize yağış indeksi

SYİ ilk olarak McKee ve diğerleri tarafından geliştirilmiş olup, sadece yağış değişkeni kullanan bir kuraklık indeksidir [25]. SYİ kuraklığın izlenmesi ve analizinde çok yönlü bir araç olarak günümüzde tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır [26]. Kuraklık durumu aylık ve yıllık olmak üzere farklı zaman ölçeklerinde izlenebilmektedir.

SYİ hesaplanması için aşağıdaki işlemler uygulanmaktadır

i. Yağış verilerinden oluşan veri kümesi, bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna (PDF) uyarlanır. Bu aşamada uygulanacak parametrik dağılımın seçimi, SYİ'nin doğruluğunu belirlemektedir. McKee ve arkadaşları [25] SYİ'nin hesaplanması aşamasında gamma dağılımının kullanımını önermiştir. Ancak gamma dağılımının uzun sürelerde elde edilen yağış kayıtlarından SYİ eldesinde kullanımı daha uygundur. Gamma dağılımı **Denklem 1** de verilen formül ile elde edilmektedir.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \tau(\alpha)} Y^{\alpha-1} e^{-Y/\beta} \quad (1)$$

Burada $\alpha > 0$; şekil parametresini, $\beta > 0$ skala parametresini, τ gamma fonksiyonunu ve $Y > 0$ yağış miktarını göstermektedir.

ii. Belirli zaman ölçeği için elde edilen sonuçlar ile bir kümülatif olasılık yoğunluk dağılımı elde edilir [27].

iii. Merkezi limit teoremine göre, 6 ayı aşan uzun zaman periyotlarına geçildiğinde, elde edilen zaman ortalamasının gözlemlenen olasılık dağılımlarını normale kaydırma eğiliminde olacaktır. Gamma dağılımı şekil olarak normale doğru yöneldiği için gamma dağılımı yerine normal olasılık dağılımını kullanmak mümkündür; bu, hesaplama açısından daha kolay ve daha doğru olabilmektedir. Bu nedenle, elde edilen kümülatif olasılık dağılımı, ortalaması sıfır ve varyansı bir olan standart bir normal dağılıma dönüştürülür [28, 29]. Böylece SYİ, **Denklem 2** den de görüleceği gibi yağış verileri kullanılarak belirlenen zaman ölçeğinde yağışın ortalamadan olan farkının standart sapmaya bölünmesi ile elde edilmektedir.

$$SYİ = \frac{Y_i - \bar{Y}_t}{\sigma_i} \quad (2)$$

SYİ genellikle 3, 6, 9, 12, 24 ve 48 aylık olmak üzere farklı zaman ölçekleri için hesaplanmaktadır. SYİ'nin doğru hesaplanması; genellikle kısa dönemlerde toprak nemi koşulları, yağış anormallikleri gibi parametrelerin tahmininde, uzun dönemlerde yeraltı suyu, akarsu akışı ve rezervuar depolaması ve daha uzun vadeli yağış anormallikleri gibi parametrelerin tahmininde önemli olmaktadır. Böylelikle, SYİ, su kaynakları üzerindeki yağış eksikliğinin etkisine dair genel olarak bir fikir vermektedir. SYİ değerinin negatif yönde büyük olması kuraklığın şiddetini göstermektedir. SYİ kuraklık sınıflandırmasına ilişkin bilgiler **Tablo 1** de görülmektedir.

Tablo 1. SYİ kuraklık sınıflandırılması

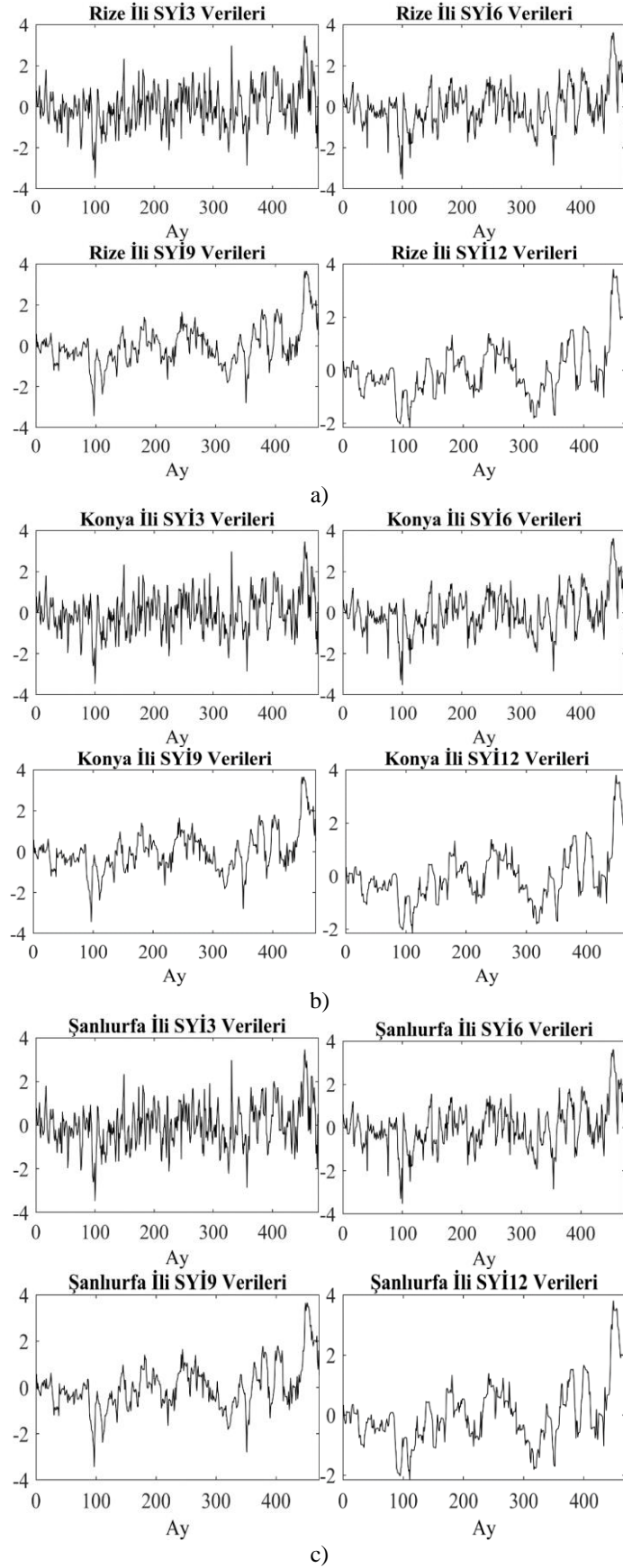
SYİ Değeri	Kuraklık Kategorisi
$SYİ \geq 2$	Olağanüstü Nemli
$1.50 \leq SYİ < 2$	Aşırı Nemli
$1.0 \leq SYİ < 1.5$	Orta Derece Nemli
$-1.0 \leq SYİ < 1.0$	Normale yakın
$-1.5 \leq SYİ < -1.0$	Orta Derece Kurak
$-2.0 \leq SYİ < -1.5$	Şiddetli Kurak
$SYİ < -2.0$	Olağanüstü Kurak

Gerçekleştirilen çalışmada 3,6, 9 ve 12 aylık SYİ'leri hesaplanmıştır. 3 aylık SYİ için SYİ₃, 6 aylık SYİ için SYİ₆, 9 aylık SYİ için SYİ₉ ve 12 aylık SYİ için SYİ₁₂ gösterimi kullanılmıştır. 3-12 aylık SYİ'lerin tahmini için uygulanan giriş ve çıkış değişkenleri **Tablo 2** de yer almaktadır. Tabloda t şuanadaki girişi, t+1 bir ileri zamanı, t+2 ise iki ileri zamanı ve t+3 ise üç ileri zamanı göstermektedir.

Tablo 2. Tahmin çalışmasında kullanılan giriş-çıkış değişkenleri

Giriş Değişkenleri	Bir-İleri Tahmin Değişkeni	İki-İleri Tahmin Değişkeni	Üç-İleri Tahmin Değişkeni
SYİ _{3t}	SYİ _{3,t+1}	SYİ _{3,t+2}	SYİ _{3,t+3}
SYİ _{6t}	SYİ _{6,t+1}	SYİ _{6,t+2}	SYİ _{6,t+3}
SYİ _{9t}	SYİ _{9,t+1}	SYİ _{9,t+2}	SYİ _{9,t+3}
SYİ _{12t}	SYİ _{12,t+1}	SYİ _{12,t+2}	SYİ _{12,t+3}

Tahmin çalışmasında kullanılan SYİ verileri **Şekil 2** de görülmektedir. **Tablo 3** te tahmin çalışmasında kullanılan Rize, Konya ve Şanlıurfa illerine ait SYİ verilerinin temel istatistiksel değerleri görülmektedir.



Şekil 2. Tahmin çalışmasında kullanılan a) Rize, b) Konya ve c) Şanlıurfa illerine ait SYİ verileri

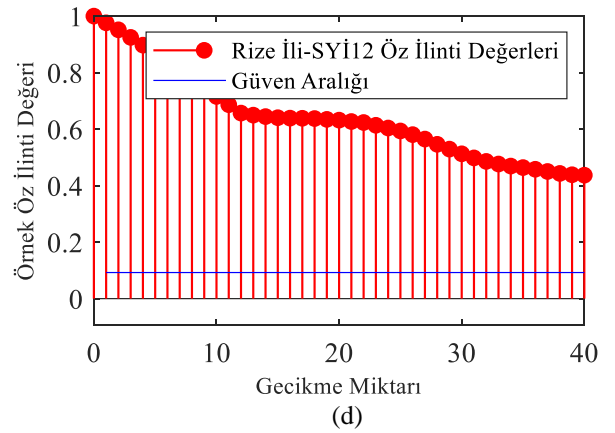
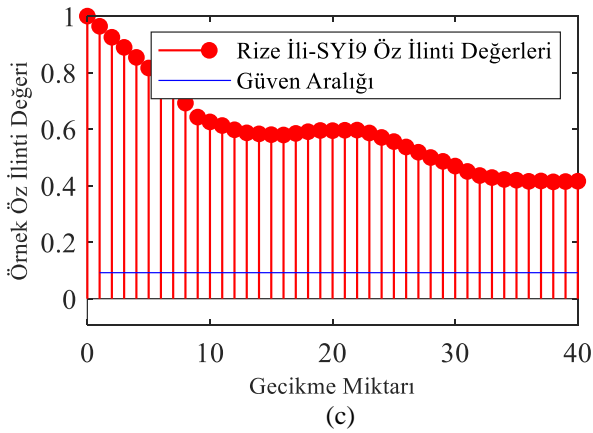
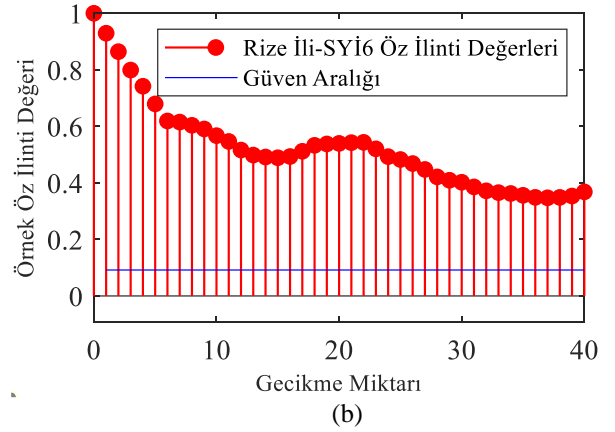
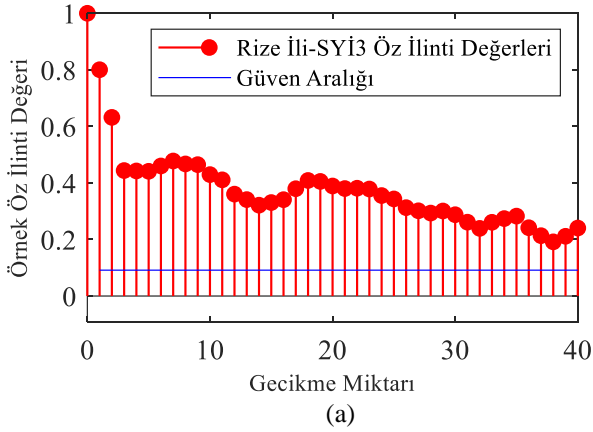
Bu çalışmada her ne kadar ülke içerisinde üç farklı yağış rejimine sahip bölgeler incelenmiş olsa da **Tablo 3** deki temel istatistiksel değerler bu üç bölgenin bir ortak özelliğini sunmaktadır. Bu özellik ise Anadolu coğrafyasına düşen yağışlardaki düzensizlik olarak yorumlanabilir. Her üç bölgeye de düşen yağışlardaki değişkenlik hem olağan üstü

kurak hemde olağanüstü nemli dönemlere sahip olduğunu göstermektedir.

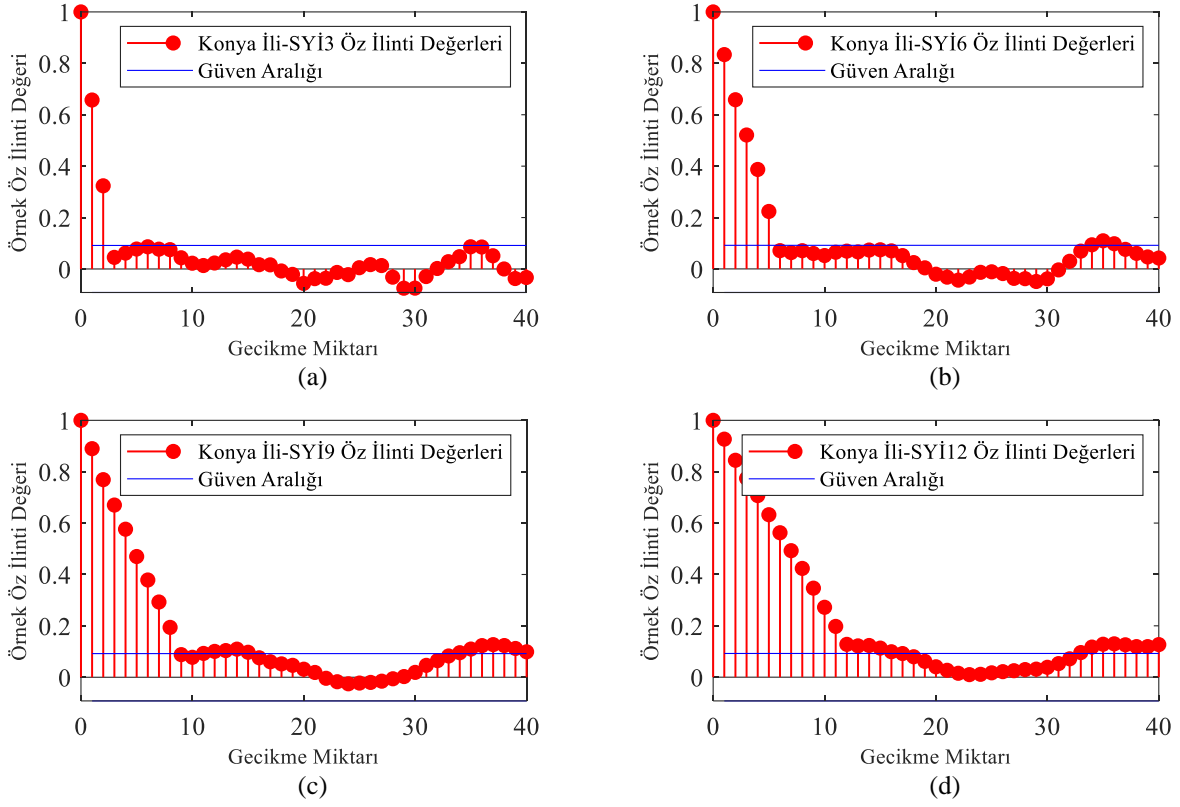
Ayrıca Rize, Konya ve Şanlıurfa illerine ait SYİ'leri örnek öz ilinti (autocorrelation) fonksiyonları da 40 gecikme (lag) miktarı için hesaplanmıştır ve **Şekil 3-5** de görülmektedir.

Tablo 3. Rize, Konya ve Şanlıurfa illerine ait SYİ değerlerinin temel istatistiksel özellikleri

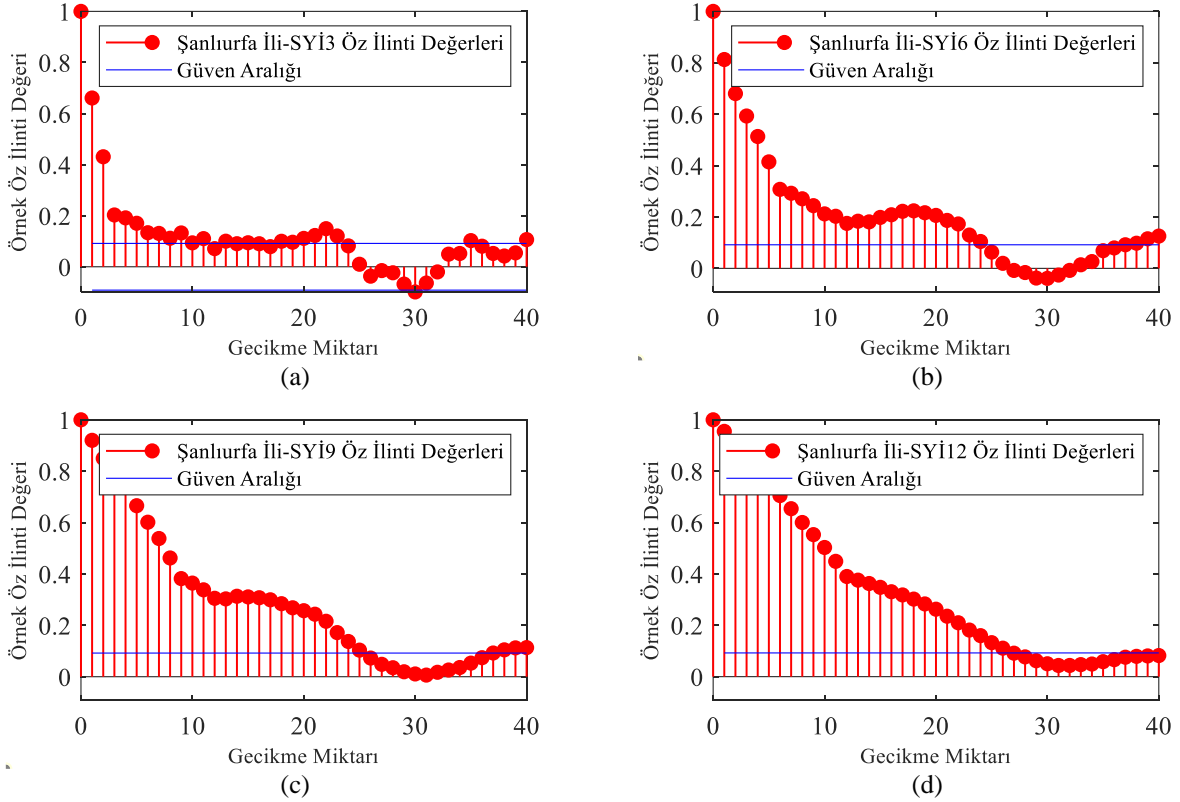
	Rize			Konya			Şanlıurfa		
	En Yüksek	En Düşük	Çarpıklık	En Yüksek	En Düşük	Çarpıklık	En Yüksek	En Düşük	Çarpıklık
SYİ3	3.105	-2.757	0.0401	3.1389	-2.960	0.1459	3.463	-3.476	0.1948
SYİ6	2.910	-2.800	0.0368	2.8280	-2.946	0.0183	3.610	-3.531	0.3023
SYİ9	2.646	-2.787	0.0278	2.6176	-3.113	0.0316	3.665	-3.437	0.7089
SYİ12	2.693	-2.738	0.0466	2.7713	-2.510	0.0429	3.808	-2.161	1.0190



Şekil 3. Rize ili a) SYİ3 b) SYİ6 c) SYİ9 d) SYİ12 örnek öz ilinti değerleri



Şekil 4. Konya ili a) SYİ3 b) SYİ6 c) SYİ9 d) SYİ12 örnek öz ilinti değerleri



Şekil 5. Şanlıurfa ili a) SYİ3 b) SYİ6 c) SYİ9 d) SYİ12 örnek öz ilinti değerleri

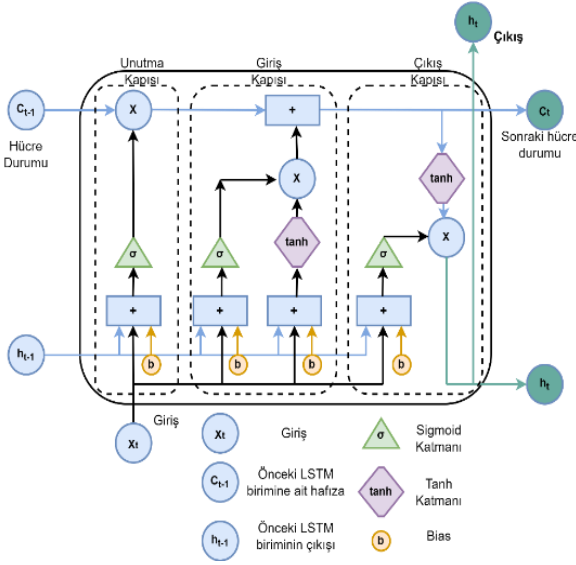
Rize ilinde genel olarak hemen hemen her mevsimde yağış görüldüğü için verinin, sonrası verilerle ilişkisi yüksektir. Bu durum Şekil 3 de görülmektedir. Ayrıca, Konya ve Urfa illerine ait SYİ3 verilerindeki öz ilintiye bakıldığında Rize iline göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Genel olarak SYİ12 verilerine ait öz ilintinin SYİ3, SYİ6 ve SYİ9 verilerine göre daha yüksek olduğu Şekil 3-5'te görülmektedir. Bunun sebebi ise genel olarak 12 aylık gibi uzun dönemlerde yağış karakteristiklerinin periyodikleşmesi olarak yorumlanabilir.

Gerçekleştirilen çalışmada SYİ verilerin %80'i eğitim %20'si ise test işlemi için kullanılmıştır. SYİ verilerinin DrinC [30, 31] programı ile elde edilmiş olup, tahmin çalışmaları MATLAB programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

2.3 Uzun kısa süreli bellek ağları

Bir derin sinir ağı olan Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları ilk defa Hochreiter ve Schmidhuber tarafından ortaya konmuş olup uzun vadeli bağımlılıkları öğrenebilen uzun süreler boyunca bilgileri hatırlayabilen özel bir Tekrarlayan Sinir Ağları (Recurrent neural network, RNN) türüdür. Standart bir RNN gibi tek bir sinir ağı yerine dört katmana sahiptir. LSTM sinir ağının yapısı Şekil 6'da gösterilmektedir [32].



Şekil 6. LSTM hücresi

Tipik bir LSTM ağı hücre durumu ve çeşitli kapılar ile tanımlanmaktadır. Verilerin ileriye doğru akmasına izin veren hücre durumu, ana veri akışını sağlamakta olup, ağın "hafızası" olarak görev yapmaktadır. Veriler, sigmoid kapılar aracılığıyla hücre durumuna eklenebilmekte veya hücre durumundan çıkarılabilmektedir. Kapılar, eğitim sırasında hangi bilgilerin saklanması veya unutulması gerektiğini öğrenebilmektedir. Bir LSTM hücresinde unutma kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısı bulunmaktadır.

Bir LSTM ağı oluşturmanın ilk adımı olan unutma kapısında hangi bilgilerin saklanacağına veya hangi

bilgilerin gerekli olmadığına karar verilir. Önceki gizli durumdan gelen bilgiler (h_{t-1}) ve mevcut girişten (x_t) gelen bilgiler sigmoid (σ) fonksiyonundan geçirilir. Unutma kapısı çıkışında 0 ile 1 arasında değerler elde edilir ve elde edilen değerlerin 0'a yaklaşması, unutma (verinin elenmesi), 1'e yaklaşması, verinin saklanması anlamına gelmektedir. Unutma kapısının çıkışı Denklem 3'te verilen ifade ile tanımlanmaktadır.

$$f_t = \sigma(W_f[h_{t-1}, x_t] + b) \quad (3)$$

Burada σ sigmoid fonksiyonunu, b bias değerini ve W_f unutma kapısının ağırlık matrisini göstermektedir.

LSTM hücresinde ikinci olarak, hücre durumunu güncellenen yanı sıra hücre durumundaki yeni girişten (x_t) gelen bilgilerin kararlaştırılması ve saklanmasını sağlayan giriş kapısı yer almaktadır. Burada, sigmoid katman ve ikinci tanh katmanı olmak üzere iki bölüm içerir. İlk olarak, sigmoid katmanında yeni bilginin güncellenmesine veya yok sayılmasına (0 veya 1) karar verilmektedir ve ikinci olarak, tanh işlevi ile önem derecesine (-1'den 1) karar verilerek bu işlemden geçen değerlere ağırlık verilir. Yeni hücre durumunu güncellemek için elde edilen bu iki değer çarpılır. Bu yeni bellek değeri daha sonra önceki bellek çıktısına ($f_t C_{t-1}$) eklenir ve C_t ile sonuçlanır [32]. Aşağıda yer alan Denklem 4, 5 ve 6'da hücre durumu gösterilmektedir.

$$i_t = \sigma(W_i[h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (4)$$

$$N_t = \tanh(W_n[h_{t-1}, x_t] + b_n) \quad (5)$$

$$C_t = C_{t-1} f_t + N_t i_t \quad (6)$$

Çıkış kapısı olan LSTM hücresinin son katmanında, bir sigmoid katman çıkışı (O_t) hücre durumunun hangi bölümlerinin çıktığına ulaşacağına karar vermektedir ve çıkış değeri (h_t), sigmoid katman çıkışı ile hücre durumunun (C_t) tanh katmanından geçirilmesiyle elde edilen -1 ile 1 arasında değişen bir değerle çarpılması sonucu elde edilir. Çıkış kapısına ait eşitlikler aşağıda yer almaktadır.

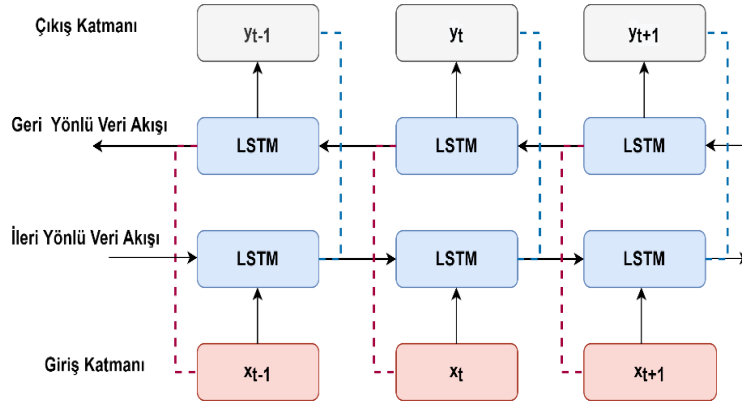
$$O_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (7)$$

$$h_t = O_t \tanh(C_t) \quad (8)$$

Burada W_o ve b_o , çıkış kapısının sırasıyla ağırlık matrisleri ve bias değeridir.

2.4 Çift yönlü uzun kısa süreli bellek ağları

Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek Ağlarında ileri ve geriye doğru olmak üzere iki yönlü veri akışı olmaktadır. Bunu başarmak için mimari olarak biLSTM, Şekil 7'de gösterildiği gibi ileri ve geri LSTM katmanları içerir. İleri ve geri katmanlardan gelen girdiler, çıktı katmanı tarafından eş zamanlı olarak işlenir [33].



Şekil 7. biLSTM mimarisi

2.5 Önerilen derin sinir ağları mimarisi

Gerçekleştirilen çalışmada 3-12 aylık SYİ değerlerinin 1-3 ileri zamanlı tahmini için LSTM ve biLSTM katmanlarından oluşan derin sinir ağları mimarileri geliştirilmiştir. Birinci modelde LSTM katmanı 2. Modelde ise biLSTM katmanı kullanılmıştır. Mimarinin geliştirilmesi sırasında 32'den başlayarak 256'ya kadar farklı sayılarda hücrelerden oluşan LSTM ve biLSTM katmanları ile farklı sayı ve sıralarda tam bağlantılı katman (fully connected layer) ve seyreltme (drop out) katmanları kullanarak tahmin çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en iyi tahmin performansına göre nihai ağ yapısı belirlenmiş ve Şekil 8.'de görülmektedir. Ayrıca ağı eğitilmesi sırasında 'adam' öğrenme algoritması kullanılmış olup başlangıç öğrenme oranı 0.002, öğrenme oranı seyreltme faktörü (learning rate drop factor) 0.1, öğrenme oranı seyreltme periyodu 100 ve maksimum döngü sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Öğrenme sürecinde belirtilen parametreler en iyi öğrenmeyi sağlayacak şekilde deneme yanılma metoduyla tespit edilmiştir.

2.6 Tahmin çalışmasında kullanılan performans parametreleri

SYİ tahmin çalışmasında Korelasyon Katsayısı (R), Ortalama Karesel Hata (MSE), Belirlilik Katsayısı (R²) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE), kriterlerine göre model performansları değerlendirilmiştir.

Ortalama mutlak hata, veri kümesindeki gözlemlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki mutlak farkın ortalamasını göstermektedir ve Denklem 9'da yer alan formül ile elde edilmektedir.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{gözlemlenen,i} - X_{tahmin edilen,i}| \quad (9)$$

Ortalama karesel hata veri kümesindeki gözlemlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki farkın karesinin ortalamasıyla hesaplanır ve Denklem 10 ile ifade edilmektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{gözlemlenen,i} - X_{tahmin edilen,i})^2 \quad (10)$$

Korelasyon katsayısı, gözlemlenen ve tahmin edilen veriler arasındaki ilişkinin derecesini, yönünü ve önemini göstermekte ve -1 ile 1 arasında bir değere sahiptir. Denklem 11 ile ifade edilmektedir.

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{gözlemlenen,i} - \mu_X}{\sigma_X} \right) \left(\frac{X_{tahmin edilen,i} - \mu_{X_{tah}}}{\sigma_{X_{tah}}} \right) \quad (11)$$

Bu eşitlikte, μ_X gözlemlenen, $\mu_{X_{tah}}$ ise tahmin edilen zaman serisinin ortalamasıdır ve σ_X gözlemlenen, $\sigma_{X_{tah}}$ ise tahmin edilen zaman serisinin standart sapmasıdır.

Belirlilik katsayısı, modellerin tahmin yeteneğini ölçmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu istatistiksel ölçüt, $-\infty$ ile 1 arasında bir değere sahiptir. R² değeri 1 değerine yaklaştıkça gözlemlenen ve tahmin edilen veriler arasındaki ilişkinin arttığını göstermektedir ve R² değeri Denklem 12 kullanılarak hesaplanır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [X_{gözlemlenen,i} - X_{tahmin edilen,i}]^2}{\sum_{i=1}^N [X_{gözlemlenen,i} - \mu_X]^2} \quad (12)$$

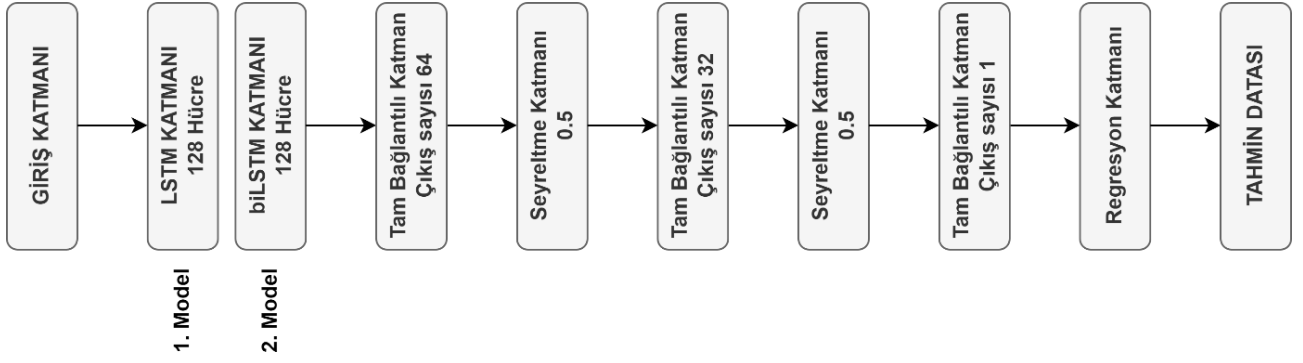
3 Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada Rize, Konya ve Şanlıurfa illerine ait SYİ3, SY6, SY9 ve SY12'nin 1-3 ileri zamanlı tahmini için derin sinir ağları yaklaşımı içeren modeller geliştirilmiştir.

Derin sinir ağları mimarisinin geliştirilmesi aşamasında iki model kullanılmıştır. Model 1 olarak isimlendirilen LSTM katmanı içeren model ile Model 2 olarak isimlendirilen ve biLSTM katmanı içeren modellerin performansı SYİ'lerin bir ileri zamanlı tahmini ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen performans sonuçları Tablo 4'te görülmektedir.

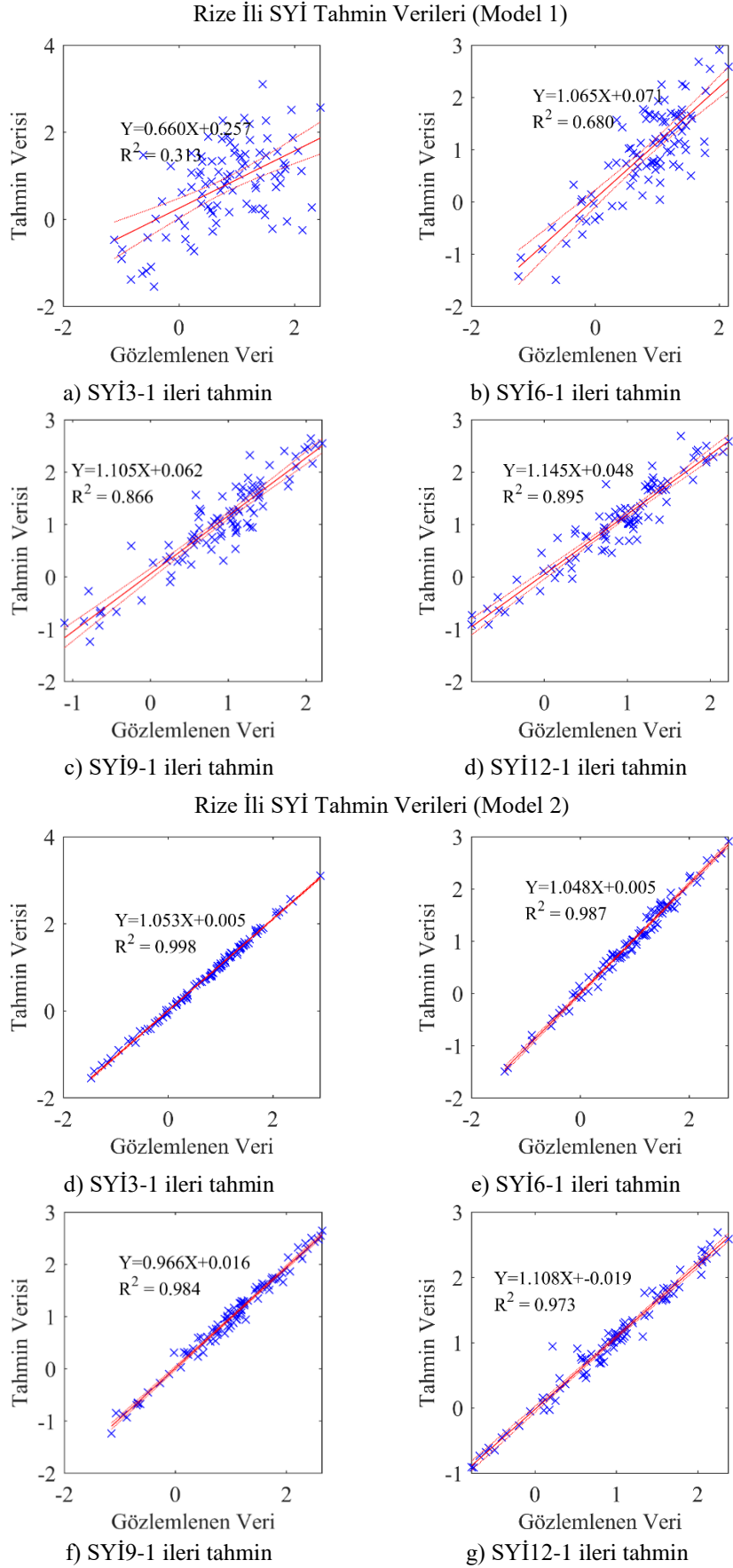
Tahmin çalışmasında elde edilen sonuçları ayrıca görsel olarak değerlendirebilmek için saçılma grafikleri çizilmiştir. Saçılma grafikleri ise Şekil 9-11'de görülmektedir.



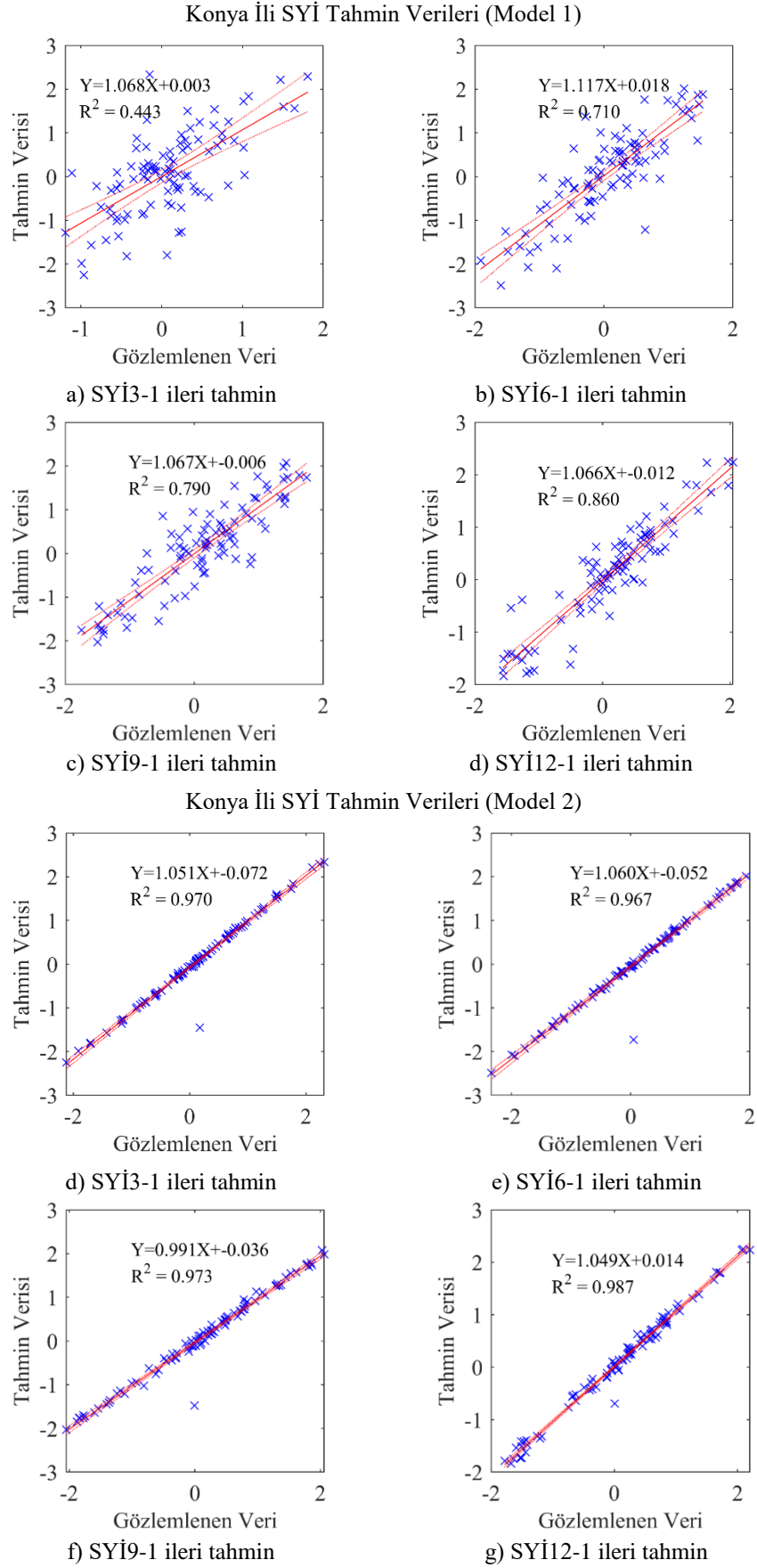
Şekil 8. Tahmin çalışmasında kullanılan mimari

Tablo 4. Rize, Konya ve Şanlıurfa illeri 1 ileri zamanlı SYİ tahmin değerleri

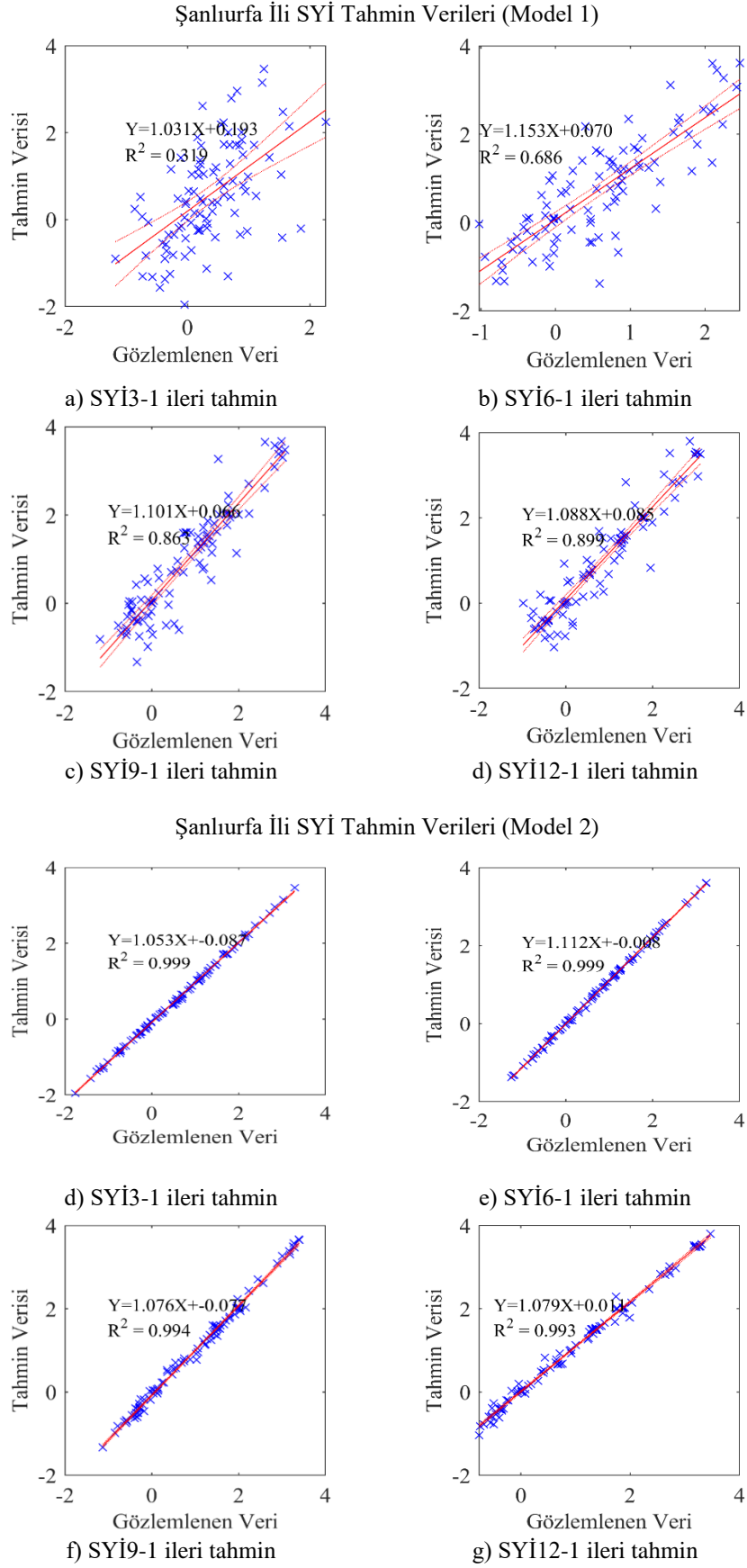
Rize İli								
	Model 1 Performans Sonuçları				Model 2 Performans Sonuçları			
	MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
SYİ3-1ileri	0.6966	0.6647	0.5590	0.3125	0.0065	0.0628	0.9988	0.9976
SYİ6-1ileri	0.2715	0.4228	0.8249	0.6804	0.0140	0.0968	0.9936	0.9873
SYİ9-1ileri	0.1279	0.2837	0.9304	0.8657	0.0129	0.0909	0.9920	0.9841
SYİ12-1ileri	0.1141	0.2662	0.9462	0.8952	0.0323	0.1365	0.9866	0.9735
Konya İli								
	Model 1 Performans Sonuçları				Model 2 Performans Sonuçları			
	MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
SYİ3-1ileri	0.5025	0.5585	0.6655	0.4429	0.0334	0.0790	0.9848	0.9697
SYİ6-1ileri	0.2979	0.4219	0.8429	0.7104	0.0383	0.0741	0.9832	0.9667
SYİ9-1ileri	0.2180	0.3675	0.8891	0.7905	0.0288	0.0771	0.9866	0.9734
SYİ12-1ileri	0.1345	0.2786	0.9275	0.8603	0.0147	0.0856	0.9935	0.9870
Şanlıurfa İli								
	Model 1 Performans Sonuçları				Model 2 Performans Sonuçları			
	MSE	MAE	R	R ²	MSE	MAE	R	R ²
SYİ3-1ileri	0.9537	0.7650	0.5650	0.3192	0.0080	0.0773	0.9994	0.9988
SYİ6-1ileri	0.4940	0.5559	0.8280	0.6855	0.0204	0.1125	0.9996	0.9992
SYİ9-1ileri	0.2475	0.3848	0.9289	0.8629	0.0168	0.1019	0.9971	0.9942
SYİ12-1ileri	0.2033	0.3365	0.9483	0.8992	0.0281	0.1321	0.9964	0.9928



Şekil 9. Rize iline ait SYİlerin 1 ileri zamanlı tahminine ait saçılma grafikleri



Şekil 10. Konya iline ait SYİlerin 1 ileri zamanlı tahminine ait saçılma grafikleri



Şekil 11. Şanlıurfa iline ait SYİlerin 1 ileri zamanlı tahminine ait saçılma grafikleri

Tablo 4'te verilen sonuçlar incelendiğinde biLSTM katmanı kullanılan Derin Sinir Ağı mimarisinin tahmin başarısının LSTM katmanı kullanan mimariye göre oldukça iyi olduğu görülmüştür.

Tahmin çalışmasının ikinci aşamasında Model 2 kullanılarak 2 ve 3 ileri zamanlı SYİ'lerin tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin çalışmasına ait performans parametre değerleri ve tahmin sonuçlarını gösteren saçılma grafikleri Tablo 5 ve Şekil 12-15'te görülmektedir. Ayrıca örnek olarak SY3 2 ve 3 ileri test ve tahmin verileri Şekil 15-17'de görülmektedir

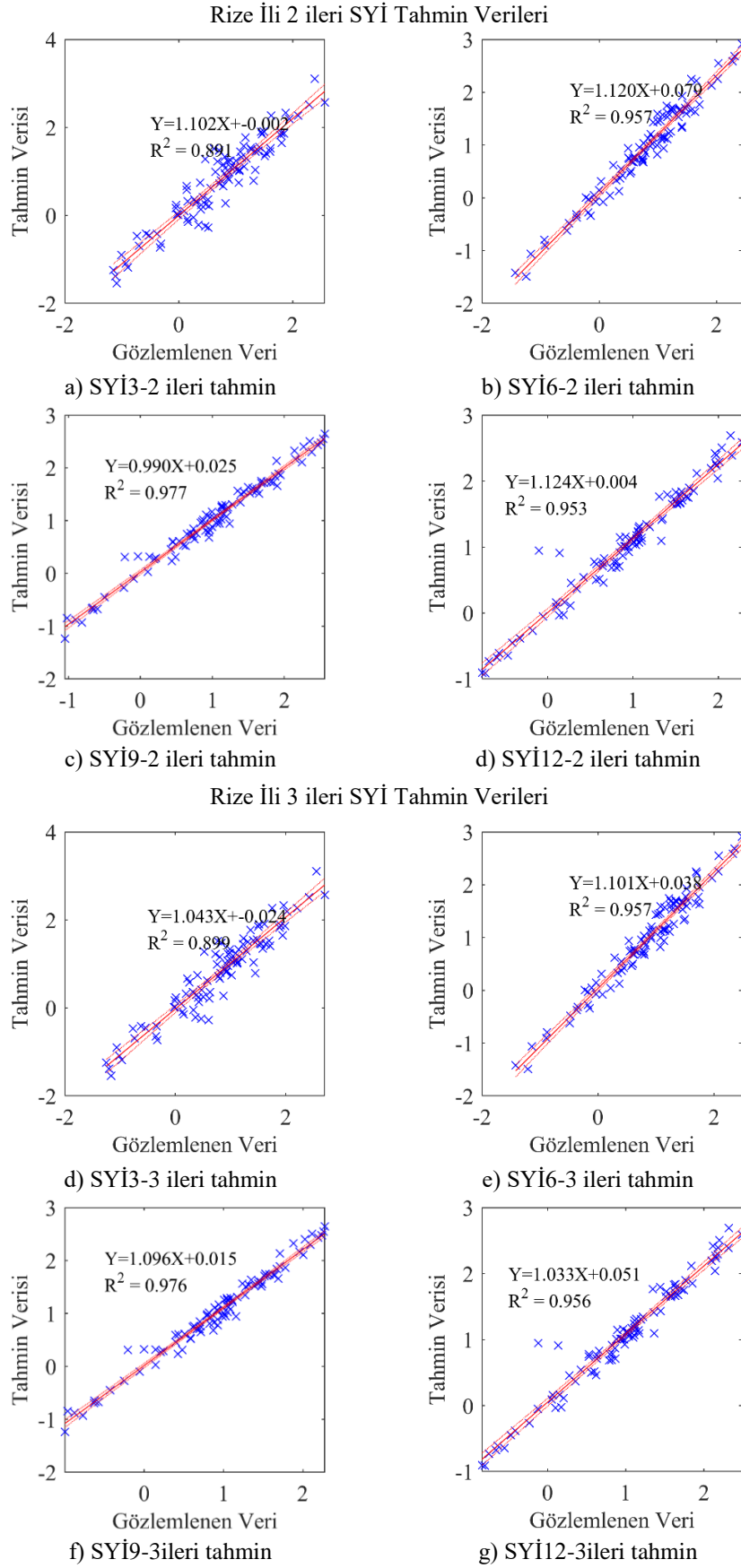
Tablo 5 incelendiğinde 1 giriş 2 ve 3 ileri zamanlı tahmin çalışmasında biLSTM mimarisinin tahmin performansının oldukça iyi olduğu görülmektedir.

Şekil 12-14 te verilen saçılma grafikleri ve Şekil 15-17 de verilen zaman serisi verilerinden de görüleceği üzere tahmin verilerinin gerçek verileri yakından izlemektedir.

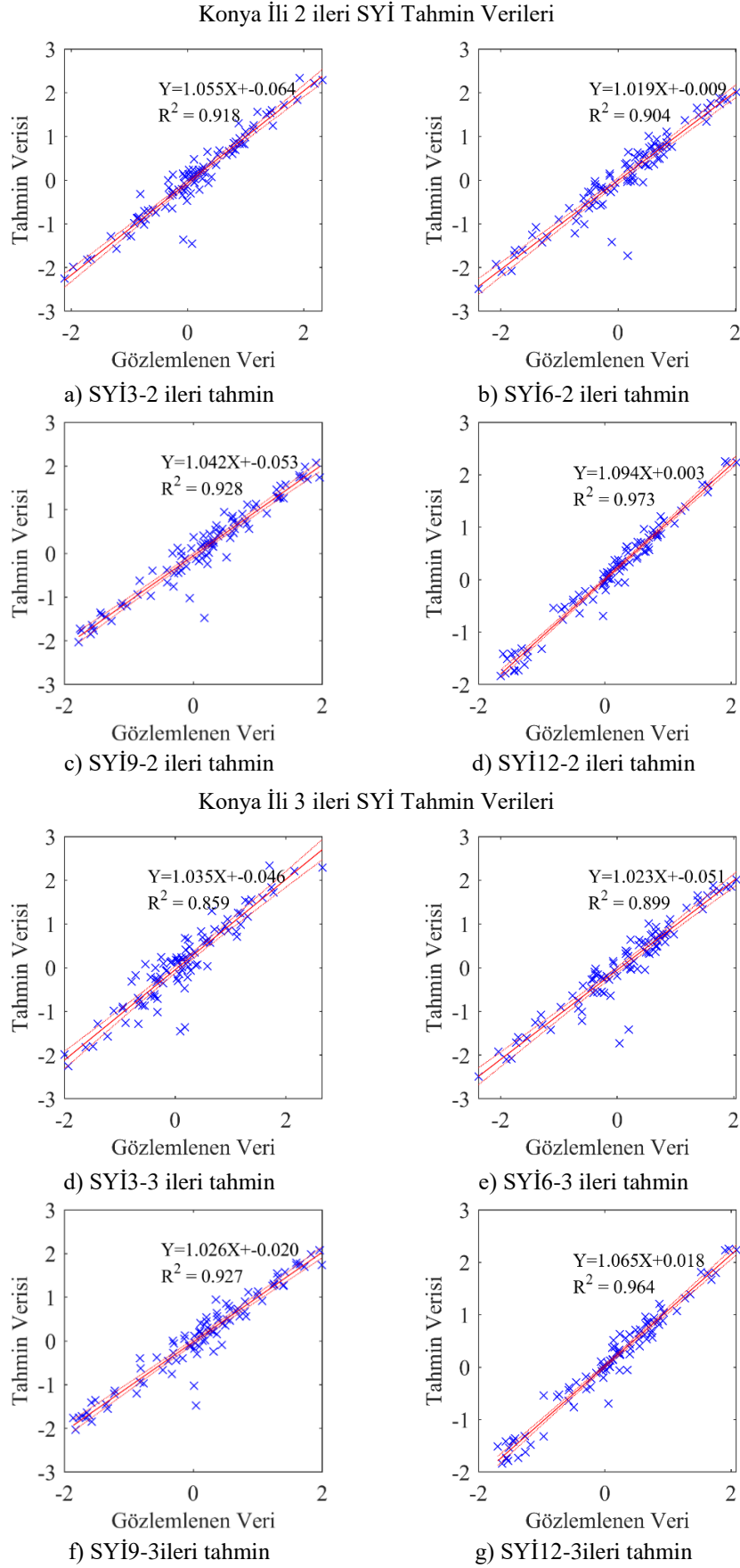
Literatürde kuraklık indekslerine yönelik yapılan tahmin çalışmaları incelendiğinde SYİ tahminine yönelik YSA, Destek vektör makineleri (DVM) ve Dalgacık sinir ağıları kullan bir çalışmada 0.95 değerine ulaşan R^2 değerinin elde edildiği görülmüştür [16]. Ayrıca akış kuraklık indeksinin (Streamflow Drought Index) tahmine yönelik gerçekleştirilen bir çalışmada Dalgacık Dönüşümü ve Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi kullanılmış olup 0.94 R^2 değeri elde edilmiştir [17]. Kuraklık tahminine yönelik kullanılan indeksler ve tahmin yöntemleri hakkında yazılan bir derleme çalışmasından da görüleceği üzere kuraklık tahminine yönelik YSA, ANFIS, DVM, Rastgele Orman ve derin öğrenme modellerinden LSTM mimarilerinin kullanıldığı görülmüştür [18]. Kuraklık tahminine yönelik kullanılan derin öğrenme modellerinin sınırlı sayıda olduğu ve tahmin amacıyla genellikle LSTM mimarilerinin kullanıldığı görülmüştür.

Tablo 5. Rize, Konya ve Şanlıurfa illeri 2-3 ileri zamanlı SYİ tahmin değerleri

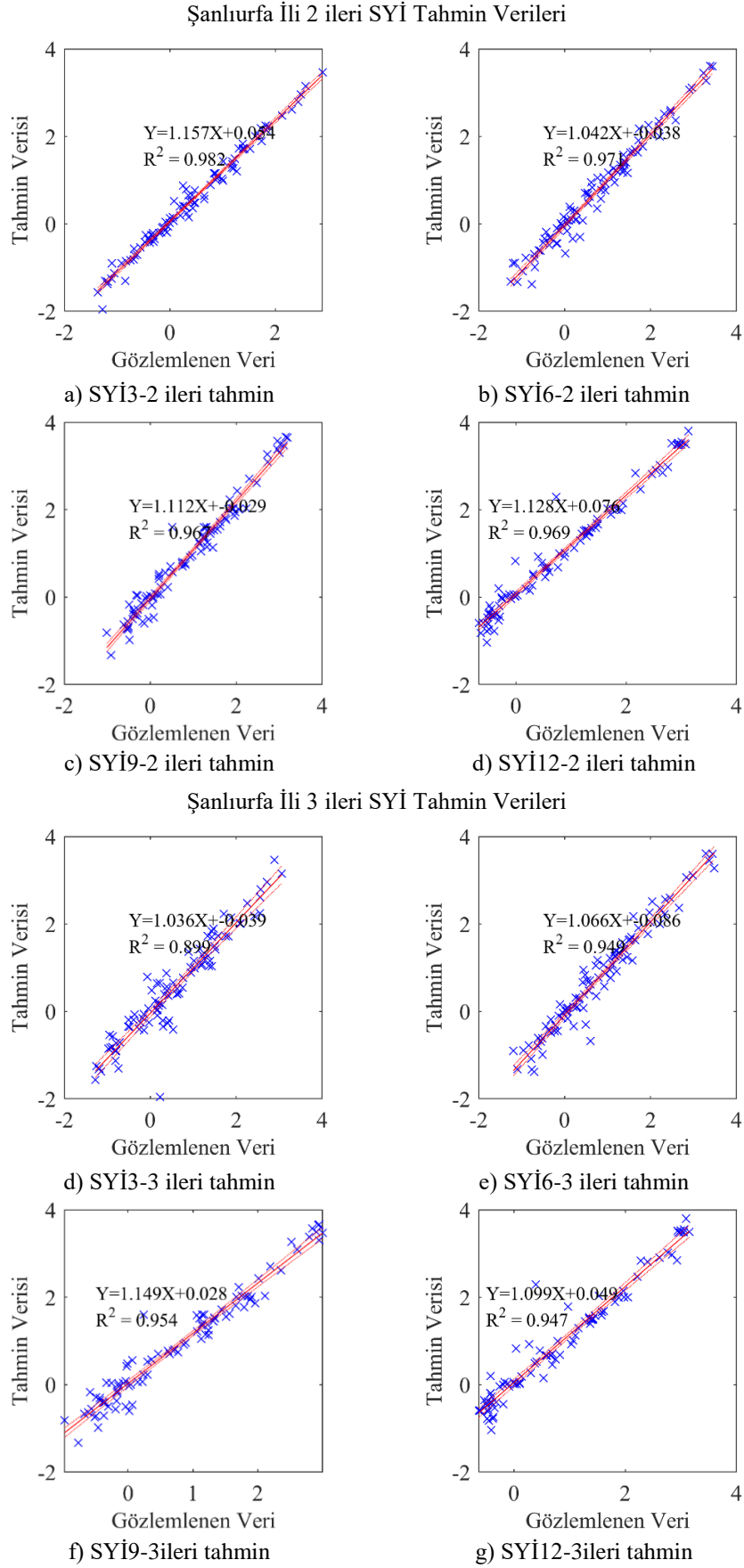
Rize İli								
	İki İleri Tahmin Sonuçları				Üç İleri Tahmin Sonuçları			
	MSE	MAE	R	R^2	MSE	MAE	R	R^2
SYİ3	0.1119	0.2571	0.9438	0.8907	0.0933	0.2355	0.9484	0.8994
SYİ6	0.0729	0.2110	0.9782	0.9568	0.0554	0.1871	0.9784	0.9573
SYİ9	0.0260	0.1315	0.9883	0.9774	0.0337	0.1499	0.9880	0.9762
SYİ12	0.0558	0.1723	0.9760	0.9526	0.0387	0.1291	0.9776	0.9557
Konya İli								
	İki İleri Tahmin Sonuçları				Üç İleri Tahmin Sonuçları			
	MSE	MAE	R	R^2	MSE	MAE	R	R^2
SYİ3	0.0798	0.1737	0.9580	0.9178	0.1314	0.2548	0.9267	0.8588
SYİ6	0.0977	0.1989	0.9506	0.9037	0.1062	0.2064	0.9479	0.8986
SYİ9	0.0778	0.1855	0.9636	0.9285	0.0775	0.1898	0.9628	0.9269
SYİ12	0.0327	0.1415	0.9864	0.9730	0.0390	0.1507	0.9816	0.9635
Şanlıurfa İli								
	İki İleri Tahmin Sonuçları				Üç İleri Tahmin Sonuçları			
	MSE	MAE	R	R^2	MSE	MAE	R	R^2
SYİ3	0.0617	0.1895	0.9911	0.9824	0.1387	0.2469	0.9481	0.8989
SYİ6	0.0449	0.1582	0.9851	0.9705	0.0802	0.2059	0.9743	0.9493
SYİ9	0.0718	0.1954	0.9835	0.9673	0.1196	0.2552	0.9768	0.9541
SYİ12	0.1059	0.2354	0.9845	0.9692	0.1210	0.2281	0.9732	0.9471



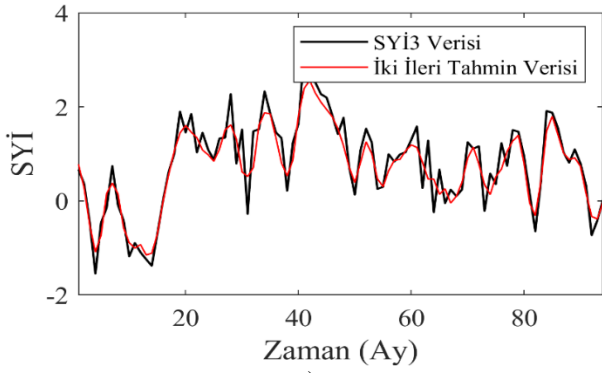
Şekil 12. Rize iline ait SYİlerin 2-3 ileri zamanlı tahminine ait saçılma grafikleri



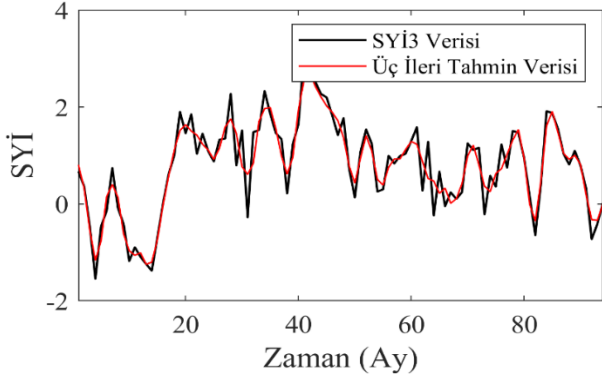
Şekil 13. Konya iline ait SYİlerin 2-3 ileri zamanlı tahminine ait saçılma grafikleri



Şekil 14. Şanlıurfa iline ait SYİlerin 2-3 ileri zamanlı tahminine ait saçılma grafikleri

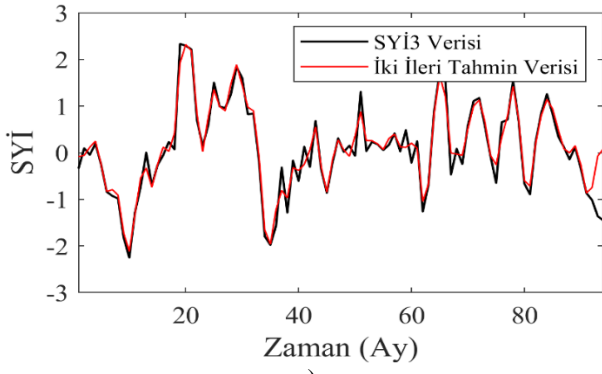


a)

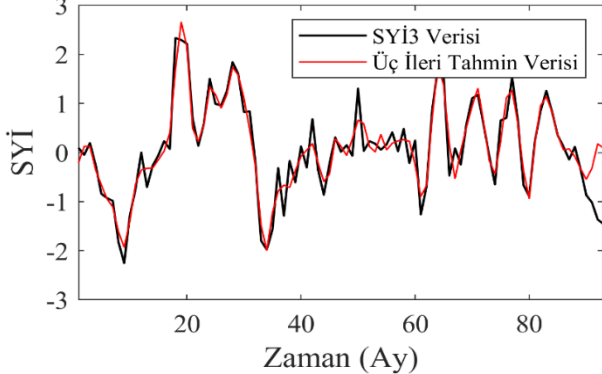


b)

Şekil 15. Rize ili SY3 a) iki ileri b) üç ileri tahmin verileri

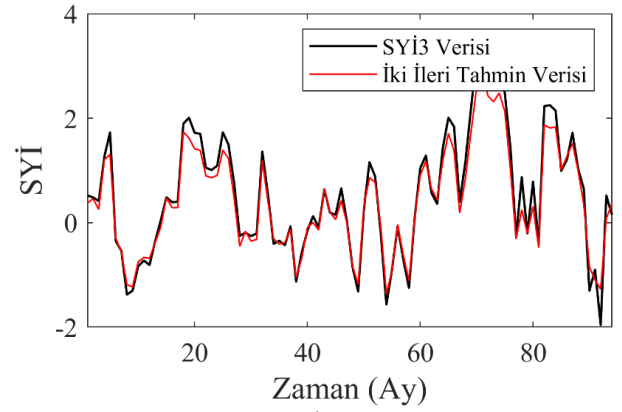


a)

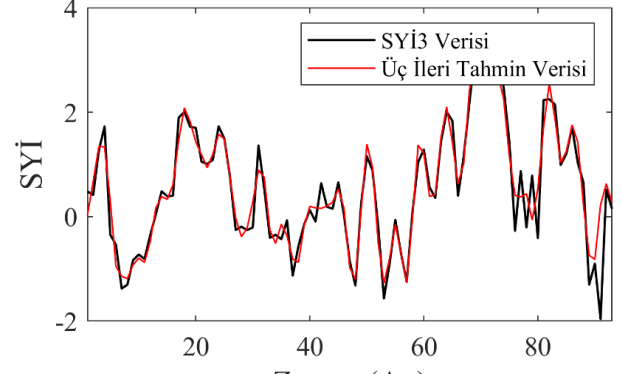


b)

Şekil 16. Konya ili SY3 a) iki ileri b) üç ileri tahmin verileri



a)



b)

Şekil 17. Şanlıurfa ili SY3 a) iki ileri b) üç ileri tahmin verileri

Bu çalışmada ise SYİ tahmini için LSTM ve biLSTM katmanlarından oluşan bir Derin Sinir Ağları mimarisi geliştirilmiştir. Geliştirilen mimarilerin performansı SYİ3, SYİ6, SYİ9 ve SYİ12 verilerinin bir ileri zamanlı tahmini sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen MSE, MAE, R ve R^2 performans parametrelerine bağlı sonuçlara göre, biLSTM modelinin performansının LSTM modelinin performansına göre çok daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca biLSTM modeli ile SYİ3, SYİ6, SYİ9 ve SYİ12 verilerinin 2,3 ileri zamanlı tahmini gerçekleştirilmiş olup, performans parametreleri ve saçılma grafikleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca biLSTM modelinin tahmin yeteneğini test etmek için illerdeki SYİ3, SYİ6, SYİ9 ve SYİ12 verilerinin 4-14 ileri zamanlı tahmin performansı da analiz edilmiştir. Önerilen modelin 13 ve daha ileri tahmin performansı incelendiğinde R^2 parametresinin 0.50 değerinin altına düştüğü, yani tahmin yeteneğini kaybettiği görülmüştür. Buradan biLSTM modelinin 12 ileri aya kadar tahmin yeteneğine sahip olduğu ve gürbüz bir yöntem olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre biLSTM içeren derin sinir ağlarının SYİ verilerinin tahmininde kullanılabileceği ve önemli bir araç olabileceği ortaya konmuştur.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

Kaynaklar

- [1] A. Dai, Drought under global warming: a review, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2, 45-65, 2011. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>.
- [2] T. D. Delbiso, C. Altare, J. M. Rodriguez-Llanes, S. Doocy, and D. Guha-Sapir, Drought and child mortality: a meta-analysis of small-scale surveys from Ethiopia, Scientific reports, 7(1), 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02271-5>
- [3] S. E. Nicholson, C. J. Tucker, and M. B. Ba, Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel, Bulletin of the American Meteorological Society, 79(5), 815-830, 1998. [https://doi.org/10.1175/15200477\(1998\)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2)
- [4] A. Grainger, S. Smith, V. R. Squires, and E. P. Glenn, Desertification, and climate change: the case for greater convergence, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 5(4), 361-377, 2000. <https://doi.org/10.3354/cr011051>
- [5] C. H. Chung and J. D. Salas, Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrologic processes. Journal of Hydrologic Engineering, 5(3), 259-268, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:3\(259\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(259))
- [6] J. H. Stage, L. M. Tallaksen, C. Y. Xu and H. A. Van Lanen, Standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters. In Hydrology in a changing world, 363, 367-373, 2014.
- [7] W. M. Alley, The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 23(7), 1100-1109, 1984. [https://doi.org/10.1175/15200450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2)
- [8] D. W. Kim, H.R. Byun, ve K. S. Choi, Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea. Journal of hydrology, 378(1-2), 1-12, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.021>
- [9] G. Tsakiris, D. Pangalou ve H. Vangelis, Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), Water resources management, 21(5), 821-833, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>
- [10] N. B. Guttman, Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index 1, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 113-121, 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>
- [11] M. Svoboda, M. Hayes, and D. Wood, Standardized precipitation index: user guide, 2012.
- [12] S. Sırdaş, Z. Sen, Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey, Hydrological Sciences Journal, 48(5), 809-820, 2003. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.5.809.51458>
- [13] N. B. Guttman, Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 35(2), 311-322, 1999. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- [14] A. Ahani, M. Shourian, ve P. Rahimi Rad, Performance assessment of the linear, nonlinear and nonparametric data driven models in river flow forecasting. Water resources management, 32(2), 383-399, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1792-5>
- [15] D. P. Solomatine and A. Ostfeld, Data-driven modelling: some past experiences and new approaches, Journal of hydroinformatics, 10(1), 3-22, 2008. <https://doi.org/10.2166/hydro.2008.015>
- [16] A. Belayneh, J. Adamowski, Standard precipitation index drought forecasting using neural networks, wavelet neural networks, and support vector regression. Applied computational intelligence and soft computing, 6, 6, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/794061>
- [17] H. Citakoglu, Y. Ozeren, ve O. Coskun, Short Time Drought Estimation of Sakarya Basin Station With Wavelet Model-Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, IWW'2019: International Conference on Image Processing, Wavelet and Applications, sayfa 190-197, Kocaeli, Türkiye, 18 - 20 Ekim 2019.
- [18] A. Dikshit, B. Pradhan, ve M. Santosh, Artificial neural networks in drought prediction in the 21st century-A scientometric analysis, Applied Soft Computing, 114, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108080>
- [19] T. Fischer ve C. Krauss, Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions. European journal of operational research, 270(2), 654-669, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.054>
- [20] D. K. Roy, Long short-term memory networks to predict one-step ahead reference evapotranspiration in a subtropical climatic zone, Environmental Processes, 8(2), 911-941, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00512-4>
- [21] S. Ghimire, R.C. Deo, N. Raj, ve J. Mi, Deep solar radiation forecasting with convolutional neural network and long short-term memory network algorithms. Applied Energy, 253, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113541>
- [22] NASA, 2020b, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Langley Research Center (LaRC), POWER Data Access Viewer, Single Point Data Access (2020) online resource, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>, Accessed 01 May 2022
- [23] M. R. Al-Kilani, M. Rahbeh, J. Al-Bakri, T. Tadesse, ve C. Knutson, Evaluation of Remotely Sensed Precipitation Estimates from the NASA POWER Project for Drought Detection over Jordan. Earth Systems and Environment, 5(3), 561-573, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00245-2>

- [24] Turkish State Meteorological Service, TURKIYE, <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/aylik-normal-yagis-dagilimi.aspx>, Accessed 21 September 2022
- [25] T. B. McKee, N. J. Doesken ve J. Kleist, The relationship of drought frequency and duration to time scales, In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), 179-183, 1993.
- [26] G. Tsakiris, H. Vangelis, Towards a drought watch system based on spatial SPI. Water resources management, 18(1), 1-12, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000015410.47014.a4>
- [27] D.C. Edwards, ve T. B. McKee, Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Times Scales. Atmospheric Science Paper, 634, 1-30, 1997.
- [28] F.K. Sönmez, A. U. Koemuescue, A. Erkan ve E. Turgu, An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index, Natural Hazards, 35(2), 243-264, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-5704-7>
- [29] P. Angelidis, F. Maris, N. Kotsovinos, ve V. Hrissanthou, Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. Water resources management, 26(9), 2453-2473, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0>
- [30] D. Tigkas, H. Vangelis, G. Tsakiris, DrinC: Ga software for drought analysis based on drought indices. Earth Science Informatics, 8(3), 697-709, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
- [31] D. Tigkas, H. Vangelis, N. Proutsos, G. Tsakiris, Incorporating aSPI and eRDI in Drought Indices Calculator (DrinC) software for agricultural drought characterisation and monitoring. Hydrology, 9(6), 100, 2022. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060100>
- [32] S. Hochreiter ve J. Schmidhuber, Long short-term memory. Neural computation, 9(8), 1735-1780, 1997. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- [33] S. Zhang, D. Zheng, X. Hu ve M. Yang, Bidirectional long short-term memory networks for relation classification, In Proceedings of the 29th Pacific Asia conference on language, information and computation, 73-78, 2015.





Kohezyonlu zeminlerde net limit basınç ve deformasyon modülünün makine öğrenimi temelli modeller kullanılarak tahmin edilmesi

Predicting net limit pressure and deformation modulus of cohesive soils using machine learning-based methods

Nurgül Yeşiloğlu Gültekin^{1*} , Ayhan Doğan² 

¹ Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Ankara, Türkiye

² Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Ankara, Türkiye

Öz

Makine öğrenimi temelli yöntemler son dönemlerde özellikle mühendislik uygulamalarında geniş bir alan bulmuştur. Çalışma kapsamında kohezyonlu birimlerde gerçekleştirilmiş arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak net limit basınç (P_{LN}) ve deformasyon modülü (E) değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla; Regresyon Ağaçları (RA), Destek Vektör Makineleri (DVM), Gauss Süreç Regresyonu (GSR) olmak üzere üç farklı makine öğrenimi yöntemi kullanılmıştır. Düzeltilmiş SPT ($SPT-N_{(60)}$), likit limit (%LL), plastisite indeksi (%PI) ve birim hacim ağırlık (BHA) verileri modellerin girdi parametrelerini oluşturmaktadır. Her bir model için üç makine öğrenimi yöntemi de uygulanmıştır. Buna göre; çalışma kapsamında DVM ve GSR yöntemleri RA yöntemine göre daha yüksek tahmin performansı göstermiştir. P_{LN} 'nin ve E 'nin tahmin edilmesine yönelik oluşturulan modeller karşılaştırıldığında ise; P_{LN} 'nin tahmin performansı daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak; üç farklı makine öğrenimi yönteminin de P_{LN} 'nin ve E 'nin tahmininde kullanılabileceği, özellikle arazi çalışmalarının yüksek maliyetli olduğu, örnekleme çalışmalarının güçlüğü gibi durumlarda temsil kabiliyetinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Net limit basınç, Deformasyon modülü, Regresyon ağaçları, Destek vektör makineleri, Gauss süreç regresyonu

1 Giriş

Presiyometre deneyinden elde edilen net limit basınç (P_{LN}) ve deformasyon modülü (E) değerleri mühendislik uygulamalarında zeminin yerinde deformasyon özelliklerinin ortaya konulması açısından önemli parametreler olup; presiyometre cihazının pahalı ve karmaşık bir yapıda olması, parametrelerin elde edilmesinin zaman alması, kuyuya cihazın yerleştirilmesi, probun şişirilmesi, kalibrasyon aşamalarında karşılaşılabilecek güçlükler gibi durumlar bu parametrelerin ampirik yöntemler ve hasarsız basit indeks testlerle oluşturulan algoritmalar ile tahmin edilmesini literatürde cazip bir duruma getirmiştir [1-7]. Ayrıca makine öğrenimi temelli

Abstract

Machine learning-based methods have recently found an extensive field especially in engineering applications. In this study, net limit pressure (P_{LN}) and deformation modulus (E) were tried to predict using the data obtained from in-situ and laboratory tests which were performed for cohesive soils. For this purpose, three different machine learning methods were employed such as regression trees (RT), support vector machines (SVM), gaussian process regression (GPR). The corrected SPT ($SPT-N_{(60)}$), liquid limit (LL%), plasticity index (PI%) and unit weight data are the input parameters of the models. Three machine learning methods were utilized for each constructed model. Accordingly, SVM and GPR methods have higher prediction performance than RA. When the models are compared which were constructed for the prediction of P_{LN} and E ; the prediction performance of P_{LN} is higher. Consequently, it has been concluded that three different machine learning methods can be used to predict P_{LN} and E , and their representativeness is high, especially in the cases where field studies are costly and difficulties of sampling.

Keywords: Net limit pressure, Deformation modulus, Regression trees, Support Vector Machines, Gaussian process regression

çalışmalar da jeoteknik uygulamalarda önemli bir yer bulmuştur [8-14]. Literatürde E 'nin makine öğrenimi yöntemleri ile tahmin edilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu amaçla, yerinde deneylerin yüksek maliyetleri ve hesaplama güçlüklerinden dolayı deformasyon modülünün belirlenmesine yönelik, genetik algoritma temelli yapay sinir ağları yöntemi uygulanan çalışmada plaka yükleme deneyinden elde edilen deformasyon modülü değerleri tahmin edilmiştir [15]. Sonuç olarak çalışmada, genetik algoritma tabanlı yapay sinir ağlarının yüksek tahmin performansı verdiği belirlenmiştir. İran'da bir barajın test galerisinden alınmış olan veriler ile bir yer altı açıklığının çevresindeki kazı hasar zonunun tanımlanması ve sınıflandırılması; deformasyon modülü esas

alınarak destek vektör makineleri yöntemi kullanılarak çalışılmıştır [16]. Altı farklı baraj sahasında gerçekleştirilen plaka yükleme deneyinden elde edilen deformasyon modülünün farklı kaya parametreleri kullanılarak tahmin edildiği çalışmada genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu (PSO-Particle Swarm Optimization) ve bulanık C-ortalama kümeleme (fuzzy C-mean clustering) yapıları kullanılmıştır [17]. Çalışmada genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonunun başarılı sonuç verdiği ifade edilmiştir. Hasanipanah vd. [18] tarafından farklı kaya parametreleri kullanılarak deformasyon modülünün tahmin edildiği çalışmada; Levenberg–Marquardt algoritması, Bayesci düzenleme (BR-Bayesian regularization) ve ölçekli eşlenik gradyan (SCG- Scaled Conjugate Gradient) olmak üzere üç farklı optimize edilmiş kademeli ileri yapay sinir ağları yöntemleri kullanılmıştır. Buna göre Levenberg–Marquardt algoritmasının yüksek performans verdiği belirlenmiştir.

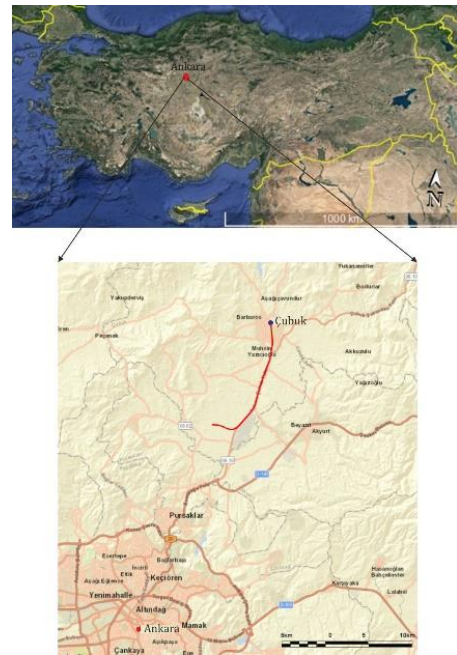
Bu çalışma kapsamında değerlendirilen presiyometre deneyinden elde edilmiş P_{LN} ve E 'nin belirlenmesine yönelik makine öğrenimi temelli çalışmalar literatürde sınırlı sayıda yer almaktadır. Bu kapsamda, Rashed vd. [19] toprak örneklerinin fiziksel özelliklerini kullanarak presiyometre deneyinden elde edilen deformasyon modülünü tahmin etmeye yönelik yapmış oldukları çalışmada bir dizi modeller geliştirmiş ve bu kapsamda lineer genetik programlama yöntemini kullanmışlardır. Yöntemin yapay sinir ağlarından daha iyi performans göstermesi de hızlı, basit ve anlaşılır bir denklem sunduğunu ifade etmişlerdir. Farklı türdeki toprak zeminler için deformasyon modülünün tahmin edildiği Alavi vd. [20] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise; bu tür zeminlerde uygulanan 114 adet presiyometre deney sonucundan elde edilen veriler için ifade programlama (expression programming) sistemleri kullanılmıştır. Çalışmada oluşturulan modellerin genelleştirme başarısı bir çok istatistiksel yöntem ile doğrulanmış ve çok iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Alemdag vd. [21] tarafından tabakalı sedimanter kayaların deformasyon modülünün farklı kaya kütle özellikleri kullanılarak tahmin edildiği çalışmada; net limit basınç ve deformasyon modülü değerleri yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik programlama yöntemleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonuçlarının tatmin edici olduğu belirtilmiş, ancak veri sayısının ve kalitesinin önemine vurgu yapılmıştır. Killi zeminler için gerçekleştirilen presiyometre deneyinden elde edilen deformasyon modülü ve limit basınç değerinin hesaplanmasına yönelik Moayed vd. [22] tarafından yapılan bir başka çalışmada; su içeriği, düzeltilmiş SPT değeri ve plastisite indeksi değeri girdi parametresi olarak belirlenmiş ve genetik algoritma ve grup veri işleme yöntemi (GMDH-Group Method of Data Handling) temelli yapay sinir ağları kullanılmıştır. Buna göre; grup veri işleme yöntemi temelli yapay sinir ağlarının iyi bir tahmin performansı verdiği belirtilmiştir. Çalışmada sınırlı tür ve sayıda toprak numunesi üzerinde çalışıldığı, farklı zemin türleri için türetilen denklemlerin doğruluğunun kontrol edilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, P_{LN} ve E değerleri makine öğrenimi temelli modeller kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Literatür incelendiğinde bu alanda sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmekte olup; yapılan çalışma literatüre katkı sağlayacak niteliktedir.

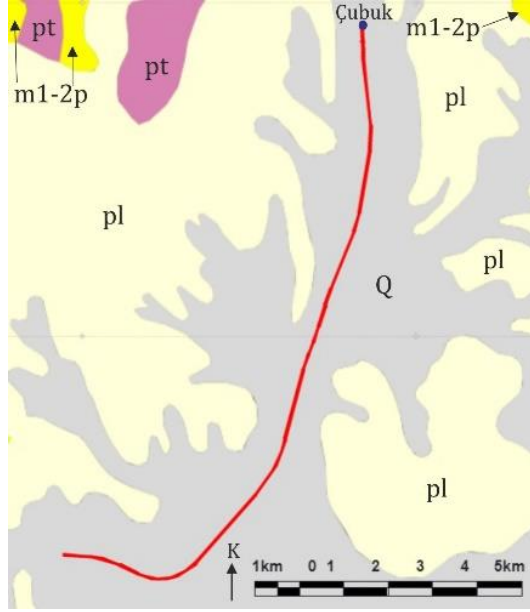
P_{LN} ve E değerleri arazi çalışmaları sırasında yerinde (in-situ) yapılan presiyometre deneyinden elde edilmiş sonuçlardır. Ayrıca sondaj çalışmaları sırasında Standart Penetrasyon Testi (SPT) yapılmış olup; bu deneyden elde edilen veriler ve yapılan örneklemeler bu çalışmada değerlendirilmiştir. Girdi parametresi olarak düzeltilmiş SPT ($SPT-N_{(60)}$), likit limit (%LL), plastisite indeksi (%PI) ve birim hacim ağırlık (BHA) değerleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında araziden toplanan tüm veriler değerlendirilmiş; aynı ölçüm seviyesinde tüm girdi ve çıktı parametreleri için değeri bulunan veriler kullanılmış, diğer veriler kullanılmamıştır. Bundan dolayı çalışmada 350 adet veri seti ile çalışılmıştır.

2 Çalışma alanı

Çalışma alanı Ankara İli Çubuk İlçesi sınırları içerisinde kalan 16 km'lik bir güzergahı içermektedir. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir [23-24]. Çalışma alanı 1/100000 ölçekli Bolu H29 ve Çankırı H30 paftaları içinde yer almaktadır. Çalışma alanı Kuvaterner (Q) yaşlı alüvyon birimler içerisinde yer almaktadır. Sondaj çalışmaları sırasında geçilen ve çalışma kapsamında değerlendirilen kohezyonlu birimler bu birim içindedir. Çalışma alanının yakın çevresinde Pliyosen yaşlı (pl) karasal kıvrıntılılar, Alt-Orta Miyosen yaşlı (m1-2p) piroklastik malzeme ve Permo Triyas (pt) yaşlı kıvrıntılılar ve karbonatlar (yer yer bloklu ve volkanitli) yer almaktadır [24]. Çalışma alanının ve yakın çevresinin jeoloji haritası Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası [23-24]

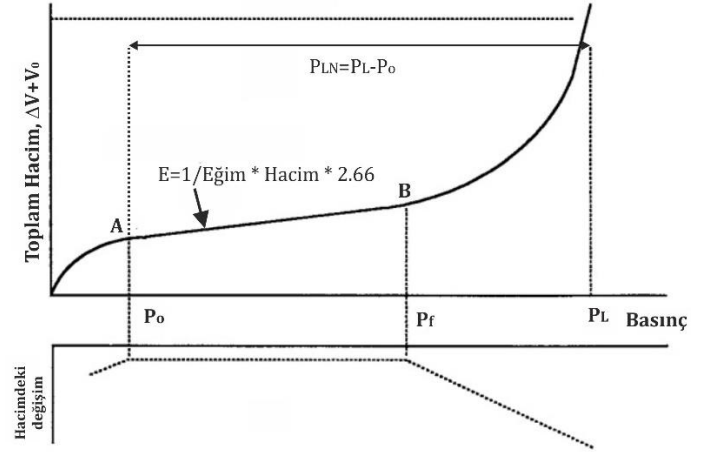


Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası [24]

3 Arazi ve laboratuvar çalışmaları

Çalışma kapsamında yapılan sondajlar alüvyonel zeminde gerçekleştirilmiş olup; bu kapsamda kohezyonlu zeminlere (kil ve silt) ait veriler değerlendirilmiştir. Alüvyonel zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik yerinde ve laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmaları sırasında yapılan yerinde deneylerden biri olan SPT'ye ait düzeltilmiş değerler (SPT-N₍₆₀₎) çalışma kapsamında girdi parametresi olarak kullanılmıştır. SPT bir sondaj kuyusunda istenilen seviyede, 63.5 kg ağırlığındaki bir tokmağın 76 cm yükseklikten düşürülmesi ve tokmağın toplamda 45 cm zemin içine penetre olması için gereken darbe sayılarını esas almaktadır. Her 15 cm'de bir darbe sayıları kaydedilmektedir ve ilk 15 cm örselenme durumuna karşı dikkate alınmamaktadır. Böylece geriye kalan 30 cm için SPT-N₍₃₀₎ değeri belirlenmektedir. Elde edilen bu ham veri için; örtü yükü düzeltmesi [25], enerji düzeltmesi, örnek alıcı, kuyu çapı, tij uzunluğu düzeltmeleri önerilmektedir [26]. SPT-N₍₃₀₎ değeri için enerji düzeltmesi, örnek alıcı, kuyu çapı ve tij uzunluğu düzeltmeleri yapılarak SPT-N₍₆₀₎ değeri belirlenmektedir. Çalışma kapsamında değerlendirilen bir diğer arazi deneyi ise presiyometredir. Arazi çalışmaları kapsamında Menard presiyometresi kullanılmıştır. Presiyometre deneyi ile zemine uygulanan gerilmeler ve birim deformasyonlar belirlenmektedir. Bu kapsamda arazi çalışmalarından elde edilen veriler ile P_{LN} ve E değerleri belirlenmiş ve kullanılmıştır. Arazi verilerinden elde edilerek çizilen Toplam Hacim-Basınç grafiği ve bu grafikten yararlanılarak P_{LN} ve E' nin nasıl hesaplanacağı Şekil 3' te görülmektedir [27].

Ayrıca arazi çalışmaları sırasında alınan örneklerden bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deney sonuçlarından %LL, %PI ve BHA çalışmada girdi parametresi olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. Gerilim-Birim deformasyon ve krip eğrisi [27]

4 Verileri değerlendirme

Çalışma kapsamında bir güzergah boyunca açılmış sondajlardan elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu amaçla, her bir veri grubu için toplam 350 veri seti kullanılmıştır. Bu veri setleri oluşturulurken; değerlendirilen her bir parametrenin diğer parametrelerle aynı seviyeye karşılık gelen değerleri dikkate alınmıştır. Eksik kalan seviyelere ait deney verileri kullanılamamıştır. Çalışmada malzemeye ait %LL, %PI, BHA girdi parametreleri olarak kullanılmış ve P_{LN} ve E ise çıktı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla her bir çıktı için dört ayrı model oluşturulmuştur. Her bir çıktıya ait modeller A ve B harfleriyle ifade edilmektedir. A harfi; P_{LN}'nin, B harfi ise; E'nin tahmin edilmeye çalışıldığı modelleri ifade etmektedir. Modeller iki ve üç girdi parametrelili olarak oluşturulmuştur. Buna göre; Model 1A (SPT-N₍₆₀₎ ve %LL), Model 2A (SPT-N₍₆₀₎ ve %PI) ve Model 3A (SPT-N₍₆₀₎ ve BHA) iki girdi parametrelili, Model 4A (SPT-N₍₆₀₎, %LL ve BHA) ise üç girdi parametrelili. Bu modeller için çıktı parametresi P_{LN} dir. Benzer şekilde; Model 1B (SPT-N₍₆₀₎ ve %LL), Model 2B (SPT-N₍₆₀₎ ve %PI) ve Model 3B (SPT-N₍₆₀₎ ve BHA) iki girdi parametrelili, Model 4B (SPT-N₍₆₀₎, %LL ve BHA) ise üç girdi parametrelili. Bu modeller için çıktı parametresi ise; E' dir.

Çalışmanın ilk aşamasında araziden ve laboratuvardan elde edilen verilere ait genel istatistiksel değerlendirmeler sunulmuştur. Parametrelerin birbirleri ile istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı değerlendirilmiştir. Tablo 1' de çalışma kapsamında değerlendirilen verilerin temel istatistiksel değerlendirmesi verilmiştir. Ayrıca burada sunulan çalışma kapsamında; SPT-N₍₆₀₎, %LL, %PI ve BHA (kN/m³) bağımsız değişkenlerinin birbirleri ile olan ilişkileri çoklu bağımlılık (multi collinearity) açısından değerlendirilmiştir (Tablo 2). Bu değerlendirmeye göre %LL ve %PI dışında genel olarak parametreler arasında düşük bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu durum gözönüne alındığında gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında %LL ve %PI aynı modeller içinde yer almamıştır.

Tablo 1. Temel tanımlayıcı istatistiksel değişkenler

Parametreler	Veri Sayısı	En Küçük	En Büyük	Ortalama	Standart Hata	Standart Sapma
SPT-N ₍₆₀₎	350	2.04	60.00	41.10	0.869	16.261
%LL	350	34.80	97.90	70.60	0.556	10.408
%PI	350	14.50	62.40	36.36	0.360	6.729
BHA (kN/m ³)	350	16.58	20.50	18.04	0.038	0.712
P _{LN} (MPa)	350	0.10	4.27	2.04	0.061	1.147
E (MPa)	350	0.98	86.72	21.93	0.883	16.512

Tablo 2. Girdi parametrelerine ait korelasyon matrisi (R²)

Parametreler	SPT-N ₍₆₀₎	%LL	%PI	BHA (kN/m ³)
SPT-N ₍₆₀₎	1.000	0.351	0.317	-0.262
%LL		1.000	0.875	-0.36
%PI			1.000	-0.151
BHA (kN/m ³)				1.000

Çalışma kapsamında tahmin edilmeye çalışılan P_{LN} ve E değerlerinin diğer parametreler ile olan ilişkileri eksponansiyel, doğrusal, logaritmik ve üstel fonksiyonlar kullanılarak analiz edilmiştir (Tablo 3 ve Tablo 4).

Tablo 3. Bağımlı değişkenin “P_{LN}” olduğu basit regresyon analizleri (R²)

Fonksiyon	Bağımlı Değişken	SPT-N ₍₆₀₎	%LL	%PI	BHA (kN/m ³)
Eksponansiyel	P _{LN} (MPa)	0.6965	0.2083	0.1623	0.1353
Doğrusal	P _{LN} (MPa)	0.6844	0.1743	0.1371	0.111
Logaritmik	P _{LN} (MPa)	0.6471	0.1813	0.1419	0.1105
Üstel	P _{LN} (MPa)	0.7564	0.2179	0.0168	0.1337

Tablo 4. Bağımlı değişkenin “E” olduğu basit regresyon analizleri (R²)

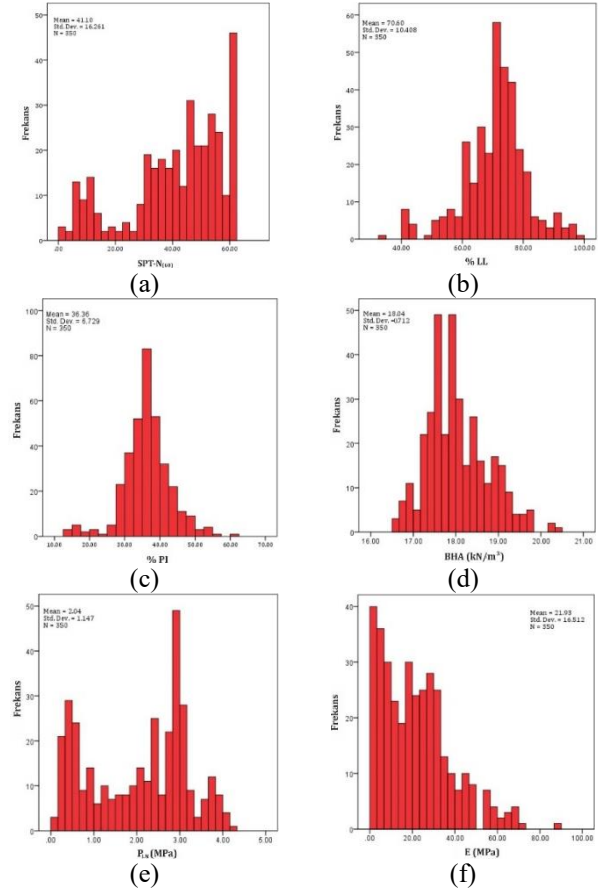
Fonksiyon	Bağımlı Değişken	SPT-N ₍₆₀₎	%LL	%PI	BHA (kN/m ³)
Eksponansiyel	E (MPa)	0.7041	0.1853	0.1432	0.1253
Doğrusal	E (MPa)	0.505	0.0996	0.0813	0.0643
Logaritmik	E (MPa)	0.414	0.1045	0.0851	0.0636
Üstel	E (MPa)	0.7127	0.1950	0.1502	0.1235

P_{LN} ve girdi parametreleri arasında yapılan basit regresyon analiz sonuçlarına göre; P_{LN} ve SPT-N₍₆₀₎ arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.7564 olup, üstel bir dağılım göstermektedir. P_{LN} ve %LL arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.2179 olup, üstel bir dağılım göstermektedir. P_{LN} ve %PI arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.1623 olup, eksponansiyel bir dağılım göstermektedir. P_{LN} ve BHA arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.1353 olup, eksponansiyel bir dağılım göstermektedir.

E ve girdi parametreleri arasında gerçekleştirilen basit regresyon analizlerine göre ise; E ve SPT-N₍₆₀₎ arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.7127 olup, üstel bir dağılım göstermektedir. E ve %LL arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.1950 olup, üstel bir dağılım göstermektedir. E ve %PI arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.1502 olup; üstel bir dağılım göstermektedir. E ve BHA arasında belirlenmiş en büyük determinasyon katsayısı 0.1253 olup, eksponansiyel bir dağılım göstermektedir.

Genel olarak basit regresyon analizleri değerlendirildiğinde; P_{LN} ile girdi parametreleri arasında elde edilen determinasyon katsayıları, E ve girdi parametreleri arasında elde edilen değerlerden daha yüksektir. Determinasyon katsayısı değerleri P_{LN} ve E için değerlendirildiğinde; diğer parametrelerle ilişkileri SPT-N₍₆₀₎ ile olan ilişkileri dışında istatistiksel olarak düşük çıkmaktadır. Ancak parametreler fiziksel olarak tahmin edilmek istenen parametreler üzerinde etkilidir. Bu nedenle tek bir parametrelili değil, iki ve üç girdili modeller oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında değerlendirilen verilere ait histogramlar Şekil 4’te verilmiştir. Çalışmada SPSS Statistics v23.0 [28] kullanılarak parametreler için normallik testi yapılmış, çarpıklık ve basıklık değerleri değerlendirildiğinde parametrelerin normal dağılıma uyduğu görülmüştür.



Şekil 4. Histogramlar, (a) SPT-N₍₆₀₎, (b) %LL, (c) %PI, (d) BHA, (e) P_{LN} ve (f) E

5 Modelleme çalışmaları

Çalışma kapsamında 350 adet veri setinin değerlendirilmesi ve P_{LN} ile E' 'nin tahmin edilmesi amacıyla üç farklı makine öğrenimi yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla; makine öğrenimi yapılırken toplam verinin %80'i eğitim, %20'si test verisi olarak kullanılmıştır. Eğitim ve test işlemleri 5 kez rastgele seçilmiş veriler için ayrı eğitim ve test veri setleri ile tekrarlanmıştır. Her çıktı parametresi için dört ayrı model oluşturulmuş ve üç makine öğrenimi yönteminin her biri bu modellere uygulanmıştır. Yapılan 5 ayrı eğitim ve test işleminden elde edilen sonuçlar R^2 ve RMSE değerleri dikkate alınarak; içlerinden en iyi doğruluk değerine sahip olanlar seçilmiştir. Her bir eğitim ve test işlemi Regresyon Ağaçları (RA), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Gauss Süreç Regresyonu (GSR) makine öğrenimi yöntemleri ile tekrarlanmıştır. Makine öğrenimi çalışmaları MATLAB 2020b yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [29].

5.1 Regresyon ağaçları

Regresyon ağaçları (RA), bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkisini belirlemeyi amaçlayan, topluluk üyelerini homojen alt sınıflara ayıran bir yöntemdir. Bu yöntem parametrik değildir. Bu yöntemde önce kök düğüm oluşturulmakta, ardından dallara ayırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu ayırma işlemi düğümdeki bireyler için belirlenen bağımsız değişkenler aynı değeri aldığı durumlarda durdurulmaktadır. RA yöntemi, benzerlik gösteren bireylerin aynı ağaç düğümünde toplanması esasına dayalıdır. RA yönteminde, ağacın oluşumu, budama ve en uygun ağaç yapısının seçilmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir [30]. Yüksek hataya sahip olan ve tahminlere düşük katkıda bulunan düğümler veya dalların atılması işlemi budama olarak bilinmektedir [31].

RA yönteminde tahmin edilen öz nitelik değerleri süreklilik gösteren gerçek sayılardır. Bu yöntemde tahmin değerlerinin karesel ortalama hatasını en aza indireyecek bölünmeler hesaplanarak ağacın büyümesi ve dallara ayrılması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Yapraklarda elde edilen tahminler düğüm için hesaplanan ağırlıklı ortalamalara bağlıdır [32].

Regresyon ağaçlarında üç ayırma kuralı uygulanmaktadır. Bunlar; Least Squares (LS), Clark&Pregibon (CP), Least Absolute Deviation (LAD). Genel olarak amaç, düğümleri olabildiğince homojen yapıya kavuşturmadır [33].

RA yöntemi, bağımsız değişkenleri aralıklara ayırmaktadır ve bu nedenle sürekli değil kesiklidir. Bundan dolayı belirli aralıklarda istenen tahminlerin sonuçları aynı çıkabilmektedir.

5.2 Destek vektör makineleri

Destek Vektör Makineleri (DVM), 1990'lı yıllarda Vapnik tarafından ortaya konulmuştur [34]. DVM algoritması, veriyle ilgili birleşik dağılım fonksiyonu bilgisine ihtiyaç duymadığından dağılımdan bağımsız çalışabilen bir öğrenme algoritmasıdır [35]. DVM'nin amacı sınıfların birbirinden ayrılması için optimum ayırma düzleminin (hiperdüzlem) bulunmasıdır. Burada amaç farklı

sınıfların destek vektörleri arasındaki uzaklığın en büyük olmasıdır [36]. Destek vektör makinesi, verileri en uygun şekilde iki gruba ayıran n-boyutlu bir hiperdüzlem oluşturmaktadır. DVM'ler istatistik ve makine öğrenimi yöntemlerinden sinir ağlarının çeşitli tekniklerini birlikte kullanılmaktadırlar [37-38]. DVM, yüksek genelleme yeteneğine sahip olduğundan birçok farklı alanda (ses tanıma, yüz tanıma, metin sınıflandırma vb.) kullanılmaktadır [39-40].

DVM yöntemi önceleri doğrusal verilerin iki sınıfa ayrılması için tasarlanmışsa da günümüzde çok sınıflı ve doğrusal olmayan veriler üzerinde tahminler üretmek için de kullanılmaktadır. Doğrusal ayrılabilen veriler için genellikle iki sınıfa ayrılabilen örnek veriler kullanılarak yapılan eğitimler sonucu elde edilen karar fonksiyonu sayesinde verilerin birbirinden ayrılması amaçlanmaktadır [41]. Optimum hiperdüzleme ait denklem [Denklem \(1\)](#) ve [Denklem 2](#)'de verilmektedir.

$$w \cdot x_i + b \geq +1, y = +1 \quad (1)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1, y = -1 \quad (2)$$

Burada $x \in R^N$ N-boyutlu uzayı, $y \in \{-1, +1\}$ sınıf etiketlerini, w ağırlık vektörünü, b eğilim değerini göstermektedir [42-43].

Bazen verileri doğrusal olarak ayırmak mümkün olmayabilmektedir. Bu durumda doğrusal ayıramayan verilerin yanlış sınıflandırılmaması için düzenleme parametresi ve yapay değişken kullanılarak optimizasyon problemi çözülmeye çalışılmaktadır [41].

5.3 Gauss süreç regresyonu

Gauss süreç regresyonu (GSR), daha çok doğrusal olmayan regresyon problemlerini çözmek için olasılıklı, parametrik olmayan problemlerin çözümünde tercih edilen etkin bir makine öğrenme yöntemidir [44-45]. Bu yöntem temelde Bayesci bir yaklaşım sunmaktadır. GSR, küçük veri kümelerinde başarılı sonuçlar üretebilmektedir ve tahminlerde belirsizlik ölçümleri yapılabilecek özelliklere sahiptir [46]. GSR ile olası en doğru seçeneğin belirlenebilmesine olanak sağlayan farklı kovaryans fonksiyonları kullanılabilir. Doğrusal, üstel, matern, rasyonel kuadratik, karesi alınmış üstel gibi farklı fonksiyonlar kullanılmaktadır [47]. Gauss süreci, gauss dağılımının genelleştirilmiş bir şekli olup, fonksiyonlar arasındaki dağılımdır. Gauss süreç fonksiyonu $f(x)$ aşağıda [Denklem \(3\)](#) ifadesiyle verilmektedir [48].

$$f(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (3)$$

Burada $m(x)$ ortalama fonksiyonu, $k(x, x')$ kovaryans fonksiyonudur. Ortalama fonksiyonu [Denklem \(4\)](#)'te, kovaryans fonksiyonu ise [Denklem \(5\)](#)'te verilmektedir.

$$m(x) = E[f(x)] \quad (4)$$

$$k(x, x') = E[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (5)$$

Gauss sürecinin hiperparametreleri ortalama fonksiyonu ve kovaryans fonksiyonudur [49]. Ortalama fonksiyonu, x girdisine sahip $f(x)$ fonksiyonunun beklenen değerini göstermekte ve genelde basitleştirme amacıyla sıfır olarak alınmaktadır. Ortalama fonksiyonu için güven düzeyinin bir ölçüsü kovaryans fonksiyonudur [50].

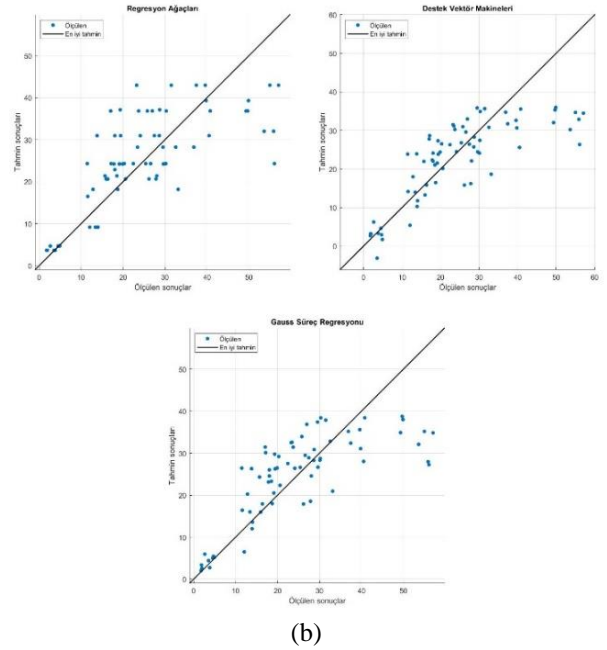
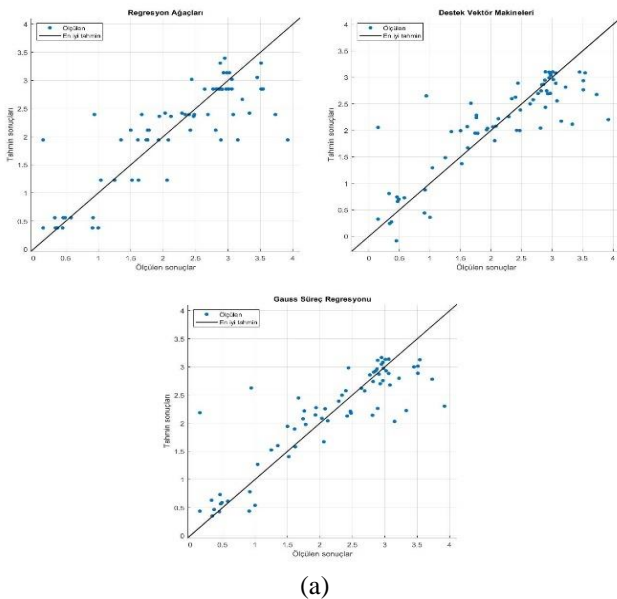
6 Performans değerlendirme

Çalışma kapsamında killi ve siltli birimlerin P_{LN} ve E değerlerinin tahmin edilmesine yönelik 3 farklı makine öğrenimi yöntemi, 4'er farklı model olmak üzere toplam 8 modele uygulanmıştır.

Her bir modele uygulanan makine öğrenimi yöntemlerinin performans değerlendirme için determinasyon katsayısı (R^2) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE-Root Mean Square Error) Denklem (6) kullanılmıştır. Teorik olarak bir istatistiksel modelde en yüksek tahmin değeri R^2 için 1 ve RMSE için ise 0'dır. Bu çalışma kapsamında R^2 ve RMSE genel olarak yöntemlerin karşılaştırması için yeterli performans indisleri olarak görülmektedir. Modeller 5 ayrı rastgele seçilmiş veri seti için analiz edilmiş ve öncelikle o model için en iyi test performansı veren veri seti ve sonuçları belirlenmiştir. Tablo 5'te her bir model için seçilmiş en iyi veri setine ait R^2 ve RMSE değerleri yer almaktadır. Ayrıca çalışmada her bir model için ölçülen ve tahmin edilen sonuçlara ait korelasyon grafikleri çizilmiş olup, Şekil 5'te model çıktısı P_{LN} olan 3 girdi parametrelili Model 4A ve model çıktısı E olan yine 3 girdi parametrelili Model 4B'ye ait korelasyon grafikleri örnek olarak verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (6)$$

Burada y ölçülen, y' ise tahmin edilen değerleri ifade etmektedir.



Şekil. 5. Makine öğrenimi yöntemlerine ait ölçülen sonuçlar ve tahmin sonuçları arasındaki korelasyon grafikleri (a) Model 4A (b) Model 4B

7 Sonuçlar ve tartışma

P_{LN} ve E kaya ve toprak zeminlerin yerinde deformasyon özelliklerinin ortaya konulmasında iki önemli parametre olup, mühendislik tasarımlarında kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında bir güzergah sondajında geçilen killi ve siltli birimlerden elde edilmiş olan 350 adet veri seti değerlendirilmiş P_{LN} ve E değerlerinin üç farklı makine öğrenimi yöntemi kullanılarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, regresyon ağaçları, destek vektör makineleri ve gauss süreci regresyonu yöntemleri uygulanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında parametrelerin istatistiksel olarak incelenmesine yönelik değerlendirmeler yapılmış, parametrelerin birbirleri ile olan ilişkileri ortaya konulmuş ve modelleme aşamasına geçilmiştir. Çalışmada P_{LN} 'nin ve E 'nin ayrı ayrı çıktı olarak yer aldığı 4'er farklı model oluşturulmuştur. Bu modeller iki ve üç girdi parametrelili olarak inşa edilmiş olup; SPT- $N_{(60)}$, %LL, %PI ve BHA modeller için girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Her bir model için üç ayrı makine öğrenimi yöntemi, rastgele seçilmiş (%80 eğitim verisi, %20 test verisi) beş ayrı veri seti için çalıştırılmış ve bu veri setlerinden en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerlerini veren test veri setine ait değerler Tablo 5'e işlenmiştir. Buna göre;

- Her iki çıktı modellerine ait makine öğrenimi yöntemleri karşılaştırıldığında; destek vektör makineleri ve gauss süreci regresyon yöntemlerinin regresyon ağaçları yöntemine göre daha yüksek performans verdiği görülmektedir.

Tablo 5. Her bir modele ait performans indisleri

Modeller	RA Yöntemi		DVM Yöntemi		GSR Yöntemi	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE
	Test	Test	Test	Test	Test	Test
Model 1A (SPT-N ₍₆₀₎ +LL, P _{LN})	0.69	0.59	0.74	0.54	0.74	0.54
Model 2A (SPT-N ₍₆₀₎ +PI, P _{LN})	0.69	0.57	0.75	0.52	0.75	0.51
Model 3 A (SPT-N ₍₆₀₎ +BHA, P _{LN})	0.71	0.57	0.75	0.53	0.72	0.56
Model 4A (SPT-N ₍₆₀₎ + LL+BHA, P _{LN})	0.71	0.56	0.73	0.54	0.75	0.52
Model 1B (SPT-N ₍₆₀₎ +LL, E)	0.50	11.88	0.51	11.77	0.57	11.10
Model 2B (SPT-N ₍₆₀₎ +PI, E)	0.55	11.19	0.56	11.05	0.59	10.63
Model 3B (SPT-N ₍₆₀₎ +BHA, E)	0.49	11.22	0.51	11.06	0.52	10.98
Model 4B (SPT-N ₍₆₀₎ + LL+BHA, E)	0.54	9.64	0.59	9.16	0.58	9.31

- P_{LN}'nin tahmin edildiği modellerde genel olarak destek vektör makineleri ve gauss süreç regresyonu yöntemleri birbirine yakın performans göstermektedir.
- E'nin tahmininde oluşturulan modellerde ise; destek vektör makineleri ve gauss süreç regresyonu yöntemleri birbirine yakın performans göstermekle birlikte, bu modellerde gauss süreç regresyonu daha yüksek performans ortaya koymuştur.
- P_{LN}'nin ve E'nin çıktığı olduğu tüm modellere ve uygulanan makine öğrenimi yöntemlerinin tamamının performansına bakıldığında ise; P_{LN}'nin tahmin edildiği tüm modellerin tüm makine öğrenmesi yöntemlerindeki performansı, E için elde edilen performans değerlerinden belirgin bir şekilde yüksektir. Kısaca, P_{LN} değerleri çalışma kapsamında uygulanan makine öğrenmesi yöntemleriyle E'den daha yüksek performansla tahmin edilmiştir.

P_{LN} ve E parametrelerinin arazide elde edilmesi; karmaşık deney aletlerinin kullanımı, zaman kaybı, yüksek maliyetler gibi durumlara neden olabilmektedir. Genel olarak bu durumların üstesinden gelebilmek için presiyometre parametrelerinin tahminine yönelik; literatürde gerek ampirik [1-7] ve gerekse makine öğrenimi temelli yaklaşımlar [19-22] kullanılmıştır. Özellikle son dönemlerde birçok mühendislik alanında yaygın kullanılan makine öğrenimi yöntemlerinin yüksek performans verdiği, temsil kabiliyetlerinin fazla olduğu bu çalışmalarda ifade edilmiştir [19-22]. Yine bu çalışmalarda makine öğrenimi temelli yöntemlerin genel olarak; hızlı, basit ve anlaşılır oldukları ifade edilmiş, veri sayısının ve kalitesinin önemine değinilmiş ve bu yöntemlerin temsil kabiliyetlerinin yüksek olmasına vurgu yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, literatürde çeşitli esnek hesaplama yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalarda da belirtildiği gibi yüksek tahmin performansı göstermiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak ampirik bağıntılar kullanılmamış ve önceki bağıntıların doğrulanmasına yönelik bir çalışma yapılmamıştır. Çalışmada diğer

araştırmalardan farklı olarak RA, DVM ve GSR olmak üzere üç farklı makine öğrenimi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler güçlü tahmin performansına sahip yöntemlerdir. Tüm esnek hesaplama yöntemlerinde olduğu gibi bu yöntemlerin başarısı da; kaliteli, yeterli sayıda veri ile eğitilmesine ve test edilmesine bağlıdır. Veri sayısı arttıkça çalışmanın doğruluğu ve temsil kapasitesi artmaktadır. Bu ve benzer çalışmalarda sınırlayıcı bir başka durum ise; kullanılan parametrelerin veri aralıklarıdır. Çalışmada analiz edilen modeller kullanılan parametrelerin veri aralıkları içinde anlaşılmıştır.

Sonuç olarak; bu çalışma kapsamında uygulanan makine öğrenimi yöntemleri ve değerlendirmeleri; bilimsel anlamda bu tür çalışmaların yaygınlaşmasına katkı sağlamakta, deneysel ve yerinde yapılan araştırma zamanını ve maliyetini düşürmekte ve bu alanda yapılan çalışmaların daha anlaşılır olmasına destek sağlamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar verilerin temini için göstermiş oldukları destekten dolayı Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'ne içten teşekkürlerini sunar.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 8

Kaynaklar

- [1] A. Kayabasi, C. Gokceoglu, and M. Ercanoğlu, Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40 (1), 55–63, 2003.
- [2] C. Gokceoglu, H. Sonmez, and A. Kayabasi, Predicting the deformation moduli of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40 (5), 701–710, 2003.
- [3] E. Hoek and M. S. Diederichs, Empirical estimation of rock mass modulus. *Int. J. rock Mech. Min. Sci.*, 43 (2), 203–215, 2006.
- [4] L. Zhang and H. H. Einstein, Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses. *Int. J. rock Mech. Min. Sci.*, 41 (2), 337–341, 2004.

- [5] J. Galera, Z. Alvarez, and Z. Bienawski, Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison between pressure meter and dilatometer tests with RMR predictions. in *ISPS-PRESSIO 2005*, 2005.
- [6] A. Celal, Silt Biriminde (Kastamonu, Türkiye) Yapılan Menard Presiyometre, Standart Penetrasyon ve Laboratuvar Deney Sonuçları Arasındaki İlişkilerin Araştırılması. *Tek. dergi*, 25 (122), 6679–6698, 2013.
- [7] N. S. Isik, R. Ulusay, and V. Doyuran, Deformation modulus of heavily jointed–sheared and blocky greywackes by pressuremeter tests: numerical, experimental and empirical assessments. *Eng. Geol.*, 101 (3-4), 269–282, 2008.
- [8] Y. Zhang, J. Qiu, Y. Zhang, and R. Liao, The Establishment of a Constitutive Model of Sand Under Monotonic Loading by Adopting the Support Vector Machine (SVM). *Arab. J. Sci. Eng.*, 47 (4), 4421–4435, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06093-6>
- [9] Y. Li, H. Rahardjo, A. Satyanaga, S. Rangarajan, and D. T.-T. Lee, Soil database development with the application of machine learning methods in soil properties prediction. *Eng. Geol.*, 306, 106769, 2022.
- [10] S. Wu, J. M. Zhang, and R. Wang, Machine learning method for CPTu based 3D stratification of New Zealand geotechnical database sites. *Adv. Eng. Informatics*, 50, 101397, <https://doi.org/10.1016/J.AEI.2021.101397>
- [11] J. Velicka, M. Pies, and R. Hajovsky, Design of methods for impact detection in geotechnical protection fences using Machine Learning. *IFAC-PapersOnLine*, 55 (4) 91–96, 2022, <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2022.06.015>
- [12] N. Puri, H. D. Prasad, and A. Jain, Prediction of Geotechnical Parameters Using Machine Learning Techniques. *Procedia Comput. Sci.*, 125, 509–517, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2017.12.066>
- [13] N. Ceryan, E. C. Ozkat, N. Korkmaz Can, and S. Ceryan, Machine learning models to estimate the elastic modulus of weathered magmatic rocks. *Environ. Earth Sci.*, 80 (12), 448, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09738-9>
- [14] N. M. Shahani, X. Zheng, X. Guo, and X. Wei, Machine Learning-Based Intelligent Prediction of Elastic Modulus of Rocks at Thar Coalfield. *Sustainability*, 14 (6), 3689, 2022.
- [15] A. Majdi and M. Beiki, Evolving neural network using a genetic algorithm for predicting the deformation modulus of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47 (2), 246–253, 2010. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2009.09.011>
- [16] H. Fattahi, M. A. Ebrahimi Farsangi, S. Shojaee, K. Nekooei, and H. Mansouri, Application of the hybrid harmony search with support vector machine for identification and classification of damaged zone around underground spaces TT ST, 3 (2), 345–358, 2013. <http://ijoce.iust.ac.ir/article-1-137-en.html>
- [17] A. Majdi and M. Beiki, Applying evolutionary optimization algorithms for improving fuzzy C-mean clustering performance to predict the deformation modulus of rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 113, 172–182, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2018.10.030>
- [18] M. Hasanipanah, M. Jamei, A. S. Mohammed, M. N. Amar, O. Hocine, and K. M. Khedher, Intelligent prediction of rock mass deformation modulus through three optimized cascaded forward neural network models. *Earth Sci. Informatics*, 1–11, 2022.
- [19] A. Rashed, J. B. Bazaz, and A. H. Alavi, Nonlinear modeling of soil deformation modulus through LQP-based interpretation of pressuremeter test results. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 25 (7), 1437–1449, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAL.2011.11.008>
- [20] A. H. Alavi, A. H. Gandomi, H. C. Nejad, A. Mollahasani, and A. Rashed. Design equations for prediction of pressuremeter soil deformation moduli utilizing expression programming systems. *Neural Comput. Appl.*, 23 (6), 1771–1786, 2013.
- [21] S. Alemdag, Z. Gurocak, A. Cevik, A. F. Cabalar, and C. Gokceoglu, Modeling deformation modulus of a stratified sedimentary rock mass using neural network, fuzzy inference and genetic programming. *Eng. Geol.*, 203, 70–82, 2016.
- [22] R. Z. Moayed, A. Kordnaeij, and H. Mola-Abasi, Pressuremeter modulus and limit pressure of clayey soils using GMDH-type neural network and genetic algorithms. *Geotech. Geol. Eng.*, 36 (1), 165–178, 2018.
- [23] Google Earth. <http://www.google.com/intl/tr/earth/index.html>, Accessed:26.07.2022
- [24] MTA Genel Müdürlüğü. Yer Bilimleri Harita Görüntüleyici. <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>, Accessed:25.07.2022.
- [25] S. S. C. Liao and R. V Whitman, Overburden correction factors for SPT in sand. *J. Geotech. Eng.*, 112 (3), 373–377, 1986.
- [26] A. W. Skempton, The colloidal activity of clays. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland 1, 57, 1953.
- [27] B. G. Clarke, Pressuremeters in geotechnical design. CRC Press, 1994.
- [28] IBM SPSS Statistics v23.0. <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-23>, Accessed:03.08.2022.
- [29] MATLAB 2020b, https://www.mathworks.com/products/new_products/release2020b.html, Accessed:03.08.2022.
- [30] Y. B. Yücel, Yaşam memnuniyetini etkileyen faktörlerin sınıflama ve regresyon ağacı ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.
- [31] M. Mendeş and E. Akkartal, Regression tree analysis for predicting slaughter weight in broilers. *Italian Journal of Animal Science*, 8 (4), 615–624, 2009.
- [32] L. Rokach and O. Z. Maimon, Data mining with decision trees: theory and applications. 2nd Edition ed. Singapore: World Scientific, 2014.

- [33] G. Temel Orekiçi, Sınıflama ve regresyon ağaçları. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2004.
- [34] V. Vapnik, The nature of statistical learning theory. NY: Springer-Verlag, 1995.
- [35] K. Soman, R. Loganathan, and V. Ajay, Machine learning with SVM and other kernel methods. PHI Learning Pvt. Ltd., 2009.
- [36] S. Ayhan and Ş. Erdoğmuş, Destek vektör makineleriyle sınıflandırma problemlerinin çözümü için çekirdek fonksiyonu seçimi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 9 (1), 175-201, 2014.
- [37] S. Haykin, Neural Networks, a comprehensive foundation. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 7458, 161-175, 1999.
- [38] S. Tolun, Destek vektör makineleri: Banka başarısızlığının tahmini üzerine bir uygulama. Doktora Tezi, İşletme Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [39] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor, An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods. Cambridge university press, 2000.
- [40] B. Schölkopf, J. C. B. Christopher, and J. A. Smola, Advances in kernel methods (Support Vector Learning). The MIT Press, Cambridge, England, 1999.
- [41] T. Kavzoğlu and İ. Çölkesen, Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi. Harita Dergisi, 144 (7), 73-82, 2010.
- [42] S. Huang, N. Cai, P. P. Pacheco, S. Narrandes, Y. Wang, and W. Xu, Applications of support vector machine (SVM) learning in cancer genomics. Cancer genomics & proteomics, 15 (1), 41-51, 2018.
- [43] E. E. Osuna, Support vector machines: Training and applications. Massachusetts Institute of Technology, USA, 1998.
- [44] K. Liu, X. Hu, Z. Wei, Y. Li, and Y. Jiang, Modified Gaussian process regression models for cyclic capacity prediction of lithium-ion batteries. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 5(4), 1225-1236, 2019.
- [45] M. Acı and A. G. Doğansoy, Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak e-perakende sektörüne yönelik talep tahmini. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37 (3), 1325-1340, 2022.
- [46] B. Ateş, Gemi yapılarında gerilme yığılması öngörülerinin kaba ağ yapısı ve makine öğrenmesi ile gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gemi ve Deniz Teknolojileri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2020.
- [47] Y. Heo and V. M. Zavala, Gaussian process modeling for measurement and verification of building energy savings. Energy and Buildings, 53, 7-18, 2012.
- [48] C. Rasmussen and C. Williams, Gaussian processes for machine learning. USA MIT Press, 2006.
- [49] C. K. Arthur, V. A. Temeng, and Y. Y. Ziggah. Novel approach to predicting blast-induced ground vibration using Gaussian process regression. Engineering with Computers, 36 (1), 29-42, 2020.
- [50] K. Yazıcı, Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak kısa dönem rüzgar gücü tahmini, Yüksek Lisans Tezi Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2021.





Zeminlerin dispersibilite sınıfının XRF analiz sonuçlarına dayalı olarak Genetik Programlama (GP) ile tahmini

Prediction of dispersibility class of soils with Genetic Programming (GP) based on XRF analysis results

Sadettin Topçu^{1,*} , Evren Seyrek² 

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler MYO, 43000, Kütahya, Türkiye

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43000, Kütahya, Türkiye

Öz

Dispersif zeminler, dolgu barajların çekirdek yapısında kullanıldığında erozyon hassasiyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle içsel erozyona neden olarak bu tür barajların göçmesine neden olmaktadır. Bu tür zeminlerin tasarım aşamasında belirlenerek dolgu barajların inşaatında kullanılmaması gerekmektedir. Dispersif zeminler; fiziksel (dağılma deneyi, çifte hidrometre deneyi ve iğne deliği deneyi) ve kimyasal (boşluk sıvısının kimyasal içeriği) deneyler ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ise alternatif bir yöntem olarak XRF (X-Işını Floresans) analiz sonuçları kullanılarak genetik programlama (GP) yardımıyla zeminlerin dispersibilite sınıfının tahmin edilebilmesi için bilgisayar modelleri geliştirilmiştir. Genetik İfade Programlama (GİP) ile oluşturulan tahmin modellerinde kullanılan 181 adet verinin % 66.9'u eğitim verisi; geri kalan ise test verisi olarak kullanılmıştır. Majör (SiO₂, Al₂O₃) ve minör (MgO, CaO, Na₂O, K₂O) oksitlerin girdi verisi olarak kullanıldığı bilgisayar modellerinde zeminler dispersif (D) ve dispersif olmayan zeminler (ND) olarak yüksek oranlarda başarılı bir şekilde tahmin edilmektedir. En başarılı tahmin modeli tüm veri seti içinde SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO ve Na₂O girdi verilerinden oluşan modeldir.

Abstract

When dispersive soils are used in the core structure of embankment dams, due to their high erosion sensitivity, they cause internal erosion and cause such dams to collapse. Such soils should be determined at the design stage and not used in the construction of fill dams. Dispersive soils can be determined by physical (Crumb test, double hydrometer test and pinhole test) and chemical (chemical content of the pore fluid) experiments. In this study, as an alternative method, computer models have been developed to predict the dispersibility class of soils with the help of genetic programming (GP) using XRF (X-Ray Fluorescence) analysis results. 66.9% of the 181 data used in prediction models created with Genetic Expression Programming (GEP) are training data; the remainder was used as test data. In computer models where major (SiO₂, Al₂O₃) and minor (MgO, CaO, Na₂O, K₂O) oxides are used as input data, soils are successfully predicted as dispersive (D) and non-dispersive soils (ND) at high rates. The most successful forecasting model is the one that consists of SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO and Na₂O input data in the entire data set.

Anahtar kelimeler: Dolgu baraj, Dispersif zemin, Genetik programlama, XRF analizi

Keywords: Embankment dam, Dispersive soil, Genetic programming, XRF analysis

1 Giriş

Suya istinat eden toprak yapılarında ince daneli zeminlerin erozyon direncinin belirlenmesi, bu yapıların kısa ve uzun dönemli güvenliği açısından önem arz etmektedir. Buna göre ince daneli zeminlerde erozyon hassasiyeti yüksek ve erozyon direnci çok düşük olarak bilinen dispersif zeminlerin tanımlanması bu yapıların güvenliği açısından en kritik işlemdir. Literatürde dispersif zeminlerin tanımlanması amacıyla önerilen farklı yaklaşımlar bulunmaktadır.

Erozif ve erozif olmayan zeminleri tanımlamak için pipet metodu kullanılarak bir dispersiyon yüzdesi tanımlanmıştır [1]. İlk defa SCS çifte hidrometre deneyinin ana prensipleri anlatılmış ve dispersibilitenin tanımlanmasında kullanılan dispersiyon yüzdesi önerilmiştir [2]. Dispersiyon yüzdesi

belirlenirken [1]'de olduğu gibi pipet metodu kullanılmış fakat pipet metodunda ince dane oranı yerine kil oranı dikkate alınmıştır [3]. 1977 yılında gerçekleştirilen çalışmada ise kil oranı pipet metodu yerine hidrometre yöntemiyle belirlenerek "SCS Çifte Hidrometre Deneyi" geliştirilmiştir [4]. Borulanmanın görüldüğü toprak dolgu barajlardaki örneklerde yapılan çifte hidrometre deneyinde zeminlerin % 85'inde dispersiyon yüzdesinin 30 ve üzeri olduğu görülmüştür.

Literatürde boşluk sıvısı üzerinden yapılan dispersibilite değerlendirmeleri de dikkati çekmektedir. İnce daneli zeminlerin boşluk sıvısının kimyasal analizinden elde edilen değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerlerine bağlı olarak dispersibilite tanımlaması yapılmıştır [5]. Gerber ve Harmse [6] dispersibilitenin tanımlanabilmesi için değişebilir sodyum

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sadettin.topcu@dpu.edu.tr. (S. Topçu)

Geliş / Received: 21.09.2022 Kabul / Accepted: 29.09.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1178313

yüzdesi (ESP) ve katyon değişim kapasitesi (CEC) değerine bağlı bir değerlendirme kartı ile zeminin pH, elektriksel iletkenlik ve boşluk sıvısının sodyum adsorpsiyon oranını (SAR) dikkate alan bir işlem ağı önermiştir. Lityum katyonunun sodyuma göre daha fazla reaktif olmasından dolayı ince daneli zeminlerin dispersif göçmesinde sodyumdan daha etkili bir alkali katyon olduğu gözlemlenmiştir[7].

Dispersif zeminlerin tanımlanmasında Emerson [8] tarafından “Emerson Dağılma Deneyi” geliştirilmiştir. Zeminlerin durağan bir saf suda göstermiş oldukları dağılma davranışı yedi farklı şekilde kategorize edilmiştir. 1976 yılında Sherard vd. [9] tarafından dispersif zeminlerin tanımlanmasında yarı-model deney sistemi olan iğne deliği deneyi geliştirilmiştir. Emerson [8] tarafından tanımlanan yedi farklı kategori dört farklı kategoriye düşürülmüştür [10]. Bunun yanında iğne deliği deneyi sonuçları esas alınarak, dispersibiliteyi tanımlamak için boşluk sıvısının toplam çözünmüş tuz miktarı ($TDS=Na+Ca+Mg+K$) ve sodyum yüzdesine (Na %) bağlı bir tasarım kartı geliştirmişlerdir.

Son yıllarda dispersif zeminleri tanımlamak için kullanılan yöntemlerin birbirlerine göre mukayesesine yönelik çalışmalar özellikle dikkati çekmektedir. Savaş [11] iğne deliği deneyinde büyük boyutlu zemin örneklerindeki dispersibilite tanımlamaların daha gerçekçi olduğunu ifade etmiştir. Doğrudan fiziksel ve kimyasal deney sonuçlarına dayalı değerlendirme dışında farklı tahmin yöntemleri de literatürde gittikçe yer bulmaya başlamıştır. Fiziksel (iğne deliği deneyi, çifte hidrometre) ve kimyasal ($TDS-Na$ (%) ve ESP-CEC) deneylerden elde edilen dispersibilite tanımlamaları, bulanık mantık yönteminde kombine edilerek daha objektif ve gerçekçi dispersibilite tanımlamaları yapılmıştır [12]. Sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) değerinden farklı olarak K^* ’yı da dikkate alan stabilite katsayısı, ince daneli zeminlerin dispersibilitesini tanımlamak için geliştirilmiştir [13]. Bir başka çalışmada ise boşluk sıvısındaki Na, K, Mg ve Ca için farklı ağırlıkta oranlar verilerek elde edilen net dispersif yük ile dispersiyon yüzdesi arasında doğrusal ve çok anlamlı bir ilişki bulunmuştur [14]. Turgut vd. [15] lojistik regresyon yöntemiyle geliştirilen formülle, ince daneli zeminlerin sodyum yüzdesi ve toplam çözünmüş tuz miktarlarına göre dispersibilite sınıfını tahmin edebilmiştir.

Son yıllarda biyolojik evrim sürecini taklit eden genetik algoritmalar (GA) ve Genetik Programlama (GP) birçok alanda olduğu gibi Geoteknik Mühendisliği alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Zeminlerin sınıflandırılması, sıvılaşma riski, ince daneli zeminlerin şişme karakteristiği ve zeminlerin esneklik modülü başarıyla tahmin edilmiştir [16-19].

İnce daneli zeminlerde dispersibilite özelliklerinin tanımlanması için fiziksel (Dağılma deneyi, çifte hidrometre deneyi ve iğne deliği deneyi) ve kimyasal deneyler (Boşluk sıvısının kimyasal analizi) yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ise, çok uzun zaman ve çok fazla örnek malzeme gerektiren bu deneyler yerine çok az miktarda örnek ile daha hızlı gerçekleştirilecek XRF analizinin sonuçları kullanılarak dispersibilite sınıfının belirlenebilmesi için GİP ile tahminleme modelleri oluşturulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 Genetik algoritma (GA) ve genetik ifade programlama (GİP)

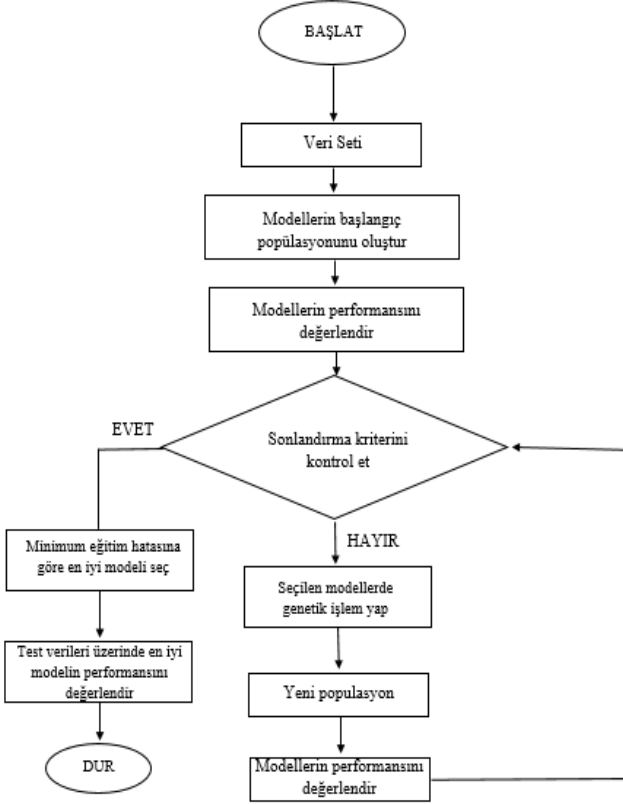
GA; 1970'lerde John Holland ve ekibi tarafından popüler hale getirilen bir evrimsel algoritma sınıfıdır. Genetik algoritmalar canlılardaki gen yapılarını ve biyolojik evrim sürecindeki yöntemleri dikkate alan sezgisel yaklaşımlardır. Bu algoritmada iterasyonlardaki mutasyon ve çaprazlamalarla elde edilen en iyi kromozomlar bundan sonraki popülasyonda yer alan bireylere aktarılmaktadır. Genetik algoritmada bireyleri kromozomlar; genleri kromozomlar içinde yer alan bilgi; popülasyon ise kromozomların bir araya gelmesinden oluşan toplumu ifade eder. Genetik algoritmadaki biyolojik evrimsel süreçte iki temel esas keşif ve faydalanmadır [20].

Popülasyon çeşitliliği, keşif esnasında iki temel genetik operatör olan çaprazlama ve mutasyon ile olur. Çaprazlamada iki ebeveyn kromozomdan gelen genetik bilgiler birleştirilerek yeni bir yavru kromozom oluşturulur. Mutasyonda ise ebeveyn kromozomlarında bulunan genlerin bilgileri rastgele değiştirilir. Faydalanma ile ise her keşif aşamasında en uygun kromozomlar seçilerek popülasyon çeşitliliği azaltılır. Böylelikle en iyi uyum sağlayan bireylerin (kromozomların) hayatına devam etmesine izin verilir. Genetik algoritmadaki evrimsel süreç bazı yakınsama kriterleri temelinde sonlandırılır. Bazen maksimum nesil sayısı tanımlanır bazen de en iyi uygunluk değerini değiştirmeden oluşturulan çok sayıda nesil olabildiğinde de işleme son verilebilir.

GP ise evrimsel algoritmalar ailesine ait GA'nın bir dalıdır ve ilk olarak Koza [21] tarafından önerilmiştir. GP, GA'ya benzerdir, fakat genetik programlama çözümlerini genetik algoritmadaki gibi kavrama yoluyla değil de “ayrışan ağaç” yapısını kullanarak yapar. Bu teknik gerçek bir “aşağıdan yukarıya” süreçtir. Çünkü bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi oluşturan yapı için hiçbir kabul yoktur ve uygun bir ilişki sadece kullanılan veri seti için tanımlanmaktadır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında kurulan ilişki mantıksal olabilir. Bununla birlikte tanıdık veya tanıdık olmayan matematiksel fonksiyonlar şeklinde de olabilir. GP'da bu ilişkilerin hayata geçirilmesinde iki bileşen vardır: i) RNA'nın rolünü taklit eden temel operatörlerden oluşan ayrışan ağaç ii) Kromozomların rolünü taklit eden fonksiyonlar ve onların bağlantı seti olan parametrelerin gerçek bileşenleri. Bu iki bileşen birlikte çalıştığında, ancak o zaman evrimsel süreçlerin verimli öykünmesi mümkün hale gelebilmektedir [22].

GİP ise, öğrenilmiş veya keşfedilmiş bilgilerden bilgisayar modelleri oluşturmak için Ferreira [23] tarafından geliştirilmiş yeni bir tekniktir. GİP'nin, GP'dan temel farkı bireylerin yapısıdır. GP'da bireyler, ayrıştırma ağaçlarıdır. Farklı boyut ve şekillerde doğrusal olmayan varlıklardır. GİP'da ise bireyler, GA'da olduğu gibi sabit uzunlukta doğrusal diziler olarak kodlanır (genom veya kromozomlar), daha sonra farklı boyut ve şekillerde doğrusal olmayan varlıklar (ayrıştırma ağacı) olarak ifade edilir. Bu çalışmada GeneXproTools 5.0 programı (www.gepsoft.com) kullanılarak oluşturulan modellerde GİP esnasında XRF analiz sonuçları ile ince daneli zeminlerin dispersibilite sınıfları tahmin edilmiştir. GİP için akış şeması Şekil 1'de verilmektedir. XRF analizi cihaz

organizasyonlu analitik analiz tekniklerinden olup, her çeşit örnekte gaz fazı hariç tüm fazlarda elementel analizi yapmak için en geçerli yöntemlerdendir. Hızlı, kesin ve tekrarlanabilir sonuçlar veren bu analiz yöntemi metal, çimento, petrol, mineraloji, madencilik, jeoloji ve atık kimyasında çokça kullanılmaktadır [24].



Şekil 1. GİP için işlem akış şeması

2.2 Veri seti

XRF analiz sonuçlarını kullanarak genetik algoritmalar yardımıyla zeminlerin dispersibilite özelliklerini veya dispersibilite sınıflarını tahmin etmek için literatürde yapılmış çalışmalardan yararlanılmıştır (Tablo 1) Zeminlerde dispersibilite sınıfları üçe ayrılmaktadır: D: Dispersif zemin, I: Ara zemin, ND: Dispersif olmayan zemin. Bu çalışmada ara zeminlerle ilgili yeterli XRF analiz sonuçları bulunamadığı için sınıflandırma, dispersif (D) ve dispersif olmayan (ND) zeminler olarak ele alınmıştır. Yukarıda anlatıldığı gibi zeminlerin sınıflandırılmasında fiziksel ve kimyasal deneyler kullanılmaktadır. Bunların yanında arazide gözlemden ve geçmiş tecrübelerden yararlanılarak yapılan dispersibilite değerlendirmeleri de bulunmaktadır. Arazideki zeminlerde erozyonun neden olduğu yüzey şekilleri belirlenmiş ise kil zeminin dispersibilite açısından ilk tanımlaması yapılmış olur. Arazide güçsüz ve bodur bitki örtüsünün yer alması, bu sahanın yüksek oranlarda tuzlu zeminden oluştuğunu göstermektedir ve bu tip zeminlerin çoğu genellikle dispersiftir. Ancak dispersif zeminler, nötr veya asidik ortamlar içinde de oluşabilir ve bu ortamlarda taze çim ve ot gelişebilir [25]. Derin oyulmalar ve küçük sulama barajlarında içsel erozyon oluşumu, yol yarmalarının yüzey erozyonu,

taşkın boyunca gelişen tünel erozyonu, kille dolu olmayan kayaç boşluklarının varlığı potansiyel dispersif zeminleri işaret edebilir. Bunların yanında yağışlardan sonra oluşan su birikintilerinde ve küçük sulama barajlarındaki bulanıklık dispersif zeminlerin göstergesidir [26].

Bu çalışma kapsamında literatürden elde edilen dispersibilite tanımlamaları; iğne deneyi testi, çifte hidrometre testi, dağılma testi, boşluk sıvısının kimyasal analizi, zemin dispersiyon testi, yapay yağmur testi, arazi gözlemi ve geçmiş tecrübelerle dayalı olarak belirlenmiş ve numunelerin XRF analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

Literatürde dikkate alınan çalışmalarda XRF analizinde çok az çalışmada örnek hazırlama tekniği, zemin örneklerinin dane çapı dağılımı, spektrometre tipi vb. detaylar bulunmakla birlikte bu etkiler bu çalışma kapsamında değerlendirilememiştir. Bunun sebebi olarak zeminlerde gerçekleştirilen XRF analizleri için yayımlanmış bir standardın olmayışı gösterilebilir.

Modeller için XRF analiz sonuçlarından 6 oksit (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O ve K_2O) dikkate alınmıştır. SiO_2 ve Al_2O_3 oksitlerini oluşturan elementler dispersibiliteyi etkileyen kil mineralinin yapısını oluşturan oktahedral ve tetrahedral tabakalarda yer alırlar [27]. Bu oksitler aynı zamanda killi zeminlerde en büyük oranlarda bulunurlar [28]. Diğer oksitlerin elementlerinin katyonları ise zeminlerin boşluk sıvısında fiziko-kimyasal etkileri oluşturarak dispersiyon mekanizmasını doğrudan etkilerler.

Dispersibilite sınıfının tahmin edilmesinde kullanılan bağımsız değişkenlerin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri Tablo 2’de verilmektedir.

2.3 Model

Bu çalışmada 6 adet majör ve minör oksitin, farklı kombinasyonlarından oluşan bağımsız değişken kümeleri ile bağımlı değişken olan dispersibilite sınıfının tahmini için oluşturulacak modellerde kullanılacak veriler literatürde yer alan çalışmalardan elde edilmiştir [29-46]. Bu kombinasyonlar; Tablo 3’de majör, majör-minör ve minör oksitlerden oluşan bağımsız değişken kümelerinden oluşturulmuştur. Toplamda 31 farklı kombinasyonla gerçekleştirilen tahminlerde veri setindeki bağımsız değişkenlerin % 66.9’u (121 adet) eğitim verisi; % 33.1’i (60 adet) ise test verisi olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan modellerde yapılan sınıflandırmanın tahmin uyum performanslarının ölçümü, hata matrisi ve buna bağlı olarak çizilen ROC (Alıcı İşlem Karakteristiği) eğrisi altında kalan alan (AUC) ile gerçekleştirilmiştir. Hata matrisinde oluşturulan modellerin performansı, gerçek ve tahmin değerlerle oluşturulan 4 farklı kombinasyonlu tablodur (Şekil 2).

Hata matrisindeki pozitif (1) tahmin “dispersif zemin-D”; negatif (0) tahmin “dispersif olmayan zemin-ND” olarak tanımlanmaktadır. Hata matrisini yorumlamak için kullanılan parametrelerden olan Doğruluk (%), Duyarlılık (%), Özgünlük (%), Kesinlik (%) oranları ve F_1 ölçüm değeri Denklem 1, 2, 3, 4 ve 5’de verilmektedir. GİP için dikkate alınan karakteristik parametreler Tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 1. Tahmin modellerinde kullanılan veri seti

Referans	Metod	Min. – Maks. (%)						Örnek sayısı		Toplam
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	D	ND	
[29]*	İ.D.T	44.57-87.51	6.74-27.88	0.13-6.38	0-6.79	0-2.39	0.29-4.02	52	14	66
[30]	İ.D.T	8.65-15.63	16.8-17.57	0.1-0.21	1.24-1.64	8.03-13.56	0.06-0.19	2	–	2
[31]	İ.D.T	41.45	10.85	3.55	16.55	0.05	1.2	–	1	1
[32]	Z.D.T	76.26-87.67	6.41-13.27	0.18-0.85	0.37-3.55	1.35-2.05	1.67-2.72	12	–	12
[33]	A.G/G.T/Y.Y.T	69.43	16.37	1.46	1.58	2.16	4.23	1	–	1
[34]	Ç.H.T	55.19	14.98	1.28	1.16	2.44	1.14	1	–	1
[35]	A.G/G.T	46.29	38.38	0.59	0.61	0.15	0.51	–	1	1
[36]	A.G/G.T	35.11-44.43	7.6-9.94	3.3-4.48	16.51-21.09	0.68-4.53	1.55-2.17	16	–	16
[37]	G.T	43.12	46.07	0.027	0.03	0.01	0.01	–	1	1
[38]	D.T	47.7	37.6	0.01	0	0	2.67	–	1	1
[39]	G.T/K.A	61.25-64	10.86-11.68	2.09-2.34	1.58-5.8	0.55-3.9	0.39-0.51	1	1	2
[40]	İ.D.T	40.28-40.35	42.9-48.38	0.56-0.57	0.3-0.59	4.65-4.84	0.69-1.48	2	–	2
[41]	İ.D.T	46.58	41.66	0.08	0.03	4.3	0.46	1	–	1
[42]	İ.D.T	41.6	11.99	4.7	13.49	1.12	2.67	1	–	1
[43]	İ.D.T	39.71	9.01	4.54	17.22	1.66	1.83	1	–	1
[44]	İ.D.T	32.69-59.16	7.25-16.89	1.57-5.29	1.51-21.98	0.22-2.6	1.17-3.97	2	1	3
[45]	A.G	36.87-37.01	30.90-41.93	0.96-1.30	0.27-0.76	0.04-0.09	0.16-0.88	–	2	2
[46]	G.T	47.00-47.99	37.00-37.98	0.22-0.30	0.06-0.1	0.1-0.15	0.82-1.99	–	67	67
Σ								92	89	181

* Tek bir örnekte dispersif tanımlama çifte hidrometre testinde yapılmıştır. İ.D.T: İğne Deliği Testi; Z.D.T: Zemin Dispersiyon Testi (A.G: Arazi Gözlemi; G.T: Geçmiş Tecrübe; Y.Y.T: Yapay Yağmur Testi), Ç.H.T: Çifte Hidrometre Testi D.T: Dağılma Testi, K.A: Boşluk sıvısının kimyasal analizi

Tablo 2. Bağımsız değişkenlerin tanımlayıcı istatistiksel bilgileri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Ortalama	57.32	23.64	1.03	2.53	0.92	1.73
Standart Hata	1.18	0.93	0.09	0.42	0.11	0.06
Ortanca	47.92	18.16	0.51	0.29	0.43	1.73
Kip	70.95	14.47	0.68	0	0.85	2.66
Standart Sapma	15.84	12.54	1.26	5.65	1.46	0.76
Örnek varyans	251.06	157.27	1.59	31.87	2.13	0.58
Basıklık	-0.73	-1.70	3.18	4.24	34.03	0.47
Çarpıklık	0.15	0.18	1.97	2.43	4.81	0.35
Aralık	79.02	41.97	6.37	21.98	13.56	4.22
En Büyük	87.67	48.38	6.38	21.98	13.56	4.23
En küçük	8.65	6.41	0.01	0	0	0.01
Toplam	10374.13	4279.50	186.52	458.61	165.98	313.54

Tablo 3. Bağımsız değişken kombinasyon kümeleri

No.	Kombinasyon Kümesi	Kombinasyon tipi
1	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	Majör oksit
2	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO	
3	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO	
4	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O	
5	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , K ₂ O	
6	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO	
7	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, Na ₂ O	
8	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, K ₂ O	
9	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, Na ₂ O	Majör-Minör oksit
10	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, K ₂ O	
11	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O	
12	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, Na ₂ O	
13	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, K ₂ O	
14	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, Na ₂ O, K ₂ O	
15	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, Na ₂ O, K ₂ O	
16	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, Na ₂ O, K ₂ O	
17	MgO	
18	CaO	
19	Na ₂ O	
20	K ₂ O	
21	MgO, CaO	
22	MgO, Na ₂ O	
23	MgO, K ₂ O	
24	CaO, Na ₂ O	Minör oksit
25	CaO, K ₂ O	
26	Na ₂ O, K ₂ O	
27	MgO, CaO, Na ₂ O	
28	MgO, CaO, K ₂ O	
29	MgO, Na ₂ O, K ₂ O	
30	CaO, Na ₂ O, K ₂ O	
31	MgO, CaO, Na ₂ O, K ₂ O	

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + HP + HN} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + HN} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Özgünlük} = \frac{DN}{DN + HP} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + HP} \times 100 \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{2 \times \text{Duyarlılık} \times \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (5)$$

Tablo 4. GİP model karakteristikleri

Parametre no.	Parametre	Parametre karakteristiği
P ₁	Kromozom sayısı	30
P ₂	Genin baş uzunluğu	7-8
P ₃	Gen sayısı	3
P ₄	Bağlantı fonksiyonu	Toplama (+)
P ₅	Mutasyon oranı	0.00138
P ₆	Evirme oranı	0.00546
P ₇	Tek ve çift nokta rekombinasyon oranı	0.00277
P ₈	Gen rekombinasyon oranı	0.00277
P ₉	Gen yer değiştirme oranı	0.00277
P ₁₀	Gen başına sabit değer	10
P ₁₁	Gen başına sabit değer aralığı	-10 ~ +10

3 Bulgular ve tartışma

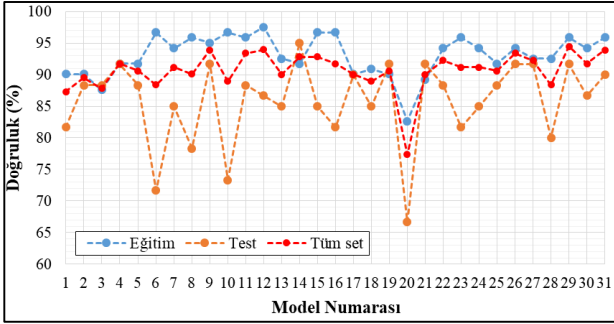
XRF analizlerinden elde edilen majör ve minör oksitler ile oluşturulan GİP modellemelerinde doğruluk (%) oranı esasında hem eğitim hem de test verileri için genelde başarılı tahmin modelleri oluşturulmuştur (Şekil 3).

3 no.'lu (SiO₂, Al₂O₃, CaO), 20 no.'lu (K₂O) ve 21 no.'lu (MgO, CaO) kombinasyon kümesi dışında kalan tahmin modellerin eğitim verileriyle öğrenmeleri, % 90'nın üzerinde doğrulukla sonuçlanmıştır. Eğitim verilerinde en iyi öğrenme 12 no.'lu (SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, Na₂O) kombinasyon kümesiyle gerçekleşmiştir. Eğitim ve test sonuçlarının doğruluk (%) oranları birlikte değerlendirildiğinde majör-minör oksit kombinasyon tipinde en başarılı tahmin modeli 12 no.'lu (SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, Na₂O) kombinasyondur (% 93.929). Minor oksit kombinasyon tipinde ise en başarılı tahmin modeli 31 no.'lu (MgO, CaO, Na₂O, K₂O) kombinasyondur (% 93.927). Bu tahmin modellerinin başarı oranları birbirine çok yakındır. 12 no.'lu kombinasyon kümesini oluşturan elementlerin katyonları, zeminlerin boşluk sıvısındaki SAR değerinin hesaplanarak dispersibilite sınıfının belirlenmesinde kullanılan katyonlardır. Bunun yanında 31 no.'lu kombinasyon kümesinde bulunan K₂O, son yıllarda boşluk sıvısının kimyasal içeriğine göre dispersibilite

		GERÇEK DEĞERLER	
		Pozitif (1)	Negatif (0)
TAHMİN DEĞERLER	Pozitif (1)	DP	HP
	Negatif (0)	HN	DN

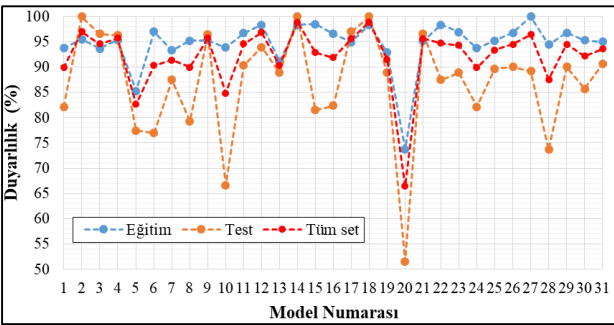
Şekil 2. Hata matrisi (D:Doğru, H:Hatalı, P:Pozitif, N:Negatif)

sınıflandırmalarında kullanılan K^+ katyonunun önemini ortaya koymaktadır.



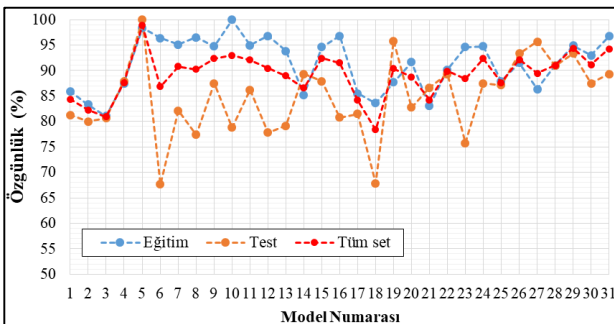
Şekil 3. Tahmin modellerinin doğruluk (%) esasında karşılaştırılması

Tahmin modellemelerinde duyarlılık (%) oranı, ilgili veri setindeki tüm pozitif sınıflardan ne kadar doğru tahmin ettiğini göstermesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bir diğer ifade ile tüm dispersif zeminlerin ne kadar doğrulukla tahmin edildiğini açıklamaktadır (Şekil 4). 14 no.'lu (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O) ve 18 no.'lu (CaO) kombinasyon kümeleri, eğitim ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde duyarlılık (%) oranı esasında en başarılı tahmin modelleri olarak ön plana çıkmaktadır (% 98.9). En başarısız tahmin modeli ise 20 no.'lu (K_2O) kombinasyon kümesidir.



Şekil 4. Tahmin modellerinin duyarlılık (%) esasında karşılaştırılması

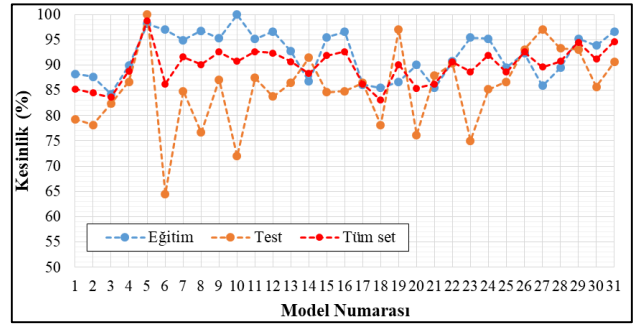
Tüm negatif sınıflardan yani dispersif olmayan zeminlerden ne kadarının doğrulukla tahmin edildiğini gösteren özgünlük (%) oranı değeri ise Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 5. Tahmin modellerinin özgünlük (%) esasında karşılaştırılması

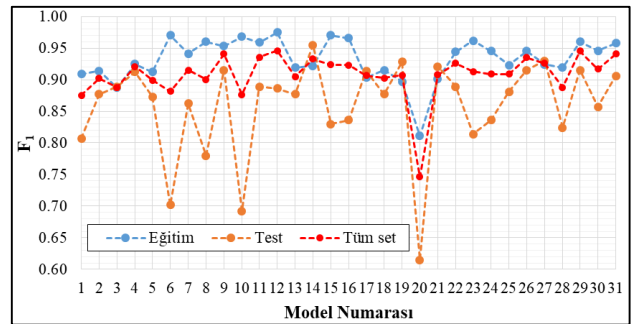
Eğitim ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde en başarılı tahmin modeli 5 no.'lu (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O) kombinasyon kümesidir (% 98.9). Duyarlılık (%) oranı esasında en başarılı tahmin modellerinden olan 18 no.'lu kombinasyon kümesi ise en başarısız tahmin modelidir.

Tüm sınıflardan ne kadar doğru tahmin ettiğimizi belirten yani ilgili veri setinin tümü için dispersif zeminleri ne kadar doğru tahmin ettiğimizi gösteren kesinlik (%) oranı ise Şekil 6'da verilmektedir. 5 no.'lu kombinasyon kümesi özgünlük (%) oranında olduğu gibi eğitim ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde kesinlik (%) oranında da en başarılı tahmin modeli olarak bulunmaktadır (% 98.7).



Şekil 6. Tahmin modellerinin kesinlik (%) esasında karşılaştırılması

Düşük duyarlılık (%) ve yüksek kesinlik (%) oranlarında veya tam tersi durumlarda modelin başarısının ölçülmesinde zorluk çıkabilir. Bu durumda her iki oranının harmonik ortalamasını alarak değerlendirmeyi kolaylaştıran F_1 ölçüm değerleri çalışmada dikkate alınan tahmin modelleri için Şekil 7'de verilmektedir. Eğitim ve test sonuçlarına göre doğruluk (%) oranına göre major-minör oksit kombinasyon tipinde en başarılı tahmin modeli olan 12 no.'lu kombinasyon kümesi, F_1 ölçüm değerine göre de en başarılı tahmin modeli olarak görülmektedir ($F_1=0.946$).



Şekil 7. Tahmin modellerinin kesinlik (%) esasında karşılaştırılması

4 Sonuçlar

Bu çalışmada; ince daneli zeminlerin XRF analiz sonuçlarından elde edilen major (SiO_2 , Al_2O_3) ve minör oksitler (MgO , CaO , Na_2O , K_2O) bağımsız değişkenler olarak dikkate alınıp bağımlı değişken olan dispersibilite sınıfları GİP ile oluşturulan modeller yardımıyla tahmin edilmiştir.

Veri setindeki ince daneli zeminlerin farklı dane çapı dağılımlarına sahip olmasına rağmen, 6 farklı oksitten oluşan 31 farklı kombinasyon kümesinin girdi verisi olarak tanımlandığı modellerin genel olarak tahmin başarı oranları yüksektir. Özellikle veri setindeki major ve minör oksitlerle oluşturulan modellerin GA esasında öğrenme başarıları ise oldukça yüksektir. Eğitim ve test sonuçları birlikte dikkate alındığında en başarılı tahmin modeli SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , oksitlerinden oluşan girdi verisiyle geliştirilen tahmin modelidir (Doğruluk oranı: % 93.929). Bu durum da göstermektedir ki; ince daneli zeminlerde dispersiyon mekanizması majör elementlerin (Al,Si) yer aldığı kil mineralinden bağımsız değildir. En genel sonuç olarak ise; bu çalışma ile ince daneli zeminlerin XRF analiz sonuçlarıyla dispersibilite sınıflarının genetik algoritmalar esasında çalışan GP ile oluşturulan modeller yardımıyla başarılı bir şekilde tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Bu tür bilgisayar modelleriyle ince daneli zeminlerin dispersibilite özelliklerinin tanımlanabilmesi için fiziksel ve kimyasal tanımlama deneyleri ile birlikte XRF analizlerinin de yapılması önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] H.E. Middleton, 1930, The properties of soils which influence erosion, Tech. Bull, U.S. Dept. Agri., 178: 1-16,1930.
- [2] G.M. Volk, Method of determination of degree of dispersion of the clay fraction of soils, Proceedings Soil Science Society of America, 2, 561-567,1937.
- [3] A. Maharaj and P. Paige-Green, P., The SCS double hydrometer test in dispersive soil identification, In The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2-6, France, 2013.
- [4] R.S. Decker and L.P. Dunnigan, L.P., Development and use of the Soil Conservation Service Dispersion Test, J. Sherard, R. Decker (Eds), In STP623-EB Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, West Conshohocken, PA: ASTM International, 94-109, 1977.
- [5] G.D. Aitchison, O.G. Ingles and C.C. Wood C.C, Post-construction deflocculation as a contributory factor in the failure of earth dams, In: Fourth Australia-New Zealand conference on soil mechanics and foundation engineering, Australia, 275-279, 1963,
- [6] F.A. Gerber, and V.M. Harmse, Proposed procedure for identification of dispersive soils by chemical testing, Civil Engineer in South Africa, 29(10), 397-399, 1987.
- [7] P. Paige-Green, Dispersive and erodible soils – Fundamental differences, SAIEG/ SAICE Problem Soils Conference, 59-67, Midrand, November 2008.
- [8] W.W. Emerson, A Classification of soil aggregates based on their coherence in water, Australian Journal of Soil Research 5, 47-57, 1967.
- [9] J.L. Sherard, E.F. Steele, R.S. Decker and L.P. Dunnigan, Pinhole test for identifying dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102(1), 69-85, 1976.
- [10] J.L. Sherard, L.P. Dunnigan and R.S. Decker, Identification and nature of dispersive soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102, No. GT4, 298-312. 1976.
- [11] H. Savaş, 2008, Development on pinhole test adopted to identify the dispersive clays used for earthfill dams and a comparative study, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Eskişehir Osmangazi University, Turkey (In Turkish).
- [12] I. Zorluer, Y. Icaga, S. Yurtcu and H. Tosun, Application of a fuzzy rule-based method for the determination of clay dispersibility, Geoderma, 160(2), 189-196, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.017>.
- [13] P. Rengasamy and A. Marchuk, A., 2011, Cation ratio of soil structural stability (CROSS), Soil Research, 49(3), 280-285, 2011.
- [14] P. Rengasamy, P.E. Tavakkoli and G.K. McDonald, Exchangeable cations and clay dispersion: net dispersive charge, a new concept for dispersive soil, European Journal of Soil science, 67(5), 659-665. 2016. <https://doi.org/10.1111/ejss.12369>.
- [15] A. Turgut, N.S. Isik and K.E. Kasapoglu, Investigation of factors affecting the dispersibility of clays and estimation of dispersivity, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76(3), 1051-1073, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0935-x>.
- [16] A.A.R. Heshmati, H. Salehzade, A.H. Alavi, A.H. Gandomi, A. Badkobe and A. Ghasemi, A., On the applicability of linear genetic programming for the formulation of soil classification, American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci, 45, 575-583. 2008.
- [17] S.K. Das, P.K. Muduli, Evaluation of liquefaction potential of soil using genetic programming, In Proceedings of the Golden Jubilee Indian Geotechnical Conference, Kochi, India, 827- 830, 2011.
- [18] G.D. Öget, Estimating Swelling Characteristics of Clays Using Methylene Blue Test -A Machine Learning Approach, The Degree of Master of Science, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, 2014.
- [19] E. Çöleri, Relationship Between Resilient Modulus and Soil Index Properties of Unbound Materials, The Degree of Master of Science, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, 2007.
- [20] L. Scrucca, GA: A package for genetic algorithms in R, Journal of Statistical Software, 53(1), 1-37, 2013. <https://doi.org/10.18637/jss.v053.i04>.
- [21] J.R. Koza, Genetic Programming, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [22] A. Pourzangbar, Determination of the most effective parameters on scour depth at seawalls using genetic programming (GP). In The 10th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMASS 2012), Tehran, Iran, 9p, November 2012.

- [23] C. Ferreira, Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems, *Complex Systems*, 13, 87-129, 2001. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0102027>.
- [24] P. Brouwer, *Theory of XRF*, PANalytical BV, Almelo, Netherlands, 2006.
- [25] H. Tosun, İ. Zorluer, H. Tozluk, ve H. Savaş, Toprak Dolgu Barajlarda Dispersif Killerin Kullanımı ve Tasarım ve Kontrol Kriterlerinin Araştırılması, TÜBİTAK, İNTAG-719, 2001.
- [26] R. Fell, *Geotechnical Engineering of Dams*, CRC press, Boca Raton, 2005.
- [27] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of Soil Behavior (Vol. 3)*, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [28] P. S. Nayak and B. K. Singh, Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR, *Bulletin of Materials Science*, 30(3), 235-238, 2007. <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0042-5>.
- [29] F. G. Bell and D. J. H. Walker, A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 33(3), 187-199, 2000. <https://doi.org/10.1144/qjegh.33.3.187>.
- [30] S. Alam, B.K. Das and S. K. Das, Dispersion and sedimentation characteristics of red mud, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(4), 04018025(1-10), 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000420](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000420).
- [31] M. Belen ve E. Pınarcı, Atatürk Barajı kil çekirdeğinde kullanılan malzemenin dispersivite özelliğinin araştırılması, MÜHJEO'2017: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, sayfa 277-284, Adana, Türkiye, 12-14 Ekim 2017.
- [32] M. Y. Evans, *The Geology, sedimentology, geochronology and palaeo-environmental reconstruction of the Heelbo Hillslope deposit, free state province, South Africa*, Ph.D Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 2015.
- [33] S. Matsumoto, S. Ogata, H. Shimada, T. Sasaoka, A. Hamanaka and G.J. Kusuma, Effects of pH-induced changes in soil physical characteristics on the development of soil water erosion, *Geosciences*, 8(4), 134(1-13), 2018. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040134>.
- [34] S. Mohanty, N. Roy, S.P. Singh and P. Sihag, Effect of industrial by-products on the strength of stabilized dispersive soil, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 405-417, 2021. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1654281>.
- [35] W. E. Worrall, *Clays and ceramic raw materials*, Elsevier Applied Science, New York, 1986.
- [36] S. Nasseh, G.R. Lashkaripour and M. Ghafoori, Evaluation of Mineralogical Characteristics and Erosion of Tous Historic Mud Wall, Ne of Iran, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5), 919-925, 2011.
- [37] A. K. Panda, B.G. Mishra, D.K. Mishra, and R.K. Singh, Effect of sulphuric acid treatment on the physico-chemical characteristics of kaolin clay. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 363(1-3), 98-104, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.022>.
- [38] N.S. Phillips, Disaggregation of soil during slurry pipe jacking, Ph.D Thesis, University of London, London, U. Kingdom, 2015.
- [39] P.T Shourijeh, A. Soroush and A.H. Daneshi-Sadr, The effects of lime, bentonite and nano-clay on erosion characteristics of clay soils, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(9), 3762-3787, 2022. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1818629>.
- [40] A.H. Vakili, M.R. bin Selamat, H.B.A Aziz, A. Mojiri, Z. Ahmad and M. Safarzadeh, Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC, *Geoderma*, 285, 270-279, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.009>.
- [41] A. H. Vakili, M. Kaedi, M. Mokhberi, M.R. bin Selamat and M. Salimi, Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application, *Applied Clay Science*, 152, 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.039>.
- [42] A.H. Vakili, J. Ghasemi, M.R. bin Selamat, M. Salimi and M.S. Farhadi, Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber, *Construction and Building Materials*, 193, 405-415, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.213>.
- [43] A. H. Vakili, S.I. Shojaei, M. Salimi, M.R. bin Selamat and M.S. Farhadi, Contact erosional behaviour of foundation of pavement embankment constructed with nanosilica-treated dispersive soils, *Soils and Foundations*, 60(1), 167-178, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.001>.
- [44] S. Topçu, İnce Daneli Zeminlerin Farklı Gerilme Koşullarında İçsel Erozyon Davranışının Mukayeseli Analizi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [45] G. Sankar, K.V. Ajay, S.L. Kuriakose, P.R. Prasobh, C. Deepa and K. Eldhose, Studies on soil piping in the highlands and foot hills of Kerala to avoid the disaster, Final Report NCESS-PR-01-2020, January 2020.
- [46] A.J. Bloodworth, D.E. Highley and C.J. Mitchell, *Industrial minerals laboratory manual: Kaolin*, British Geological Survey, Technical Report WG/93/1, 1993.





Investigation of material deterioration and seismic behavior of Fertek and Hançerli Churches in Cappadocia Region

Kapadokya bölgesindeki Fertek ve Hançerli Kiliselerinin malzeme bozulmalarının ve sismik davranışlarının incelenmesi

Metin Hakan Severcan¹ , Emel Efe Yavaşcan² , Semiha Akçaözoglu^{3,*} , Kubilay Akçaözoglu⁴ 

^{1,4} Niğde Ömer Halisdemir University, Civil Engineering Department, 51240, Niğde Turkey

^{2,3} Niğde Ömer Halisdemir University, Architecture Department, 51240, Niğde, Turkey

Abstract

Cappadocia is one of the rare natural and cultural centers on earth with its fairy chimneys, underground cities, rock churches, stone buildings and natural beauties. Among these artifacts, Fertek and Hançerli Churches that are subjected to the scope of the study are very original buildings with their superior construction techniques and rich workmanship according to the period they were built. In this study, the architectural features of Fertek and Hançerli Churches which were built in the 19th century and located within Niğde province in the Cappadocia Region were examined and material deteriorations were determined. In the light of the determinations, the existing static properties of these buildings were examined using Dynamic Finite Element Analysis program. Discoloration, vegetation, crack formation, humidification and partial mortar and stone loss were detected in both churches. When the analysis results are evaluated it has been determined that the buildings need repair and conservation depending on the region and soil class and considering the earthquake forces.

Keywords: Cappadocia, Church, Historical monument, Seismic performance, Stone deterioration

1 Introduction

Cappadocia, the cradle of important settlements in history has been a region where different cultures lived for centuries. Christian population who escaped from oppression between the centuries made this region an important center of Christianity at especially 7-13 centuries [1]. Cappadocia is located on the UNESCO World Heritage Site. The province of Niğde constitutes the southern borders of the Cappadocia Region. There are underground cities, Gümüşler Monastery, the ruins of Tyana Ancient City, Roman Pool, Kemerhisar Aqueducts, churches, mosques and historical monument belonging to different periods. This province is different from other cities in the region because it has many churches that can reach to the present day [2]. There are almost 25 churches that almost all of which belong to the first half of the 19th century in center, town and village settlements. Fertek and Hançerli are notable for with its historical, architectural and artistic values among these churches. Both churches have a common style of 19th-century buildings and also exhibit their own unique style.

Öz

Kapadokya Peribacaları, yeraltı şehirleri, kaya kiliseleri, taş yapıları ve doğal güzellikleri ile yeryüzündeki ender doğal ve kültürel merkezler arasında yer almaktadır. Bu eserlerden çalışma kapsamına alınan Fertek ve Hançerli Kiliseleri, yapıldıkları döneme göre üstün yapım teknikleri ve zengin işçiliği ile oldukça özgün yapılarıdır. Bu çalışmada Kapadokya Bölgesinde yer alan Niğde ili sınırları içerisinde bulunan ve 19. yüzyılda inşa edilen Fertek ve Hançerli Kiliselerinin mimari özellikleri incelenmiş ve malzeme bozulmaları tespit edilmiştir. Bu tespitler ışığında yapıların mevcut statik özellikleri Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi programı kullanılarak incelenmiştir. Her iki kilise yapısında da renk bozulması, bitkilenme, çatlak oluşumu, nemlenme, kısmi harç ve taş kayıpları tespit edilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, yapıların bulunduğu bölgeye ve zemin sınıfına bağlı olarak ve deprem kuvvetleri dikkate alınarak onarım ve korumaya gereksinimlerinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kapadokya, Kilise, Tarihi anıt, Sismik performans, Taş bozulması.

[3]. While many churches in the region have been abandoned and not used, these two buildings continue to be used in mosque function. Fertek Church deserves a great importance in terms of art history with its wall paintings. The apsis paintings in the building are referring to the art of Western painting rather than the works in Anatolia with their iconographic features and style [4]. The exterior facade arrangements of the Hançerli Church are richer than the other churches in the region. Fertek Church have been used as mosque since 1925 and Hançerli Church have been used as mosque since 1930-1940. Since these buildings continue to be used with a similar function to their original functions, they have survived to the present day largely preserved.

Needs arising from new actions caused by social and economic changes in societies may require adaptive reuse for new purpose in buildings [5]. Serious damage can occur over time due to lack of maintenance in abandoned buildings that have not been used for a long time and even in some cases the building is completely lost [6]. Re-functioning the structures that cannot participate in life with their original

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sakcaozoglu@ohu.edu.tr (S. Akçaözoglu)
Geliş / Received: 16.09.2022 Kabul / Accepted: 04.10.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022
doi: 10.28948/ngmuh.1176288

functions is also important in terms of preserving their architectural identities under today's conditions.

It is very important to know the architectural properties and structural system of the buildings and taking into account the loads on the structure in the repair and reinforcement works of the conservation of historical buildings, in order to transfer the buildings to future generations with its original structural systems. Although there are international studies in the field of material degradation, static analysis and conservation proposals in historical buildings, the number of studies conducted in the region is limited [7-10]. In particular, there has been no comprehensive study concerning the material deterioration and strength problems of these two historical buildings. For this reason, this study also serves an important purpose for transfer of buildings with similar functions to future generations in the Niğde-Cappadocia Region where is quite rich in terms of historical monuments.

In this study, the architectural and structural features of the Fertek and Hançerli Churches belonging to the 19th century of the late Ottoman period were examined and compared. The seismic performance of these historical buildings also investigated. In the light of the findings, suggestions for the conservation of the mentioned monumental structures are presented.

2 Historical significance and architectural definition

In this section, the historical and architectural properties of the two historical buildings that are the subject of the study are presented.

2.1 Fertek Church

Fertek Church is located in a large garden in the center of Fertek Village of Niğde Province. It was built in 1831 by Hadji Nikola. The building is basilica style plan with three naves [3]. It was built in the masonry system, using yellow tuff cut stone (commonly used in the Cappadocia region), basalt and andesite (Figure 1-a). The monumental structure with rectangular plan has a 16-column narthex that surrounds it on the north, south and west (Figure 2). The middle part of the narthex is semi-circular and outward. The narthex columns have simple stalactites. There is an inscription in the Karaman dialect (which is not exist today) on the exterior of the semicircular narthex. The ceiling of the narthex has classic wooden craftsmanship. In the middle of the split ceiling in the form of cassettes, a large medallion is decorated with an interesting "pen-work" consisting of curved branches and flower petals (Figure 1-b) [3]. It is entered from the narthex by three doors. The nave is divided into three sections with double-row columns. The naves are covered with barrel vault. Column headings on high pedestals have wooden ornaments.

There are three semi-circular apses at its east end. There is a window at each apse. On the sides of the apse, there are gates to the north and south. There is a niche in the left apse. Outside, main space, corner spaces and apse are covered with double-sloping roof. Naos has a gallery floor in north, south and west directions [11]. The U-shaped mezzanine floor has a total of 28 small columns. In the north and south, there are three oval-shaped windows on the top. The interior of the

building is covered with a barrel vault, and externally; covered with a three-part gable roof with inclined in two directions (Figure 2). On the upper floor, there are fresco ruins on the left [12].

Some restoration and repair applications have been applied to the building until today. However, the building has reached today by preserving the original shape of the main elements such as plan scheme, and facade layout. An independent minaret is established to the southwest corner of the building which is used as a mosque today and a mihrab, sermon pulpit and other building elements have been added.

2.2 Hançerli Church

Hançerli Church built in 1832 is in Hançerli Village and is located in a large courtyard with a sloping terrain (Figure 3-a). High retaining walls are formed in the south, west and east directions of the building. The building is built in the masonry system with three naves basilica plan type.

The building is built in rectangular form and has three externally round apses in the east, and six columns narthex with five pointed arches in the west (Figure 3-b). Three different doors are used to pass from the narthex to the naos [11]. Inside, columns with high pedestals form double rows and five groups and column headings are plain impost shaped. The cover system of the naves is a barrel vault in the east-west direction. The apse is covered by a half-dome, and the narthex is covered by a barrel vault in the north-south direction [3]. The single-storey building has a gable roof on the outside and is covered with stone plates (Figure 4). The northern facade of the building which sits on sloping land rising to the north, rests on the road remaining at the upper elevation. Therefore, a large part of the northern facade of the building is buried. The arch traces are seen on this facade (Figure 3-b).

There are six windows opening to the south. One of the windows in the south is closed and a mihrab is added here. Six windows on the left are closed. There is also a minbar and room added to the right. There are niches in the left and middle apse. Inside, there is a closed door at the top left. In the west, there are three small windows with a triangular pediment on the narthex [3,11]. On the retaining wall of the courtyard in the south of the building, there is a fountain that has two arches with fringes on it, and an inscription in the Karaman language on it [12].

3 Structural definition

It is important that the conservation and restoration of historical buildings should be planned based on detailed studies of structural systems and their strength and deformability and the dynamic response of the structure [13]. The structural information and material properties obtained from field studies are presented in Table 1 for use in static analyses.

In Fertek Church, wall thicknesses are ranging from 80-110 cm on the ground floor and between 70-85 cm on the upper floor. Gray-black and yellow cut stones of Cappadocia Region are also used on the facades of Fertek Church (Figure 1).



Figure 1. Ferteck Church (a) front facade (b) narthex ceiling

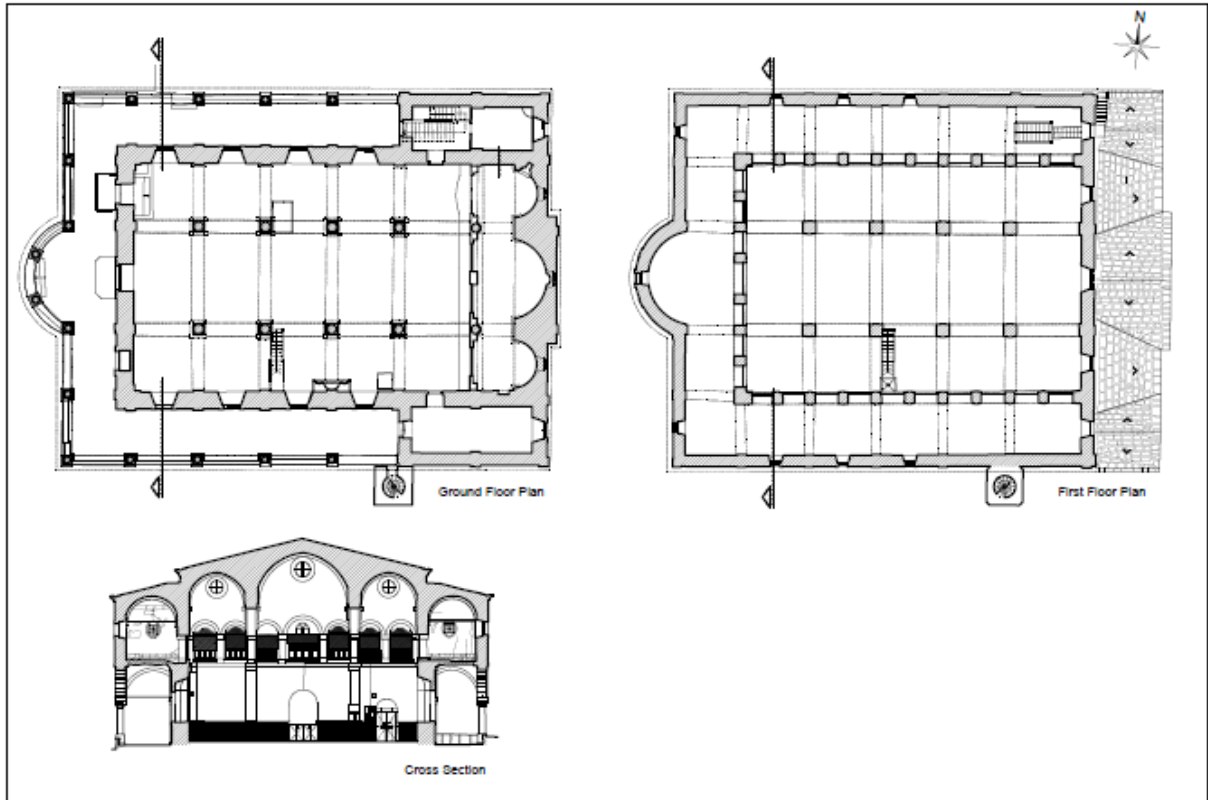
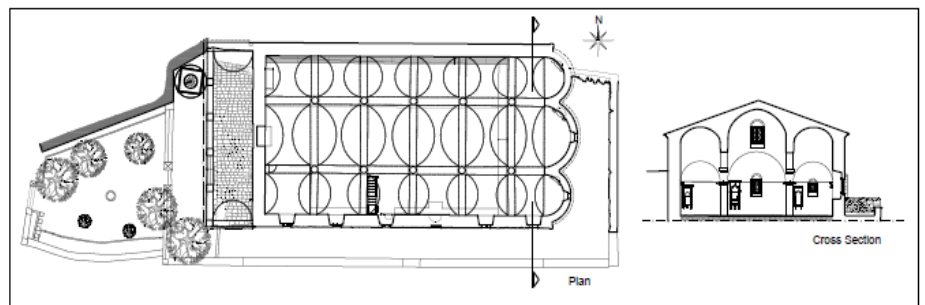


Figure 2. Plan and section of Ferteck Church (Alper Restorasyon)



(a)



(b)

Figure 3. Hançerli Church, view from the upper road (a) plan and section (b)

These stones that are also used in many local historical buildings are yellow tuff (ignimbrite) and andesite. The stones of the church are chosen according to their location in the building. Dark gray-colored andesite and basalt stones are more resistant than yellow stones. For this reason, in the apse and bema section of the building, dark stone material is used up to five or six rows height from the floor and up to two rows height on the other fronts. Thus, the damage from the ground water is minimized. Dark colored andesite and basalt stone are also used in columns and arches, lintels, sills, in the flooring of naos and narthex sections and in some corners of the facades. The arches of the gallery floor are protruding on the facades and divided the facades into sections. Some of these protrusions are made of completely basalt stone. In some of them, basalt stone is used for the beginning and ending stones. The apses with triangular pediment at the east side of the structure are all basalt.

Table 1. Comparison of structural and material properties of the monumental structures

Properties	Fertek	Hançerli
Wall material	Yellow tuff, andesite and basalt	Andesite and basalt
Joint	Lime mortar	Lime mortar
Column material	Basalt	Basalt
Column section	Circular column-square prism base	Circular column-square prism base
Column diameter	60 cm inside 40-45 cm (narthex)	60-70 cm inside 55-60 cm (narthex)
Column distance	3.65-4.30 m	3.5-4.0 m
Tension bars	Present	Present
Narthex form	U shape	Rectangular
Vault	Barrel vault	Barrel vault
Roof	Two-sided gable roof	Two-sided gable roof
Roof material	Basalt	Basalt
Arch	Segmental, semi-circular and pointed	Pointed
Floor	Wooden floor	-
Lintel	Basalt	Basalt

The wall thickness of the Hançerli Church varies between 65-120 cm. Due to the thickness of these stone walls which are continuous elements that transmit the loads coming from the structure to the foundation, the tensile stresses due to the load are minimized and the compressive stresses are increased at the same rate. In all facades of the Hançerli Church gray-black andesite and basalt stones unique to Cappadocia Region are used (Figure 3). Because these stones are highly resistant to external factors, the buildings that are built with these stones have survived for many years. The columns of the buildings are presented in Figure 4.

4 Material deteriorations

Fertek Church has survived to the present day while preserving its structural system characteristics. No large cracks are detected that could affect the structural system. Partial stone deterioration occurs due to natural conditions. Especially discoloration has occurred in the stones close to the ground level and the stones under the cornices due to moisture and rainwater. Efflorescence that is a result of the evaporation of the salts carried in the rising moisture from the floor on the surface of the wall may cause deterioration

of the physical and chemical properties of the wall. In addition, superficial spill and stone losses are formed due to moistening in the ignimbrites. Also, another problem that is seen between the joints on the exterior is vegetation. Other problems such as stone cracks, stone melts and plaster losses are also detected in the structure (Figure 5).

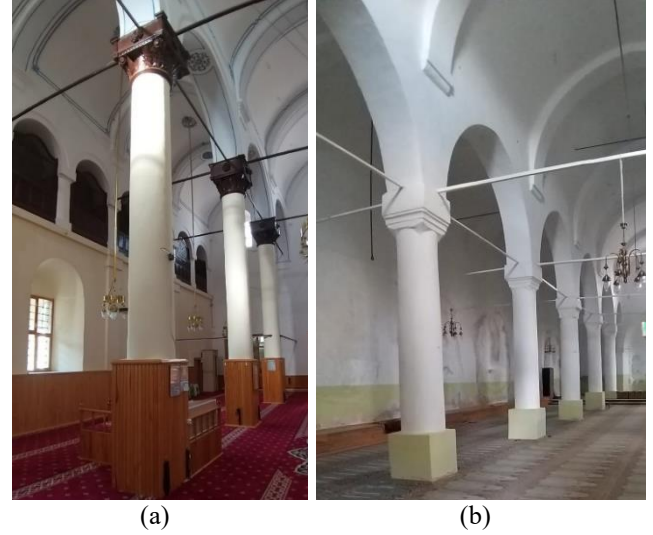


Figure 4. The column bases in Fertek (a) and Hançerli (b) Churches

Hançerli Church which is built on the platform formed by the retaining walls due to the slope has survived to the present day by preserving its structural system properties to a great extent. One of the problems observed in the structure is that the northern front leans against the road elevation at a high elevation. This causes the vibrations on the road to be transmitted to the structure and creates a dynamic effect. In addition, the building which is located on a sloping topography is exposed to rain and snow waters coming from the upper road. This situation causes moisture problems in the structure. The stones have been damaged by moisture which can lead to a decrease in strength. In addition, because of the accelerating effect of water on biological degradation, lichen formation on the stone roof at Hançerli Church is observed [8,14]. There are no large cracks in the building that could affect the structural system. Similar to the Fertek Church, there are problems such as mortar losses, stone cracks, humidification problems and vegetation due to the natural conditions (Figure 6).

It is important to solve the moistening problems in both monumental structures. Because water is the main factor in physical, chemical, and biological degradation processes in stones [15]. This problem causes a decrease in the strength of the walls which is one of the important elements of the structural system of the building, and poses a threat to the life of the building. Salt and other substances carried by rainwater and ground water entering the stones cause chemical deterioration especially due to the moisture effect [16]. In order to solve the humidification problem road level should be lowered especially in Hançerli Church.

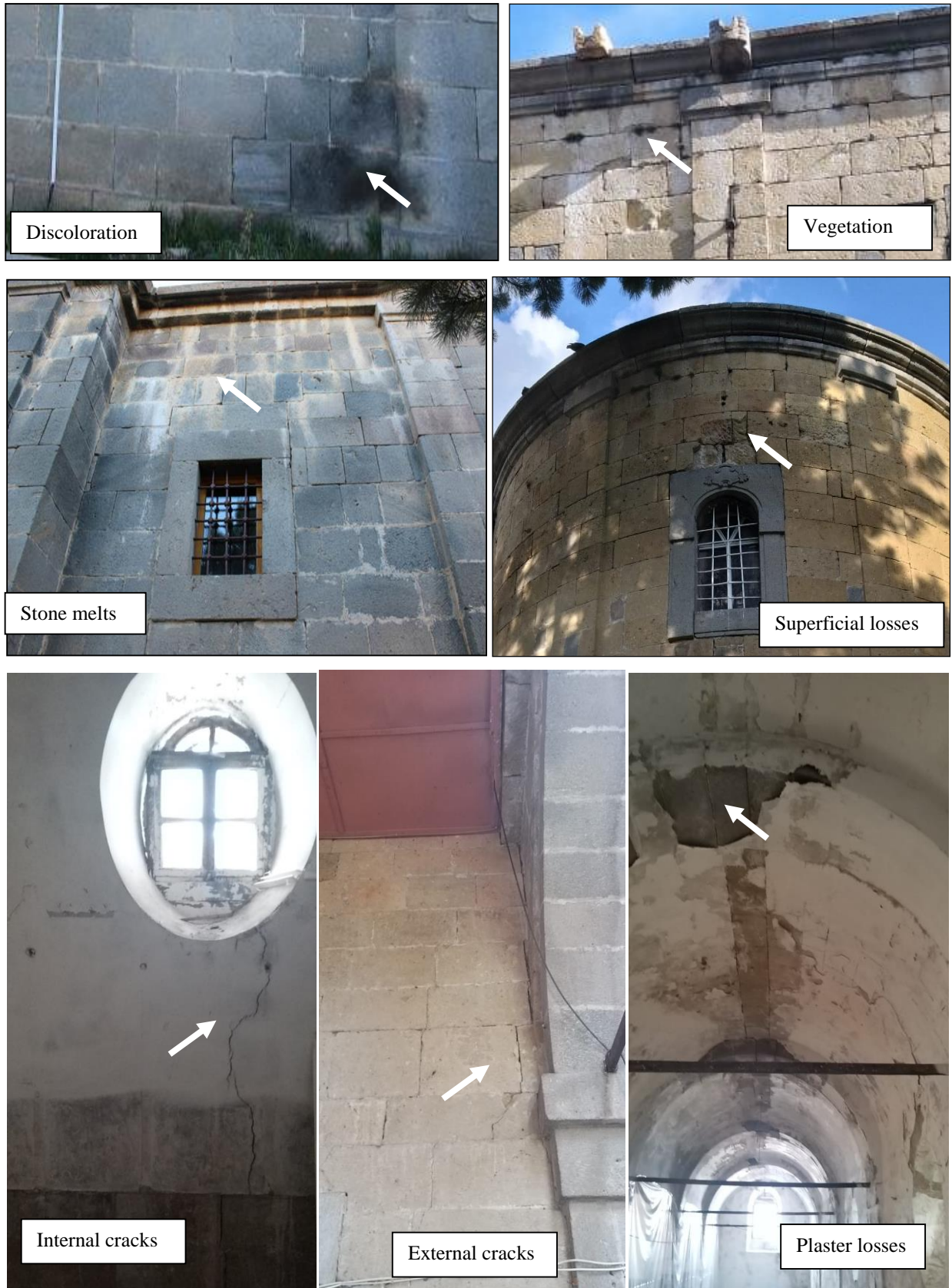


Figure 5. Deterioration problems at Fertek Church.

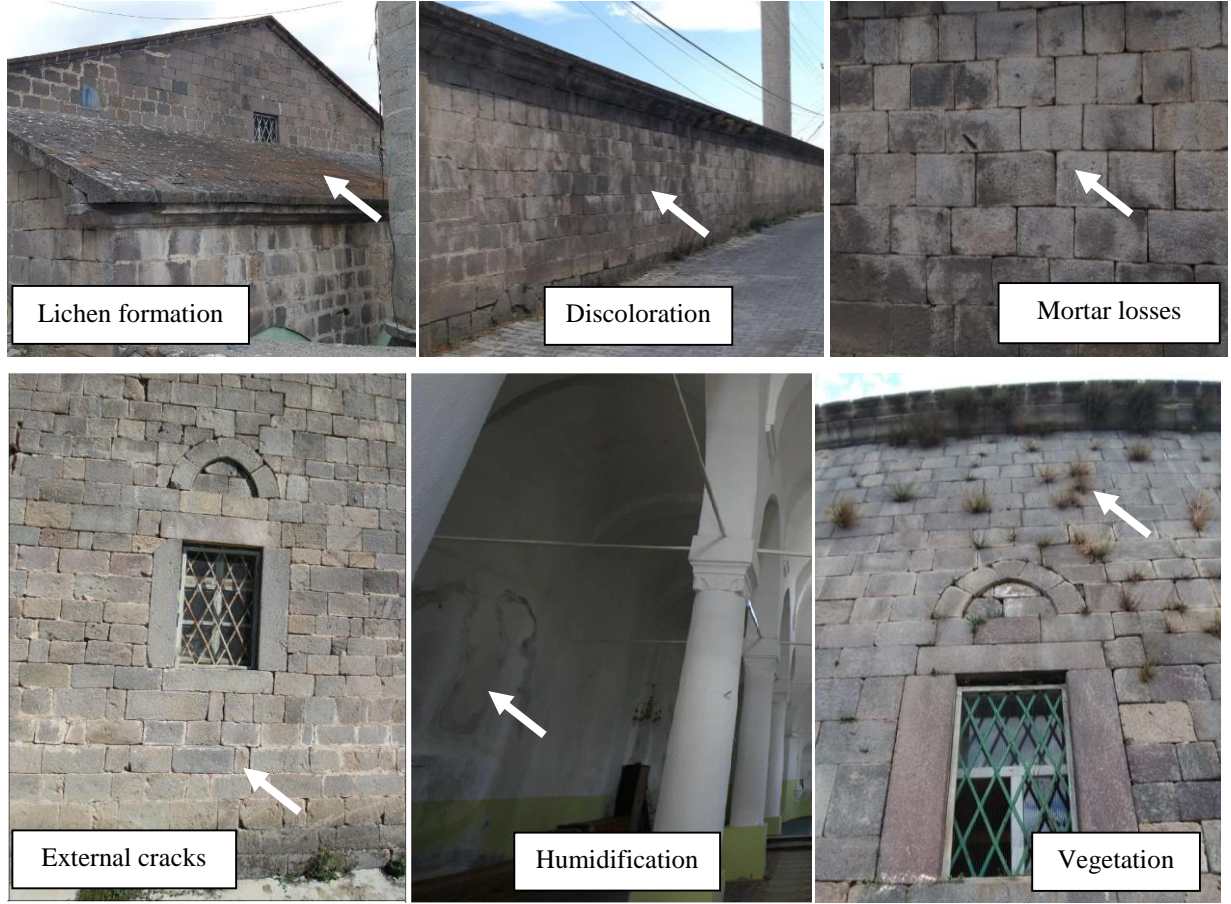


Figure 6. Deterioration problems at Hançerli Church.

5 Seismic analysis

The repair and strengthening of historical monuments are dependent on the ground as well as the materials and methods used for their construction [17]. In this section performance evaluation of the Fertek and Hançerli Churches under the influence of vertical loads and earthquake forces is presented. In order to achieve this goal, the required geometrical and mechanical properties of the monuments were obtained from preliminary studies. The performance evaluation of Fertek and Hançerli Churches has been performed using finite element analysis for the buildings with their current conditions in the direction of on-site inspection and observations and also examining restoration projects.

For the structural analysis of historical buildings and monuments, the finite element analysis- method is often used [18-21]. In the modeling, geometric arrangement and simplifications are needed for walls and other structural elements. Since masonry structures are applied in terms of construction techniques by combining several different materials, they exhibit different behaviors in different directions. Some idealizations and simplifying assumptions are made in order to represent these behaviors in the modeling. The structural walls of the building are composed of at least three major materials, i.e., stone, brick and mortar

(plaster). However, in the construction of the model, the building is assumed to be of a single material regarding its modulus of elasticity and specific density [22]. In the modeling, walls, domes, vaults, arches, columns and tension bars that form the structural system are used. The masonry walls, domes and vaults are modeled by using three-dimensional solid elements and the arches, columns and tension bars are modeled by using frame elements. All structural system elements are divided into parts according to appropriate finite element sizes. However, the coating and filling materials on these elements are not modeled and only their loads are determined and affected by the related elements. In addition, the snow load specified in TS EN 1991-1-3 [23] is added. The three-dimensional (3D) finite element model of the churches used in the analysis is shown in Figure 7.

Since the general behavior of the structures is taken into consideration in the modeling of churches, it is assumed that the structural elements consist of a single material and the tension bars between the columns are made of St37 steel. The mechanical properties of the materials used are given in Table 2 [24, 25]. The analysis of the structures under the effect of earthquake is carried out in Turkish Earthquake Code-2018 [26] by using the parameters corresponding to soil type ZC and earthquake motion level DD-2 and given in Table 3.

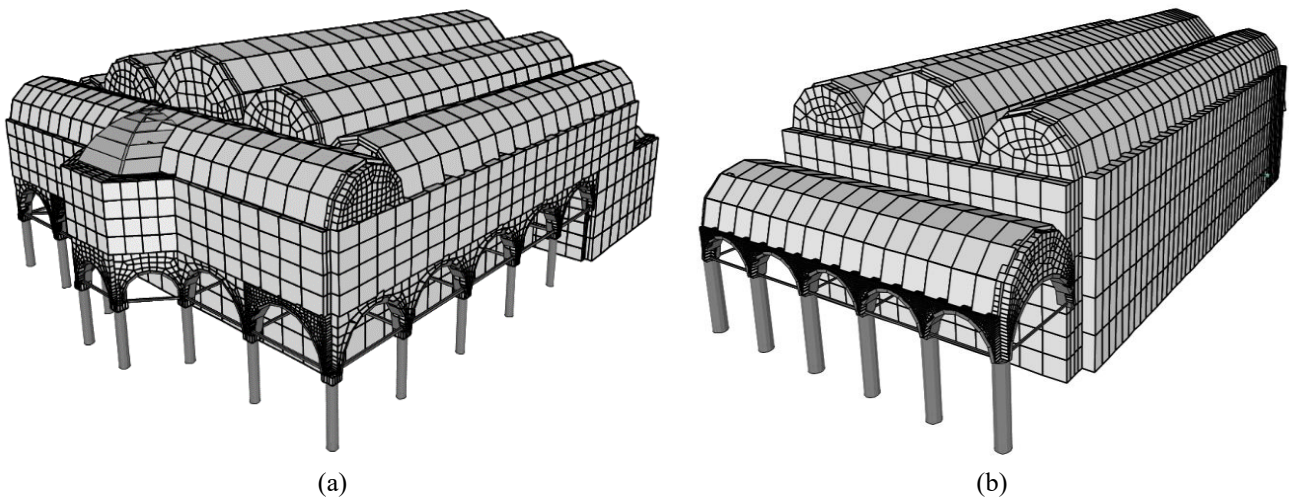


Figure 7. 3D finite element models of (a) Fertek, (b) Hançerli Churches.

Table 2. Mechanical properties of materials used in the monumental structures.

Material	Elasticity module (MPa)	Poisson's ratio	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Unit weight (kN/m ³)
Yellow Tuff	4200	0.2	25.10	4.12	17
Andesite	7390	0.2	69.20	6.24	22.5
Basalt	38420	0.2	142.21	15.59	27

Table 3. Seismic parameters of monumental structures.

	Fertek	Hançerli
F _s	1.3	1.3
F ₁	1.5	1.5
S _s	0.308	0.305
S ₁	0.085	0.084
S _{DS}	0.400	0.396
S _{D1}	0.127	0.126

Table 4. Maximum compressive and tensile stress values obtained from the analysis (MPa).

Structure	Vertical loads		EQX		EQY	
	Compressive	Tensile	Compressive	Tensile	Compressive	Tensile
Fertek	0.424	2.537	0.209	0.887	0.07	0.622
Hançerli	0.537	1.452	0.07	0.377	0.04	0.477

The structural models are analyzed statically under the influence of vertical loads and earthquakes by using the above assumptions and parameters. Figure 8 and Figure 9 show three-dimensional models and cross-sections showing the stress distributions obtained as a result of static analysis of the structures.

As a result of the analysis, maximum compressive and tensile stresses obtained under the effect of vertical loads of monumental structures and earthquake forces (EQX and EQY) applied in X and Y directions are given in Table 4.

It is seen that the maximum tensile stress in the Fertek Church is 2.537 MPa, the compressive stress is 0.424 MPa, and the maximum tensile stress in the Hançerli Church is 1.452 MPa and the compressive stress is 0.537 MPa. However, it is observed that the tensile stresses were less than 1 MPa for both monumental structures and that the maximum tensile stress values shown in Table 4 are exceeded only in a few regions of the corners of the wall cavities and the lower corners of the wall.

Since the compressive strength of the masonry structural elements is much higher than the tensile strength, the tensile stresses in which the monumental structure is weaker are evaluated together with the compressive stresses within the stress values obtained from the analysis. When the maximum compressive and tensile strength values of the structural elements given in Table 2 are compared with the maximum stresses in Table 4, it is seen that the compressive stresses are quite low compared to the compressive strength of the stones and the tensile stresses are lower than the tensile strength of the stones.

According to the data given in Table 4, both Fertek and Hançerli Churches are found to have more difficulty under vertical loads than earthquake effects. However, when compared with the allowable stress values of the stones, it has been found that both structures can resist the tensile and compressive stresses occurring on them without any damage.

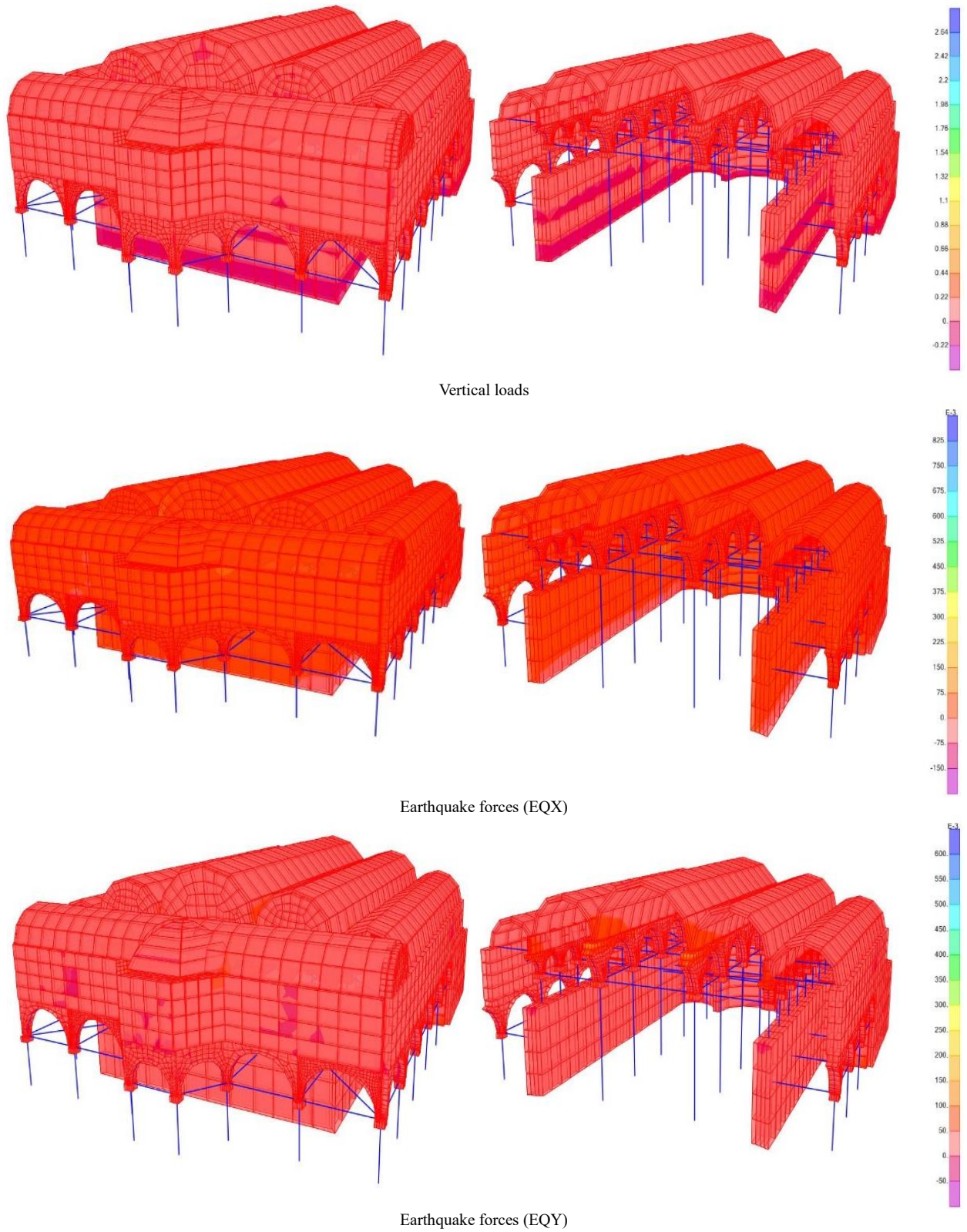


Figure 8. The stress distribution obtained as a result of static analysis of Fertek Church.

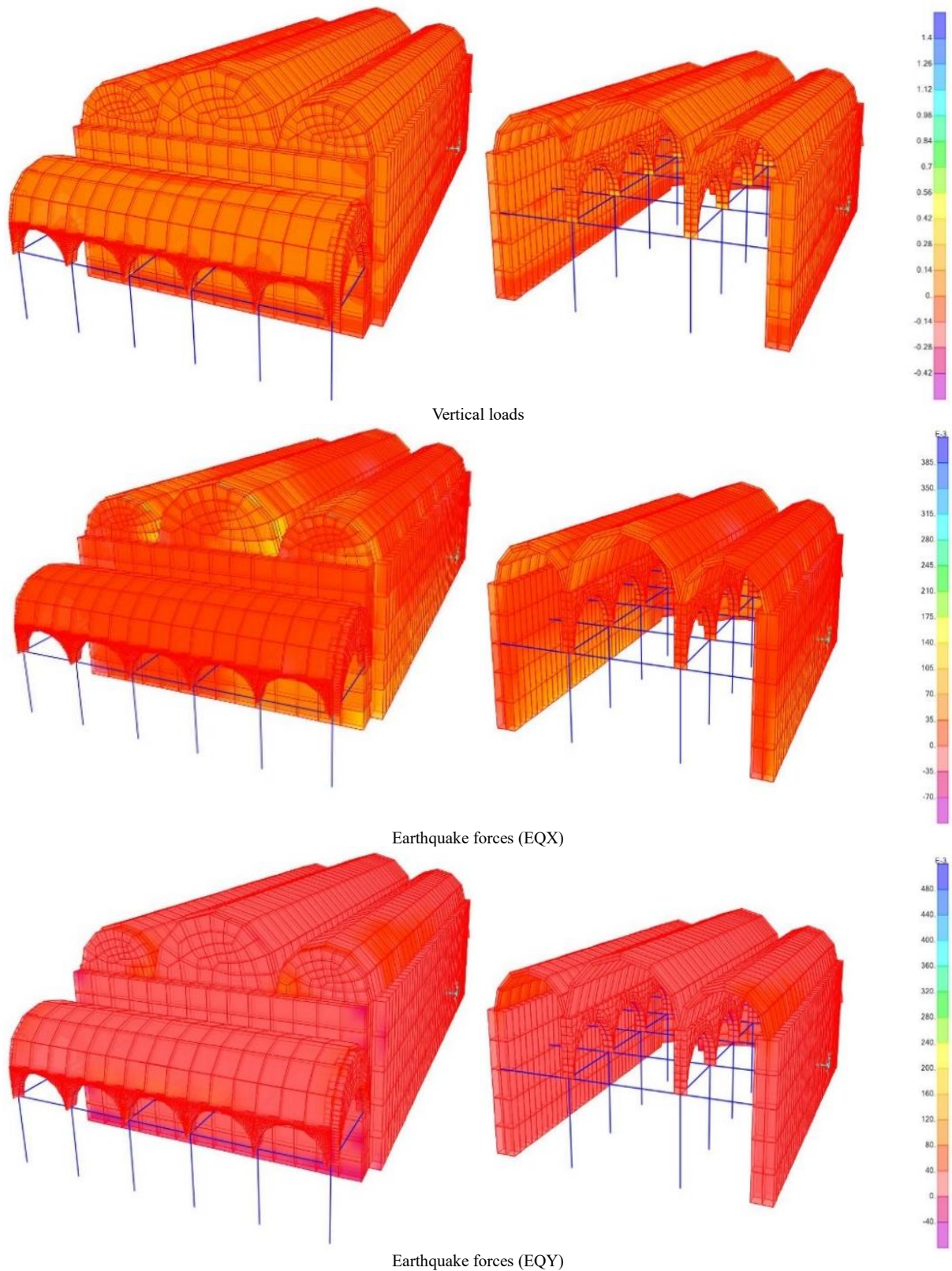


Figure 9. The stress distribution obtained as a result of static analysis of Hançerli Church.

6 Conclusions

The results and recommendations to improve the stability of these historical monumental structures can be summarized as follows.

In both monumental structures, no large cracks are detected that could affect the structural system. There are some material problems such as joint discharges, stone cracks, stone melting, superficial losses, vegetation and discoloration in the structures. It is important to make the necessary repairs to the stone walls to prevent the deterioration from progressing. Due to the high elevation of the road on the northern facade of the Hançerli Church, the wall on the northern facade is exposed to lateral thrust and moisture. In order to eliminate this damaging situation, the road level must be lowered. The mortar in the joints between the stones must be repaired and completed. Thus, the integrity of the walls will be ensured and the resistance of the walls against atmospheric conditions and seismic forces will be strengthened.

Since both monumental structures have been used with a similar function to their original functions, no changes have been made to affect the structural systems of the buildings and they have survived to the present day. In both structures, the compressive and tensile stresses are lower than the compressive and tensile strength of the stones. When allowable stress values of the stones are taken into consideration, it has been found that both buildings can withstand the tensile and compressive stresses occurring on them without any damage. As can be seen from the analysis, it is thought that these two monumental structures which are located in a moderate area in terms of earthquake risk can survive for many years if the factors causing the deterioration of the building blocks are eliminated. Structural and static analysis of the other historical buildings in the Cappadocia Region should be done to determine their current strength and conservation measures should be taken to transfer these artifacts to future generations.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): .9%

References

- [1] G. Çekiç, The site selection and formation of underground cities in Cappadocia and their effects on city planning at present: Kaymaklı and Derinkuyu cases. Master Thesis in Selçuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Konya, Turkey, 2018.
- [2] M.S. Pekak, Christian Religious Architecture of the Ottoman Period in Cappadocia Region (Especially in Kayseri and Around). Turkish Studies - International Periodical for The Languages, Literature and History of Turkish or Turkic, 9/10, 885–928, 2014. http://turkishstudies.net/files/1164497288_42PekakM.Sacit-trh-885-928.pdf.
- [3] E. Parman, Niğde Environmental Research. Journal of Hacettepe University Faculty of Letters, 5 (2), 123–148, 1988. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/huefd/issue/41160/497273>.
- [4] M.S. Pekak, Churches of Ottoman Period in Cappadocia Region: Examples, problems, suggestions. METU JFA, 2 (26), 249–277, 2009. <https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2009.2.13>.
- [5] F.P. Arabacıoğlu and I. Aydemir, I., The concept of revalorization in historical environments. YTÜ Arc. Fac. E-Journal, 2 (4), 204–212, 2007. <https://www.journalagent.com/megaron/pdfs/MEGARON-36349-ARTICLE-ARABACIOGLU.pdf>.
- [6] İ.O. Yazgan and A.İ. Ünay, Numerical modeling and structural analysis of Sinan Pasa Kulliyeh's Imaret in Yenisehir, Bursa. Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 8 (2), 1193–1203, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.598235>.
- [7] M. Korkanç, Deterioration of different stones used in historical buildings within Niğde province, Cappadocia. Construction and Building Materials, 48, 789–803, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.033>.
- [8] M. Korkanç and A. Savran, Impact of surface roughness of stones used in historical buildings on biodeterioration. Construction and Building Materials, 50, 279–294, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.073>.
- [9] B. Öztürk, Seismic behavior of two monumental buildings in historical Cappadocia region of Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 15, 3103–3123, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0082-6>.
- [10] M.E. Hatır, M. Korkanç and M.E. Başar, Evaluating the deterioration effects of buildings stones using NDT: The Küçükköy Church, Cappadocia Region, central Turkey. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 78 (5), 3465–3478, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1339-x>.
- [11] M. Ekiz, Archaeological Surveys in Niğde Province and Districts. TC. Culture and Tourism Ministry, Ankara, Turkey, 2015. <http://www.ttk.gov.tr/wp-content/uploads/2016/11/7-Nigde.pdf>.
- [12] İ. Acar Ata, and M.E. Başar, The evaluation of architectural tourism potentials of Greek heritage structures remained after the population exchange in Niğde's settlements. ICONARP International Journal of Architecture & Planning, 7 (1), 251–285, 2019. <https://doi.org/10.15320/ICONARP.2019.75>.
- [13] P. Gavrilovic, W.S. Ginell, V. Sendova and L. Sumanov, Conservation and Seismic Strengthening of Byzantine Churches in Macedonia. GCI Scientific Program reports, Getty Publications, Los Angeles, California, 2004.
- [14] S. Papida, W. Murphy and E. May, Enhancement of physical weathering of building stones by microbial populations. International Biodeterioration & Biodegradation, 46, 305–317, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00102-5).
- [15] E. Franzoni, S. Bandini and G. Graziani, Rising moisture, salts and electrokinetic effects in ancient

- masonries: From laboratory testing to on-site monitoring. *Journal of Cultural Heritage*, 15, 112–120, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.03.003>.
- [16] E. Yıldız, G. Yavuz and Ü.S. Yılmaz, The strengthening methods using in stone masonry historical buildings: an example from Ürgüp İbrahim Paşa Village. *e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences*, 6 (4), 1033–1052, 2011. <https://dergipark.org.tr/download/article-file/186154>.
- [17] K. Bani-Hani, K and S. Barakat, Analytical evaluation of repair and strengthening measures of Qasr al-Bint historical monument - Petra, Jordan. *Engineering Structures*, 28, 1355–1356, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.10.015>.
- [18] A. Koçak and T. Köksal, Investigation of Earthquake Behavior of the Church of St. Sergius and Bacchus in Istanbul/Turkey. *Advanced Materials Research*, 133/134, 821–830, 2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.821>.
- [19] J. Przewlocki and M. Zielinska, Analysis of the behavior of foundations of historical buildings. *Procedia Engineering*, 161, 362–367, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.575>.
- [20] M. Zielinska and J. Misiewicz, Analysis of historic brick walls' strengthening methods. *Procedia Engineering*, 161, 771–776, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.702>.
- [21] N. Jorquera, J. Ruiz, and C. Torres, Analysis of seismic design criteria of Santo Domingo Church, a Colonial Heritage of Santiago, Chile. *Revista de la Construcción*, 16 (3), 388–402, 2017. <https://doi.org/10.7764/RDLC.16.3.388>.
- [22] K. Güler, A.Sağlamer, Z. Celep and F. Pakdamar, Structural and earthquake response analysis of the Little Hagia Sofia Mosque. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, paper no 2652, August 1-6, 2004. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2652.pdf.
- [23] TS EN 1991-1-3, Eurocode 1-Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads. Turkish - Standards Institute, Ankara, Turkey, 2007.
- [24] A. Teymen, Prediction of basic mechanical properties of tuffs using physical and index tests. *Journal of Mining Science*, 54(5), 721–733, 2018. <https://doi.org/10.1134/S1062739118054820>.
- [25] A. Teymen and A. Kilic, Effect of grout strength on the stress distribution (tensile) of fully-grouted rockbolts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 280–287, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.022>.
- [26] Turkish Earthquake Code, Specifications for Building Design Under Earthquake Effects, 2018.





Kutu ve dairesel kesitli menfez akımlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi

Experimental and numerical investigation of flow through culverts in box and circular shapes

Kutsi S. Erduran¹ , Uğur Ünal^{2,*} , Ahmet Ş. Dokuz³ , Büşra Nas⁴ 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

³ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

⁴ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, Türkiye

Öz

Bu çalışmada menfezlerin detaylı hidrolik tasarım hesaplarında dikkate alınan altı farklı akım durumunda kutu ve dairesel enkesitli menfezler etrafında oluşan su yüzü profilleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan ve boyutları 10x0.309x0.45m olan deneysel kanal kullanılarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda su yüzü profillerine ait sayısal değerler yapılan ölçümlerin yanı sıra görüntü işleme tekniği kullanarak da elde olunmuştur. Böylece, çalışmada görüntü işleme tekniğinin burada tarif olunan akım koşullarında uygulanabilirliği de araştırılmıştır. Sayısal çalışmalar, açık kanal akımlarının bir boyutlu model çalışmalarında yaygın olarak kullanılan HEC-RAS yardımıyla yapılmıştır. Tedrici değişken akım bölgelerinde, su yüzü profilleri ayrıca direkt adım metodu ile de hesaplanmıştır. Sayısal model sonuçları, direkt adım metodu sonuçları, deneysel ölçüm ve görüntü işleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Genel olarak sayısal ve deneysel sonuçlara dayalı su yüzü profillerinin şekilsel olarak oldukça benzer olduğu görülmüştür. Ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldığında, HEC-RAS sayısal modelinin memba bölgelerinde genelde yüksek değerler verdiği, mansap bölgesinde su yüzü değişimlerinin ani olduğu yerlerde ise değişimleri yakalayamadığı görülmüştür. Görüntü işleme tekniğinin genel olarak ölçüm sonuçlarına benzerliği dikkat çekerken, akıma müdahale olmaksızın ve fiziksel ölçüm yapılamayan yerlerde de sonuçlar alınabilmesinin büyük bir avantaj olduğu görülmüştür. Bilindiği üzere, tekniğin sonuçlarının görüntü kalitesine ve görüntülerin sayısallaştırılmasında kullanılan algoritmaya bağlı olmasından ötürü, türbülans özelliğinin fazla olduğu kompleks akım bölgelerinde istenilen düzeyde iyi sonuçlar elde edilememiştir.

Abstract

In this study, experimental and numerical investigation of water surface profiles around culverts in box and circular shapes has been carried out under six different flow conditions, which are examined in a comprehensive hydraulic design of culverts. The experimental study has been conducted in a flume with dimensions of 10x0.309x0.45m in Department of Civil Engineering Hydraulics Laboratory at Niğde Ömer Halisdemir University. The numerical values representing water surface variations have been obtained not only the measurement but also using an image processing technique. Hence, it allows to study the applicability of the image processing technique to the similar flow conditions. Numerical modeling has been performed by using HEC-RAS, which is a widely used model for 1D free surface flow simulations. In addition, a direct step method has been applied in areas where the flow is gradually varied. Overall results obtained from the numerical and the experimental studies have been compared. Generally speaking, a good agreement has been observed between the numerical and the experimental results in terms of the shapes of water surface profiles. Comparing with the measurements, HEC-RAS numerical model mostly produces a higher water surface profiles upstream of the culverts and do not capture well downstream of the culverts where there are abrupt changes in the water surface. The results indicate that the water depth values obtained from image processing technique agrees well with the experimental data in general. It has also been seen that the most important advantages of the image processing techniques is that it allows to have flow data without disturbing flows and also in the areas where the physical measurement is impossible or too difficult. As it is known, the accuracy of the data depends on the quality of the images and the digitalization algorithm. Hence, the results are found to be unsatisfactory in cases where the flow is more complex due to the intense turbulence behavior and the quality of the obtained images are not good enough.

Anahtar kelimeler: Menfez, Su yüzü profilleri, Görüntü işleme tekniği, HEC-RAS

Keywords: Culvert, Water surface profiles, Image processing technique, HEC-RAS

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ugurunal@ohu.edu.tr (U. Ünal)

Geliş / Received: 18.08.2022 Kabul / Accepted: 04.10.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1163945

1 Giriş

Menfezler karayolu ve demiryolu gibi yapıların altına inşa edilen ve ana amaçlarından biri akarsu üzerindeki suyun bir taraftan diğer tarafa geçmesini sağlamak (drenaj amaçlı kullanım) olan sanat yapılarıdır [1]. Bunun dışında menfezler yol üst yapısı altından araç, yaya ve hayvan geçişlerinin sağlanmasına da imkân tanır. Drenaj amaçlı inşa edilen menfezlerde kesit boyutlarını öncelikle menfezin taşıma kapasitesi ve menfez membaindaki su derinliği belirlerken araç ve yaya geçidi için tasarlanan menfezlerde ise yol dolgusu kotu kesit boyutlarını belirlemektedir.

Menfezlerin hidrolik bakımdan tasarımları menfez içi akım özelliğine (basınçlı, serbest su yüzü akımı ve orifis akımı) bağlı olarak yapılır. Menfez içi akım özelliğini ise menfez önündeki kabarma derinliği, menfez giriş ve kesit geometrisi, uzunluğu, pürüzlülüğü ve menfez çıkışı kuyruk suyu seviyesi belirlemektedir. Taşıma kapasitesi üzerinde rol oynayan bu parametrelerin menfez taşıma kapasitesini yüksek ve menfez etrafında başka problemler (mansapta oyulma, memba da taşkın vb.) oluşturmayacak şekilde belirlenmesi gerekir. Örneğin, menfez verimliliği, keskin kenarlı kare bir menfez girişinden ziyade pahlı veya kanat duvarlı menfez girişi yapımıyla artacaktır. Enerji kayıplarına yol açan yersel yük kayıpları azalacağından taşıma kapasitesi artacaktır [2]. Bununla birlikte çıkış yapılarının da menfez içindeki akış hızını azaltıp doğal dere yatağındaki hıza yakınlaştırması verimlilik açısından önem arz etmektedir.

Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi menfezlerin de doğru bir şekilde projelendirilmesi gerek arzu edilen işlevi yerine getirmesi ve gerekse de ekonomik açıdan uygunluk için önemlidir. Bu yapıların yanlış projelendirilmesi veya uygulama hataları sonucu karayolu/demiryolu üzerinden su aşması, zemin stabilitesinin bozulması ve dolgu erozyonu gibi ciddi problemler ortaya çıkabilmektedir [3]. Yapılan çalışmalarda menfez civarı ve yol gövdesindeki kaplamalarda oluşan oturma ve deformasyon gibi bozulmaların menfez tasarımının doğru şekilde yapılmasından kaynaklı olduğu belirlenmiştir [3]. Menfezlerinin taşıma kapasitesinin çok üzerinde boyutlandırılması durumunda da yapım maliyetleri çok artacaktır.

Su yüzü profillerinin kanal/akarsu boyunca olan değişiminin bilinmesi o kanal/akarsuyun bulunduğu bölge için oldukça önemlidir [4]. Menfez verimliliğinin ve taşıma kapasitesinin belirlenmesi, menfez kapasitesinin üzerinde oluşabilecek muhtemel taşkınlara ait risk ve tehlike haritaların çıkartılması, alınacak önlemlerin ve maliyetlerinin belirlenmesi yapım öncesi atılması gereken adımlardır. Tüm bu adımlar, akım koşullarının (menfez taşıma kapasitesi, menfez girişi su derinliği ve menfez etrafı su yüzü profillerinin) doğru şekilde hesaplanması kritik bir öneme sahiptir. Dolayısıyla bu yapıların deneysel ve sayısal model çalışmalarıyla desteklenmiş detaylı hidrolik tasarımlarının yapılması önem arz etmektedir.

Su yüzü profillerinin belirlenmesinde son zamanlarda uygulanan yöntemlerden biri de görüntü işleme tekniğidir. Bu yöntemin en önemli avantajı akıma hiçbir şekilde müdahale etmeksizin su yüzü görüntülerin elde edilmesi ve

istenilen noktadan su yüzü değişiminin görüntüsünün belirlenen zaman aralığında alınabilmesidir. Elde olunan dijital görüntüler uygulanan tekniklerle sayısal değerlere dönüştürülmekte ve su yüzü profilleri hesap alanı içerisinde elde edilmektedir.

Görüntü işleme tekniği deneysel çalışmalar yapan araştırmacılar için büyük bir kolaylık sağlamakta ve oldukça iyi sonuçlar vermektedir [5]. Ayrıca, bu teknik, sayısal modellerin güvenilirlik testlerinde kullanılan deneysel çalışmalara ait sonuçların sayısallaştırılmasında kullanılan bir tekniktir [6].

Menfezlerin hidrolik tasarımlarında önemli bir nokta akımın giriş veya çıkış kontrollü akım olmasına bağlı olarak değişen akım tipidir. Bu çalışmanın amacı, giriş ve çıkış kontrollü akımları içeren altı farklı akım koşulu dikkate alınarak kutu ve dairesel enkesitli menfezler etrafında oluşan su yüzü değişiminin deneysel ve sayısal olarak elde edilmesi, sonuçların karşılaştırılarak menfez tasarımları için burada bahsedilen yöntemlerin uygulanabilirliklerinin araştırılmasıdır.

Çalışmada Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan ve boyutları Bölüm 2'de tanımlanan deneysel kanal kullanılarak menfezlerle ilgili çeşitli fiziksel deneyler yürütülmüştür. Deneylerde enkesiti kutu ve dairesel olarak değişen ve özellikleri yine Bölüm 2'de verilen menfez tipleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ölçüm cihazı (limnometre) ve görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilmiş, sayısal modelleme çalışmalarında ise doğruluğu ispatlanmış olan Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) ticari paket programından yararlanılmıştır. Bunların yanı sıra prizmatik kanallarda su yüzü profillerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan direkt adım metodu ile de su yüzü profilleri hesaplanmıştır.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de menfez ve menfez hidroliği hakkında bilgiler verilmiş, Bölüm 2'de ise deneysel ve sayısal modelleme çalışmalarından bahsedilmiştir. Burada deneysel çalışmalar başlığı altında deneysel kanal, menfez tipleri ve ölçüm yöntemleri hakkında bilgiler yer verilmiş, sayısal modelleme alt başlığı altında HEC-RAS yazılımı hakkında bilgiler sunulmuştur. Ayrıca yine bu bölümde direkt adım metodu ile su yüzü profillerinin elde edilmesine yönelik hesap şekilleri de anlatılmıştır. Bölüm 3'te kutu ve dairesel enkesitli menfezler için deneysel ve sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen bulgulara verilmiş, çalışmadan elde edilen sonuçlar ise Bölüm 4'te verilmiştir.

2 Materyal ve metod

Bu bölümde laboratuvar deneylerinin yapıldığı kanaldan, kullanılan menfez tiplerinden, görüntü işleme tekniğinden ve sayısal modelleme çalışmalarından bahsedilmektedir.

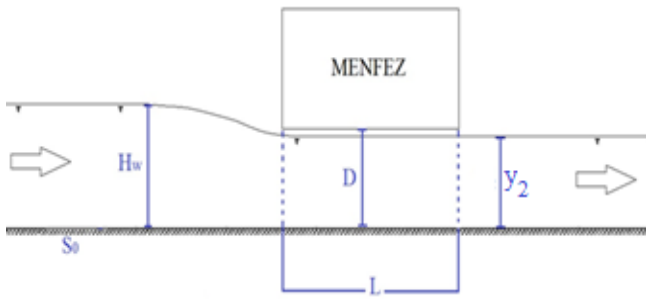
2.1 Deneysel çalışmalar

Farklı enkesitteki menfez tiplerinin akım üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada deneysel çalışmalar için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan dikdörtgen enkesitli ve boyutları 10x0.309x0.45 m olan deneysel kanal kullanılmıştır (Şekil 1). Kanal taban eğimi, akım debisi ve mansap su derinliği gibi parametreler değiştirilerek literatürde menfezler için belirtilen hidrolik koşullar laboratuvar ortamında oluşturulmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmalar Şekil 2’de tanımlanan ve Tablo 1’de verilen hidrolik koşullar ile bu koşulların sağlanması için Tablo 2 ve Tablo 3’te sunulan veriler dikkate alınarak yürütülmüştür. Tablo 1’de görülen H_w menfezin girişindeki su derinliğini, D menfezin yüksekliğini, y_0 kanaldaki normal derinliği, y_c kanaldaki kritik derinliği ve y_2 menfezin çıkış kesitindeki su seviyesini ifade etmektedir.



Şekil 1. Deneysel kanal



Şekil 2. Menfez hidroliği [7]

Tablo 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan menfezlere ait hidrolik koşullar [7]

No	H_w/D	$y_0-y_c-y_2-D$	Eğim	Akım Çeşidi	Giriş Şekli	Kontrol Durumu
I	$H_w/D < 1,2$	$y_0 > y_c < y_2 < D$	Az	Nehir Rejimi		Giriş
II	$H_w/D < 1,2$	$y_0 < y_c > y_2 < D$	Dik	Sel Rejimi	Serbest	Giriş
III	$H_w/D < 1,2$	$y_0 < y_c < y_2 < D$	Dik	Sel Rejimi		Giriş
IV	$H_w/D > 1,2$	$y_2 < D$	Herhangi Bir Eğim	Orifis		Giriş
V	$H_w/D > 1,2$	$y_2 < d, y_0 > D$	Herhangi Bir Eğim	Basınçlı	Batmış	Çıkış
VI	$H_w/D > 1,2$	$y_2 > d, y_0 > D$	Herhangi Bir Eğim	Basınçlı		Çıkış

Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kutu enkesitli menfez için kullanılan veriler

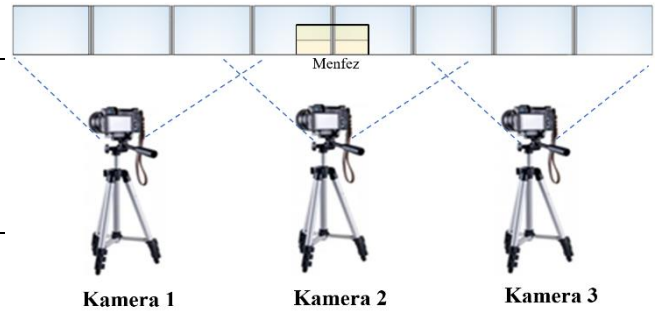
Durum No	Debi (m^3/sa)	Kanal Eğimi (%)	Mansapta Bilinen Su Derinliği (cm)
I	20	0.2	-
II	10	2.5	-
III	5	2.0	15
IV	80	0.2	-
V	70	0.02	-
VI	50	0.02	15

Tablo 3. Deneysel çalışmalarda dairesel enkesitli menfez için kullanılan veriler

Durum No	Debi (m^3/sa)	Kanal Eğimi (%)	Mansapta Bilinen Su Derinliği (cm)
I	20	0.2	-
II	10	2.5	-
III	5	2.0	15
IV	50	0.2	-
V	70	0.02	-
VI	80	0.02	20

Deneysel çalışmaların her biri deneylerin tekrarlanabilirliğini ortaya koymak adına üç defa tekrarlanmış ve her bir deneysel çalışma için üç ayrı cep telefonu kamerası ile video kayıtları alınmıştır (Şekil 3). Deneylerde görüntü işleme tekniğinin kullanımını kolaylaştırmak ve su-hava arakesitini belirginleştirmek için suya kırmızı renkli gıda boyası eklenerek renklendirilmiştir. Böylece kanalın yan tarafından alınan video kayıtları ile 1 boyutlu olarak akımın zamanla değişimini kanal boyunca izlemek daha kolay hale getirilmiştir (Şekil 4a). Ayrıca yine kırmızı renkli gıda boyası ile renklendirilmiş suyu videolarda daha kolay ayırt etmek için kanalın arka duvarı beyaz renkli kağıtlarla kaplanmıştır (Şekil 4b).

Deneysel çalışmalarda boyutları 13.3x13.3 cm ve uzunluğu 1.2 m olan kutu (kare) ve çapı 15.0 cm uzunluğu 1.2 m olan dairesel enkesitli menfez tipleri kanalın 5,65 m ile 6.85 m arasına yerleştirilerek kullanılmıştır (Şekil 5). Ayrıca deneyler esnasında menfez kenarlarından sızma olmaması için dört adet kauçuk sızdırmazlık şeridi menfez kenarlarına yerleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kameraların konumu



Şekil 4. a) Farklı durumlar için deneysel çalışmalara ait görüntüler b) kanal arka duvarının beyaz kağıtla kaplanması



Şekil 5. Deneysel çalışmalarda kullanılan menfez tipleri ve sızdırmazlık şeritleri

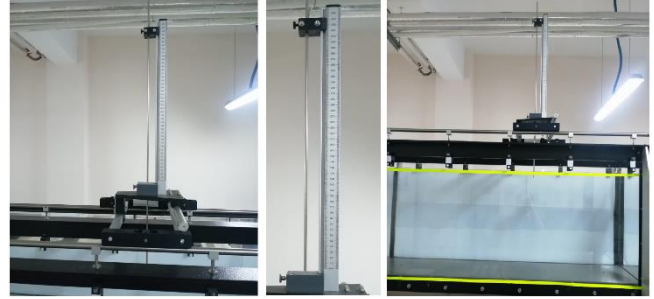
2.1.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm yöntemleri

Bu bölümde kanal boyunca elde edilen akım derinliklerinin hangi ölçüm yöntemleri kullanılarak elde edildiği açıklanmaktadır.

2.1.1.1 Limnimetre ile ölçüm

Deneysel çalışmalarda su yüzü profillerine ait akım derinliklerinin ölçülmesi için öncelikle hidrolik laboratuvarında bulunan limnimetre cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ucunda iğne bulunan üzerinde mm cinsinden şerit metre yer alan ve kanal üzerinde herhangi bir noktaya kolaylıkla hareket ettirilebilen bir ölçüm cihazıdır (Şekil 6).

Cihaz ölçülmesi istenen su derinliğinin bulunduğu noktaya getirilerek su yüzeyine değdirilir ve bu noktadaki akım derinliği şerit metre üzerinden okunur. Deneysel çalışmalarda menfeze yakın bölgelerde her 5 cm'de bir diğer bölgelerde ise 10 cm bir bahsedilen şekilde ölçümler alınmıştır.



Şekil 6. Limnimetre ölçüm cihazı

2.1.1.2 Görüntü işleme tekniği

Bu çalışmada deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin sayısallaştırılmasında görüntü işleme tekniğinden yararlanılmıştır.

Bu teknik kanal içinde belli noktalara yerleştirilen metal çubuklarla elektrik iletkenliğine bağlı olarak ölçülen tekniğe nazaran üstünlüğe sahiptir. Görüntü işleme tekniği ile zamanla değişen akıma ait görüntünün bir defa alınması ile deneylerin tekrarlanması ortadan kalkmakta ve sadece noktasal ölçümlerin değil aynı zamanda su yüzünün kanal boyunca anlık değişimi izlenebilmektedir [5]. Diğer yöntemlerde ise kısıtlı sayıda noktadan ölçüm alınmakta farklı noktalarda ölçüm alınmak istendiğinde ise deneyin tekrarlanması gerekmektedir. Ayrıca metal çubuklarla yapılan bu yöntemler yüksek maliyete sahiptir ve akımı etkilemektedir. Görüntü işleme tekniğinde ise kanal genişliğinin her noktasındaki su seviyesi değişimi akıma müdahale edilmeden elde edilebilmektedir [5].

Deneysel çalışmalarda görüntü işleme tekniği ile suyun kanal içerisinde oluşturacağı su yüzü profili, kanalın yan tarafına yerleştirilen üç adet telefon kamerası ile bir boyutlu olarak izlenmiştir. Bunun için öncelikle kanalın yan duvarları üzerinde herhangi bir noktadaki su yüksekliklerinin ölçülebilmesi amacıyla kanalın 0. ve 42. cm'lerine yeşil renkte işaretleyici şeritler yerleştirilmiştir (Şekil 7). Birinci şerit kanal duvarının en altına, ikinci şerit ise ilk şeritten itibaren 42 cm yüksekliğe yerleştirilmiştir. Bu iki yeşil şerit aracılığıyla suyun kanal içerisindeki farklı noktadaki su yüzü profiline ait yüksekliklerin olabildiğince doğru bir şekilde sayısallaştırılması sağlanmıştır. Yeşil şeritlerin kullanılması, renk filtresi kullanarak ilgili noktaların doğru bir şekilde tespit edilmesi amacıyla seçilmiştir (Şekil 8). Benzer şekilde suyun daha net tanımlanabilmesi için de su kırmızı gıda boyasıyla renklendirilmiş ve kırmızı renk filtresi kullanılarak suyun kanal içerisindeki ilerleyişi takip edilebilmiştir (Şekil 9). Şekil 9'da kırmızı renk üzerinde görülen kesiklikler kanalı yan taraftan destekleyen dikmelerden ve menfezi sınırlandıran kenarlardan dolayı oluşmuştur.



Şekil 7. Deneysel kanalda yeşil şeritlerin kullanımı

Bu teknikte kullanılan adımlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

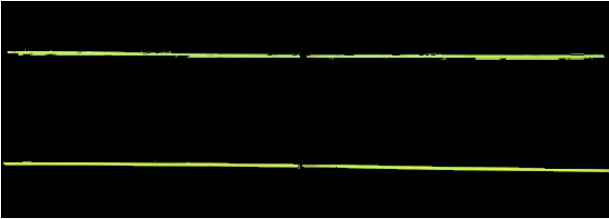
Adım 1: Kutu/dairesel menfez deneyinin video görüntüsü çerçevelere ayrılarak her bir çerçeve için Adım 2-Adım 5 işlemler.

Adım 2: Kanal içerisinde 0. ve 42. cm yüksekliklere yerleştirilen yeşil şeritler yeşil renk filtresi aracılığıyla tespit edilir ve her sütun için bir pikselin cm türünden karşılığı hesaplanır.

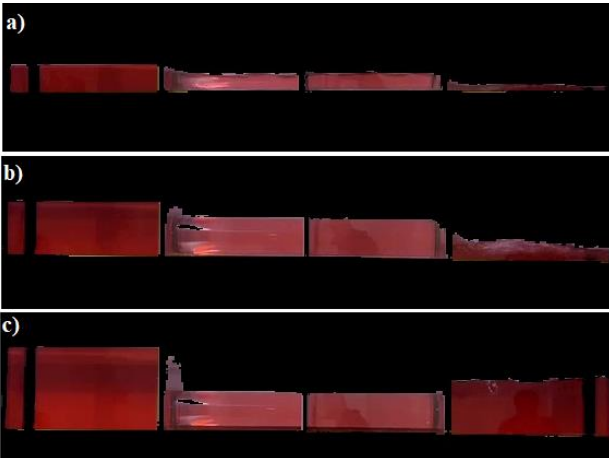
Adım 3: Kırmızı gıda boyasıyla renklendirilmiş olan su kırmızı renk filtresi aracılığıyla tespit edilir ve ilgili çerçevede suyun bulunduğu tüm sütunlardaki en yüksek değerleri belirlenir.

Adım 4: Belirlenen su yüksekliğinin cm türünden karşılığı hesaplanır.

Adım 5: İlgili çerçeveye ait sonuçlar bir metin dosyasına kaydedilir.



Şekil 8. Yeşil şeritlerin filtrelenmesi



Şekil 9. Farklı durumlar için kırmızı renkli suyun filtrelenmesi a) Durum I b) Durum V c) Durum VI

2.2 Sayısal modelleme çalışmaları

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerinin açık kanal problemlerindeki kullanım alanlarının yaygınlaşması serbest yüzeyli akım problemlerinin daha hızlı, kolay ve maliyet açısından daha ekonomik bir şekilde çözülmesine imkân sağlamıştır. Gelişen teknolojiyle birlikte bilgisayarların hesaplama güçlerinin ve hızlarının artması bu tür problemlerin çözüm süresini oldukça kısaltmış ve problemlerin iki hatta üç boyutlu çözümleri olanaklı hale gelmiştir. Analiz süresi ve probleme ait tasarımın hızlı bir şekilde elde edilmesi, değişen hidrolik akım koşulları altında analizlerin tekrarlanması kolaylaştırmış ve en doğru çözüme ulaşılması noktasında imkân sağlamıştır.

Çalışmanın sayısal modelleme kısmında HEC-RAS ticari paket programından yararlanılmıştır. Program, prizmatik kanallar ile doğal akarsuların hidrolik hesaplamalarını gerçekleştirmek üzere Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği Hidroloji Mühendisliği Merkezi tarafından tasarlanmış grafik tabanlı bir yazılımdır [8, 9]. HEC-RAS programı ile üniform ve üniform olmayan akımlarda su yüzü profili, sediment ve çeşitli hidrolik yapıların hesaplamaları ile su kalitesi analizleri yapılabilmektedir [10, 11]. Elde edilen veriler ise tablo, grafik ve animasyonlar şeklinde sunulabilmektedir. Dolayısıyla, program açık kanal akımlarının analizlerinde mühendisler ve araştırmacılar tarafından sıklıkla başvurulan kullanışlı bir yazılımdır [12].

HEC-RAS yazılımında farklı problemlere özgü analizlerin yapılabilmesi için öncelikle programa birtakım verilerin işlenmesi gerekmektedir. Bu veriler, incelenecek her bir durum/problem için farklı olmakla birlikte genellikle geometrik (kanal enkesitleri, hidrolik yapılar), akım ve sınır şartları verilerinden oluşmaktadır.

Program su yüzü profillerine ait hesaplamalarda farklı çözüm yöntemlerini kullanmaktadır. Enerji denklemi (standart adım), momentum prensibi, Yarnell ve WSPRO gibi yöntemler bunlardan bazılarıdır [13, 14]. Bu çalışmada menfezlerin hidrolik hesabı için **Denklem (1)** de verilen enerji denklemi yöntemi kullanılmıştır.

$$WS_u + \alpha_u \frac{V_u^2}{2g} = WS_d + \alpha_d \frac{V_d^2}{2g} + LS_f + C \left| \alpha_u \frac{V_u^2}{2g} - \alpha_d \frac{V_d^2}{2g} \right| \quad (1)$$

Burada; alt indisler u memba ve d mansap kesitlerini, WS kıyas düzleminde itibaren su yüzü kotuna kadar olan düşey mesafeyi, α kinetik enerji düzeltme katsayısını, V ortalama hızı, g yerçekimi ivmesini, L memba ve mansap kesitleri arasındaki uzaklığı, S_f ortalama enerji çizgisi eğimini ve C daralma veya genişleme katsayısını ifade etmektedir.

2.3 Direkt adım metodu

Direkt adım metodu tedrici değişen akımlarda su yüzü profillerini hesaplamak amacıyla kullanılan ve prizmatik kesitlere uygulanan bir yöntemdir [15]. Hesaplama açısından kolay ve pratik bir yöntem olması sebebiyle su yüzü profillerinin belirlenmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Metot, bilinen su derinliklerine karşılık gelen enkesitler arası mesafelerin adım adım hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Direkt adım metoduna göre belirlenen su derinliklerin bulunduğu ardışık enkesitler

arasındaki ara mesafe **Denklem (2)**'de verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{S_0 - \bar{S}_f} \quad (2)$$

Burada; S_0 taban eğimini, \bar{S}_f iki ardışık kesit arasındaki ortalama enerji çizgisi eğimini, ΔE iki ardışık kesit arasındaki enerji seviyesi farkını ve Δx iki ardışık kesit arasındaki mesafeyi göstermektedir. \bar{S}_f ve E sırasıyla **Denklem (3)** ve **Denklem (4)** ile hesaplanmaktadır.

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (3)$$

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (4)$$

Burada; Q kesitten geçen debiyi, n Manning sürtünme katsayısını, A kesit alanını, R hidrolik yarıçapı, y su derinliğini ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde kutu ve dairesel enkesitli menfezlerin her biri için 6 tane olmak üzere toplam 12 durum için deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları sonucu elde edilen su yüzü profillerine ait bulgular karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır (**Şekil 10 - Şekil 21**).

3.1 Kutu enkesitli menfeze ait bulgular

Kutu enkesitli menfez için deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen 6 farklı akım durumuna ait su yüzü profillerinin kanal boyunca değişimi **Şekil 10 - Şekil 15**'te verilmektedir. Kutu enkesitli menfez ve dairesel enkesitli menfez için elde edilen ve **Şekil 10 - Şekil 21** arasında verilen sonuçlarda "deneysel ölçüm" şeklinde ifade edilen su yüzü profilleri, her bir akım durumu için üçer kez tekrarlanan laboratuvar deneyleri sırasında limnometre ile ölçülerek elde edilen sayısal değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde olunmuştur. Memba bölgesi için deneysel ölçüm ile tekrarlanan deney sonuçları arasındaki % mutlak maksimum bağıl hata deneysel ölçüm sonuçları baz alınarak kutu enkesitli menfez için %3.98 dairesel enkesitli menfez için %5.36 olarak hesaplanmıştır. Mansap bölgesi için ise bağıl hatalar kutu enkesitli menfezde %8.40 dairesel enkesitli menfezde %7.84 olarak elde edilmiştir.

Şekiller incelendiğinde kanal boyunca HEC-RAS programının ürettiği su yüzü profillerinin genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Menfez membanda su yüzü profillerine ait deneysel ölçüm sonuçları (limnometre ölçümleri) baz alınarak hesaplanan bağıl hatalar **Tablo 4**'te verilmiştir. **Tablo 4** incelendiğinde HEC-RAS model sonuçlarında maksimum bağıl hata %40.94 ile Durum III'te ve ikinci olarak %15.95 ile Durum V'te hesaplanmıştır. Diğer durumlarda bağıl hatanın %10'nun altında olduğu görülmüştür. Bilindiği üzere, menfez girişlerinde akım oldukça kompleks yapıdadır ve menfez şekli, menfez giriş açıklığının alanı ve giriş yapısının şekli buradaki su derinliği

H_w 'yi etkileyen en önemli faktörlerdir. Menfez girişinde özellikle giriş kontrollü akımlarda çok daha kompleks akımlar oluşmaktadır. Bu akımlar, vorteksler içeren yoğun üç boyutlu akım özelliği gösterir. Bu akımların HEC-RAS gibi bir boyutlu modeller ile hesaplamalarında elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçları doğal olarak farklılıklar gösterebilir. Tasarım açısından HEC-RAS'dan elde edilen menfez önü su derinliğinin büyük olması güvenilir tarafta olurken, ekonomik açıdan maliyetleri artırabilir.

Menfezin mansap bölgesinde ise, özellikle Durumlar I, IV ve V'de su yüzünde gözlenen ani değişimleri (dalgalanmaları) HEC-RAS yazılımının yakalayamadığı görülmektedir.

Şekil 10 - Şekil 15 incelendiğinde direkt adım metodu ile elde edilen sonuçların ölçüm sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, direkt adım metodu tedrici değişken akım özelliği taşıyan bölgelere uygulanırken profillerin kontrol noktalarındaki bilinen su derinlikleri (hesap başlangıcındaki su derinlikleri) olarak deneyler sırasında o noktalarda ölçülen su derinliklerinin alınmasıdır. Direkt adım metodunun sonuçlarında görülen maksimum bağıl hatanın %12.94 ile menfez içi akımın hesaplandığı Durum II'de meydana geldiği bunun dışındaki tüm durumlarda %10'nun altında olduğu tespit edilmiştir (**Tablo 4**). Direkt adım metodu tedrici değişken akımların analizinde kullanıldığından kanalın mansap kısmında yer alan ve ani olarak değişen su yüzü profillerinin hesaplanmasında bu yöntemle yer verilmemiştir.

Son olarak görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen sonuçların genel eğilim olarak deneysel ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en büyük bağıl hatanın %51.15 ile Durum III'te ve sonrasında %17.05 ile Durum II'de olduğu gözlemlenmiştir (**Tablo 4**). Bu farkların ortamdaki yansıma ve görüntü işleme tekniğinin algoritmik olarak maksimum kırmızı rengi takip etmesi nedeniyle kanal duvarına yapışan kırmızı renkli akışkan parçacıklarını yakalamasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Diğer tüm durumlar için bağıl farkların %10'unun altında olduğu belirlenmiştir. Görüntü işleme tekniği ile menfez içi su yüzü profilleri de elde edilmiş ancak deneyler sırasında menfez içerisinde ölçümler yapılamadığından karşılaştırma yapılamamıştır.

Tablo 4. Kutu enkesitli menfez memba bölgesi için hesaplanan maksimum bağıl hatalar

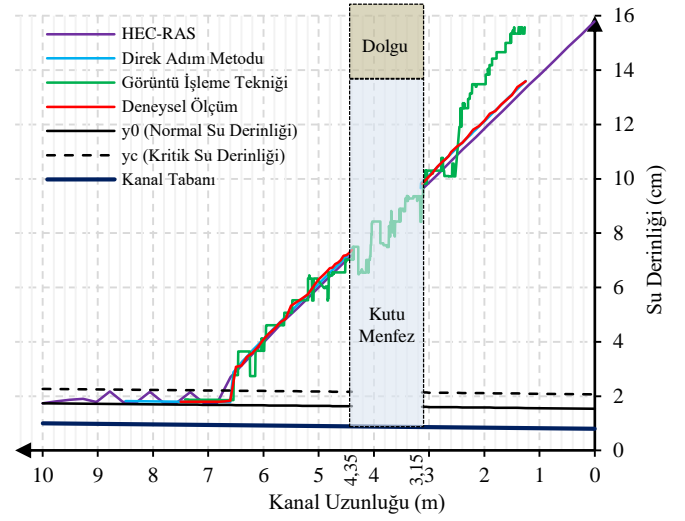
Kutu Menfez	HEC-RAS	Gör. İşl. Tekn.	Direkt Adım Metodu
Durum-I	4.53	8.06	0.95
Durum-II	6.62	51.15	12.94
Durum-III	40.94	17.05	6.17
Durum-IV	6.31	10.68	0.87
Durum-V	15.95	3.64	1.33
Durum-VI	7.39	6.02	0.63

Memba bölgesinin dışında mansap bölgesi için de deneysel ölçüm sonuçları baz alınarak bağıl hata değerleri hesaplanmıştır. **Tablo 5**'te görüleceği üzere tedrici değişken akımın görüldüğü Durum III ve Durum VI hariç, diğer durumlarda mansap bölgesinde HEC-RAS ve görüntü işleme tekniğinden elde edilen sonuçlara göre hesaplanan bağıl

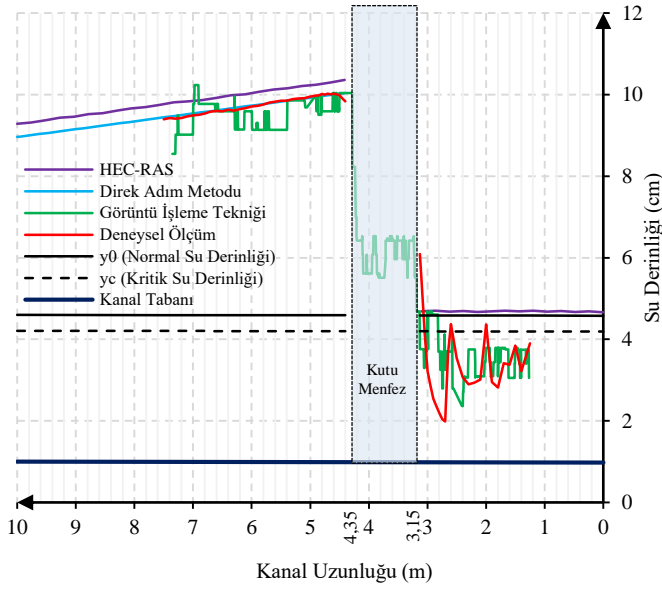
hata değerleri memba bölgesine göre oldukça fazladır. Bu farklılıkların, daha öncede belirtildiği üzere HEC-RAS tarafından iyi bir şekilde tarif olunamayan ani değişken ve süresiz akım yapısından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Süresiz yapı sadece renk filtrelemesi uygulanan görüntü işleme tekniği açısından problem oluşturmuştur.

Tablo 5. Kutu enkesitli menfez mansap bölgesi için hesaplanan maksimum bağıl hatalar

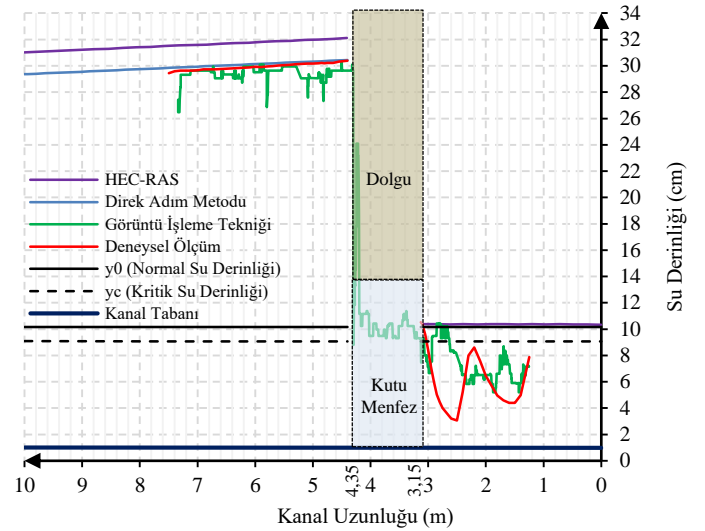
Kutu Menfez	HEC-RAS	Gör. İşl. Tekn.	Direkt Adım Metodu
Durum-I	249.48	196.68	-
Durum-II	124.39	160.09	-
Durum-III	3.25	19.39	0.69
Durum-IV	239.00	234.13	-
Durum-V	218.80	151.92	-
Durum-VI	11.04	11.62	11.11



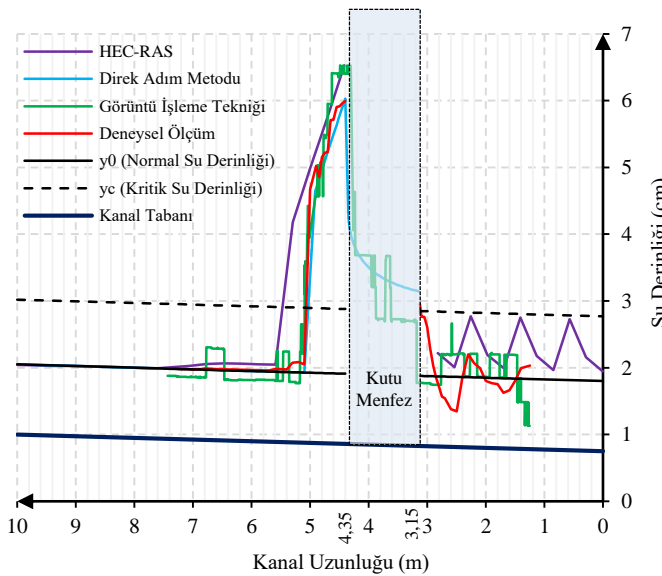
Şekil 12. Kutu menfez durum-III için su yüzü profilleri



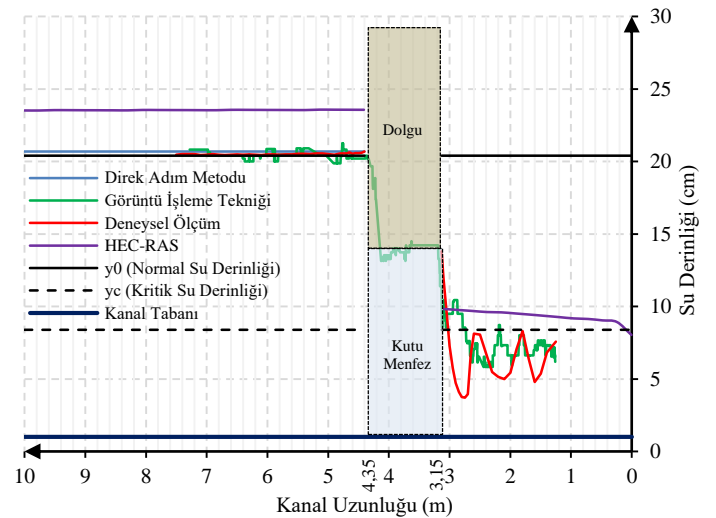
Şekil 10. Kutu menfez durum-I için su yüzü profilleri



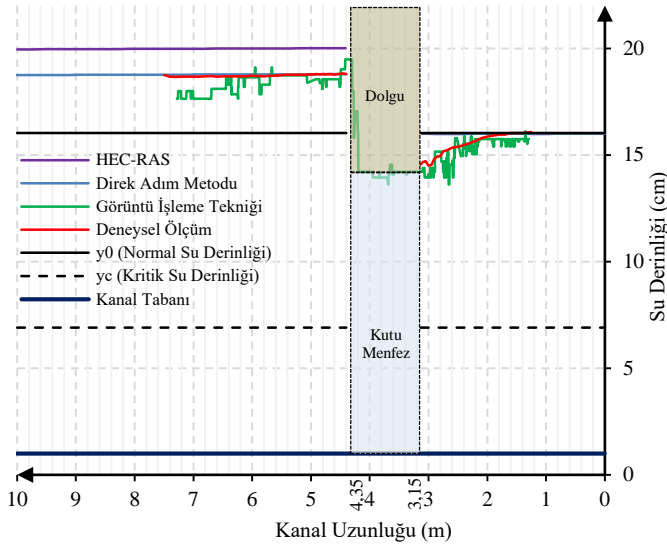
Şekil 13. Kutu menfez durum-IV için su yüzü profilleri



Şekil 11. Kutu menfez durum-II için su yüzü profilleri



Şekil 14. Kutu menfez durum-V için su yüzü profilleri



Şekil 15. Kutu menfez durum-VI için su yüzü profilleri

3.2 Dairesel enkesitli menfeze ait bulgular

Dairesel enkesitli menfez için toplam 6 hidrolik durumdan elden edilen su yüzü profillerinin kanal boyunca değişimi Şekil 16 - Şekil 21 arasında verilmektedir.

Şekil 16 - Şekil 21 incelendiğinde HEC-RAS programı aracılığıyla elde edilen su yüzü profilleri ile deneysel ölçümler yardımıyla elde edilen su yüzü profilleri arasında memba bölgesi için en büyük bağıl hatanın %40.94 ile Durum III'te ve ikinci sırada %17.83 ile Durum V'te olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 6). Bunun dışında diğer durumlar için HEC-RAS sonuçlarının deneysel ölçüm sonuçlarıyla arasındaki bağıl hataların %15'in altında olduğu görülmektedir. HEC-RAS sonuçları ile ölçüm sonuçları arasındaki farkların kutu enkesitli menfezde açıklanan nedenlerden kaynaklı olduğu ve dairesele enkesitli menfez girişinde kayıpların daha az oluşu nedeniyle burada sonuçların ölçüm sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir. Menfez mansabında kutu enkesitli menfezde olduğu gibi su yüzünün ani değişim gösterdiği durumlarda HEC-RAS'm bu değişimleri yakalayamadığı görülmektedir.

Kutu enkesitli menfezde olduğu gibi direkt adım metodu tedrici değişen akım bölgelerine uygulanmış ve Tablo 6'da verilen bağıl hata sonuçlarından da görüldüğü üzere maksimum mutlak bağıl hata %5.01 olarak hesaplanmıştır.

Görüntü işleme tekniği ile elde edilen sonuçların Bölüm 3.1'de kutu enkesitli menfez için açıklanan sebeplerden dolayı deneysel ölçüm sonuçlarıyla arasında en fazla Durum II'de gözlenen %66.98'lik bir bağıl hata hesaplanmıştır. Durum III'te %19.53'lük bir maksimum bağıl hata olduğu diğer durumlarda ise bağıl hatanın %10.14 ve altında olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6).

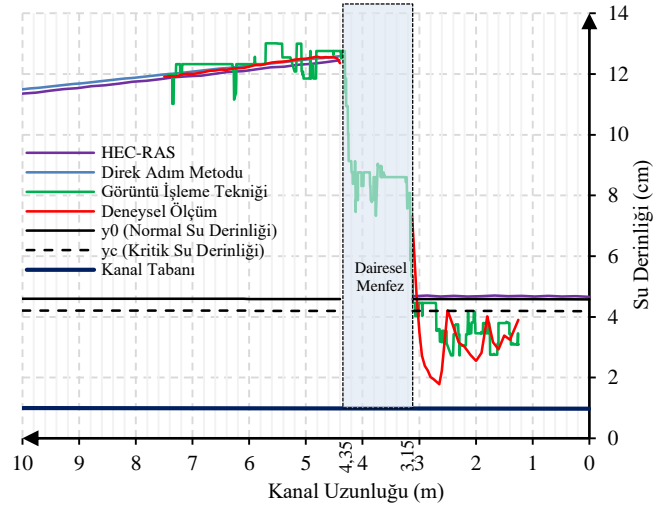
Dairesel enkesitli menfezin mansap bölgesi için de bağıl hata değerleri hesaplanmış ve Tablo 7'de verilmiştir. Memba bölgesi ile karşılaştırıldığında Durum III ve Durum VI dışındaki durumlarda gözlenen bağıl hataların fazlalığının daha önce belirtildiği şekilde ani değişken ve süreksiz akım yapısından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 6. Dairesel enkesitli menfez memba bölgesi için hesaplanan maksimum bağıl hatalar

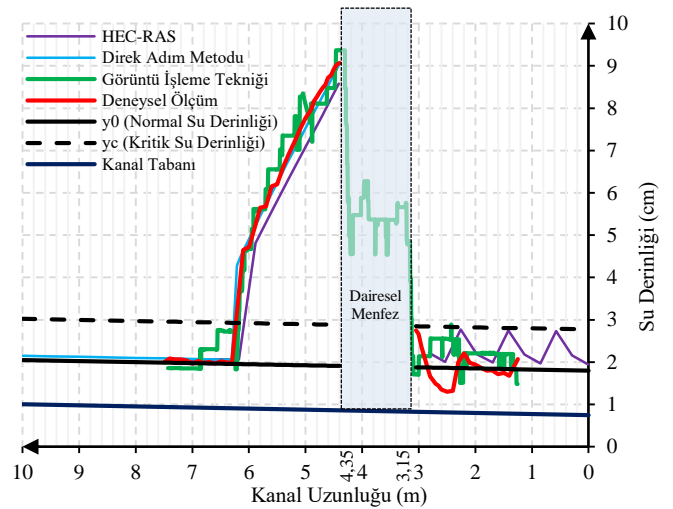
Dairesel Menfez	HEC-RAS	Gör. İşl. Tekn.	Direkt Adım Metodu
Durum-I	1.29	10.14	0.97
Durum-II	15.00	66.98	4.38
Durum-III	40.94	19.53	5.01
Durum-IV	3.05	7.00	0.39
Durum-V	17.83	8.29	0.83
Durum-VI	8.96	8.30	0.72

Tablo 7. Dairesel enkesitli menfez mansap bölgesi için hesaplanan maksimum bağıl hatalar

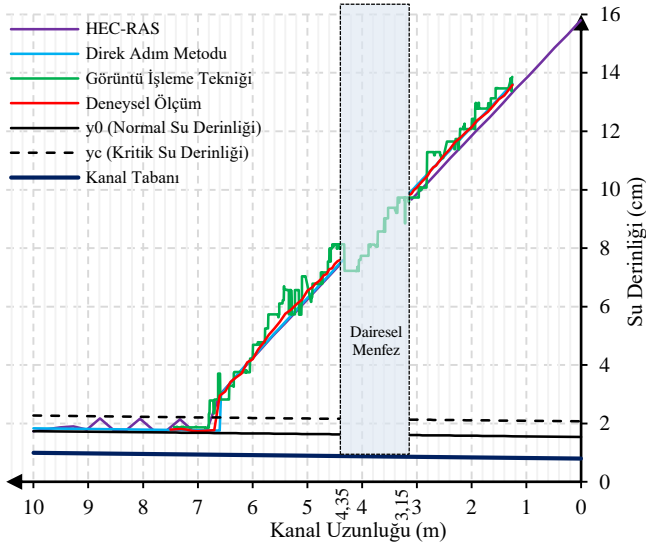
Dairesel Menfez	HEC-RAS	Gör. İşl. Tekn.	Direkt Adım Metodu
Durum-I	371.21	293.71	-
Durum-II	284.31	329.39	-
Durum-III	5.08	6.53	5.01
Durum-IV	280.26	135.73	-
Durum-V	252.64	172.96	-
Durum-VI	14.20	6.07	14.24



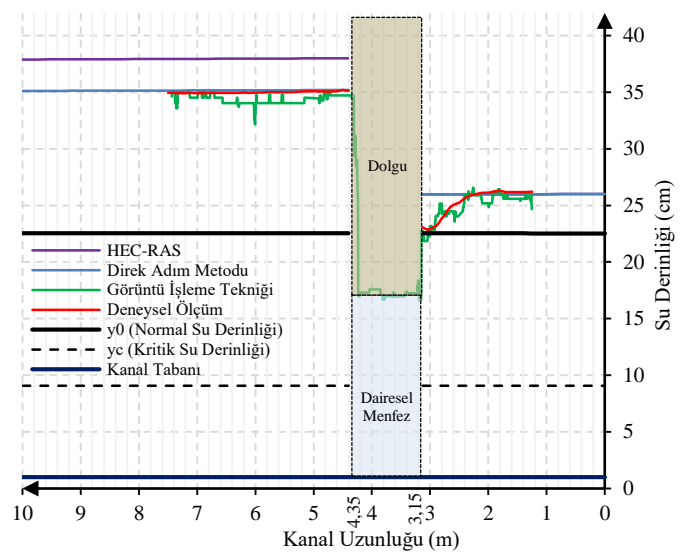
Şekil 16. Dairesel menfez durum-I için su yüzü profilleri



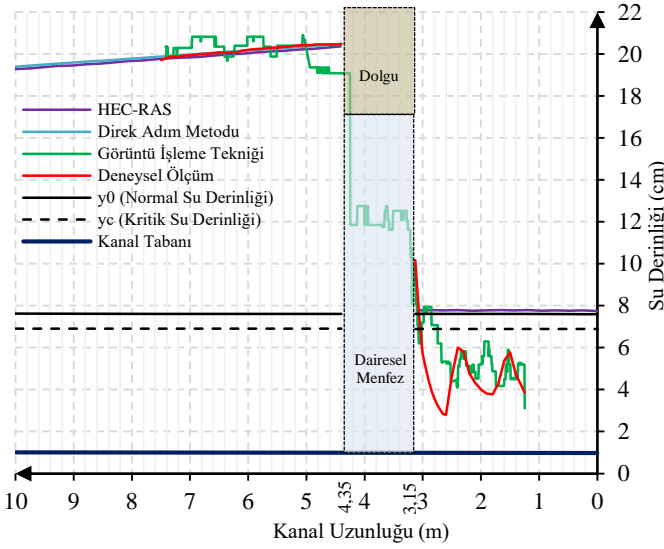
Şekil 17. Dairesel menfez durum-II için su yüzü profilleri



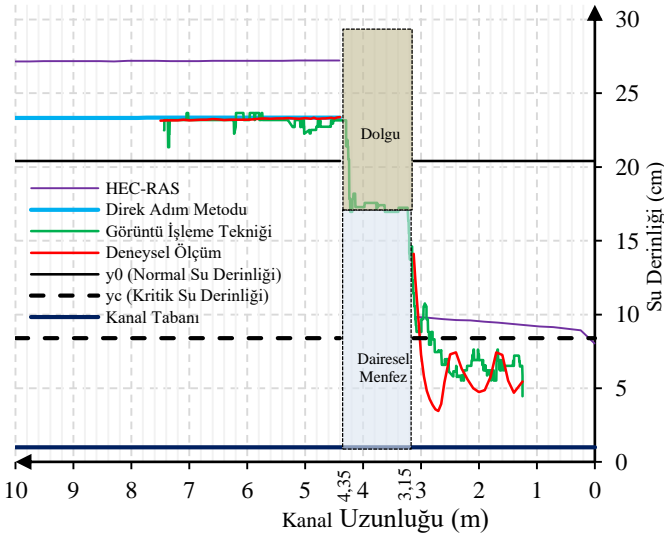
Şekil 18. Dairesel menfez durum-III için su yüzü profilleri



Şekil 21. Dairesel menfez durum-VI için su yüzü profilleri



Şekil 19. Dairesel menfez durum-IV için su yüzü profilleri



Şekil 20. Dairesel menfez durum-V için su yüzü profilleri

4 Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada kutu ve dairesel enkesitli menfezler etrafında oluşan su yüzü profilleri menfezlerin detaylı hidrolik tasarımında göz önüne alınan akım koşulları altında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Su yüzü profillerinin şekilleri dikkate alınarak genel bir değerlendirme yapılacak olunursa, sayısal ve deneysel sonuçların benzerlik gösterdiği söylenebilir.

HEC-RAS sayısal modelinin sonuçlarına dayalı çizilen su yüzü profillerinin memba bölgesinde kutu enkesitli menfeze ait Durum III hariç hepsinde ve dairesel enkesitli menfeze ait Durum V ve VI'da daha yüksek olduğu görülmüştür. Benzer şekilde HEC-RAS sonuçlarından elde olunan ve menfez tasarımlarda önemli bir parametre olan menfez memba su derinliği değerleri de deney sonuçlarından yüksek bulunmuştur. Mansap bölgesinde ani su yüzü değişimleri HEC-RAS tarafından genel olarak yakalanamamıştır.

Direk adım metodu, profil hesaplarında kullanılan kontrol noktalarındaki başlangıç su derinliği değerleri, ölçümlerden ve/veya deneylerin başlangıcında oluşturulan su derinlikleri alınarak tedrici değişken akım bölgelerine uygulanmış ve doğal olarak uygulandığı akım bölgelerinde ölçüm sonuçlarına çok yakın sonuçlar vermiştir.

Görüntü işleme tekniğinin akıma müdahale olmaksızın daha doğru sonuçlar üretmesi ve fiziki olarak ölçümlerin yapılmadığı menfez iç bölgesi gibi yerlerde de sonuçların alınabilmesi büyük bir avantaj oluşturmaktadır. Görüntü işleme tekniğinin görüntü kalitesi ve sayısallaştırma algoritmalarının iyileştirilmesi (özellikle su yüzü değişimlerinin yoğun olduğu kompleks akım bölgelerinde) ile burada tarif olunan her durum için çok daha iyi sonuç vereceği açıktır. Bu çalışmada da menfez giriş ve çıkış bölgelerinde (menfez içi ölçüm yapılamadığından karşılaştırma yapılamamıştır) görüntü işleme tekniği kullanılarak elde olunan su yüzü profillerinin deneysel ölçüm sonuçlarına oldukça yakın olduğu düşünülmektedir. Deneysel çalışmalarda karşılaşılan ölçüm hatalarının

görüntü işleme tekniğinde olmaması ve tekniğin fiziksel deneylerde sıklıkla uygulanan deney tekrarlarına çok ihtiyaç duymaması, benzeri çalışmalar açısından görüntü işleme tekniğinin kullanılmasının önemli bir avantaj oluşturacağı kanaatini oluşturmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] A. Gandhi and S. Bhadke, Analysis and design of R.C.C. footbridge construction considering cushion arrangements. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 4(5), 5162-5172, 2022. [https://doi: 10.21275/SR22513223453](https://doi.org/10.21275/SR22513223453).
- [2] FHWA, Hydraulic Design Series Number 5: Hydraulic Design of Highway Culverts. National Highway Institute, Arlington, Virginia, 2005.
- [3] KGM, Karayolu Tasarım El Kitabı, Bölüm 6: Drenaj Tasarımı. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2005.
- [4] B. Naik ve K.K. Khatua, Water surface profile computation in nonprismatic compound channels. Aquatic Procedia, 4, 1500-1507, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.194>.
- [5] S. Kocaman, Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2007.
- [6] K.S. Erduran, A.Ş. Dokuz ve U. Ünal, Görüntü işleme tekniği yardımıyla elde edilen deneysel sonuçların hibrid sayısal dalga modelinin performans analizinde kullanımı. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(3), 183-196, 2019. [https://doi: 10.28948/ngumuh.634708](https://doi:10.28948/ngumuh.634708).
- [7] R.E. Featherstone and C. Nalluri, Civil engineering hydraulic. Blackwell Science, 1995.
- [8] A.S. Subedi, S. Sharma, A. Islam and N. Lamichhane, Quantification of the effect of bridge pier encasement on headwater elevation using HEC-RAS. Hydrology, 6(1), 1-18, 2019. <https://doi.org/10.3390/hydrology6010025>.
- [9] K. Cebe, ve Ö. Bilhan, HEC-RAS hidrodinamik model kullanılarak kararlı akım analizi: Nevşehir, Türkiye örneği. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 32, 135-141, 2021. [https://doi: 10.31590/ejosat.1039311](https://doi:10.31590/ejosat.1039311).
- [10] G. W. Brunner, River Analysis System User's Manual, Version 4.1. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2010.
- [11] J.M. Qasim, Laboratory and HEC-RAS simulations of a single-step weir. Journal of Engineering and Applied Sciences, 8(12), 1005-1011, 2013.
- [12] D. Kumar, H.L. Yadav ve S.K. Himanshu, Estimation of scour depth around bridge piers by Using HEC-RAS. Recent Advances in Civil Engineering, 421-425, 2011.
- [13] G.W. Brunner, J.H. Hunt, A comparison of the one-dimensional bridge hydraulic routines from HEC-RAS, HEC-2 and WSPRO. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 1995.
- [14] G. Eryılmaz Türkkan, Pürüzlülük katsayısının açık kanal akımına etkisinin incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(3), 61-68, 2021. [https://doi: 10.29130/dubited.800691](https://doi:10.29130/dubited.800691).
- [15] A.R. Vatankhah, Direct integration of gradually varied flow equation in parabolic channels. Flow Measurement and Instrumentation, 22(3), 235-241, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.03.003>





Akdağmadeni (Yozgat) kurşun-çinko yataklarının otomatik çizgisellik analizi ile değerlendirilmesi

Evaluation of Akdağmadeni (Yozgat) lead-zinc deposits with automatic lineament analysis

Oktaç Canbaz^{1,*} 

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

Öz

Bu çalışma, uzaktan algılama teknikleri kullanılarak metalik madenler açısından zengin olan Akdağmadeni (Yozgat) bölgesinin yapısal özelliklerini ortaya çıkarmayı ve bu tekniklerin maden arama çalışmalarındaki önemini konu almıştır. Bölgedeki Pb-Zn cevherleşmeleri, granit-mermer dokanaklarında ve metamorfikler içerisinde yer almaktadırlar. Bu cevherleşmeler, K70°-80°D doğrultulu faylar boyunca hareket eden hidrotermal çözeltilerce oluşturulmuştur. Çalışma alanındaki bu doğrultuya sahip çizgiselliklerin ortaya çıkarılması bölgedeki madencilik faaliyetleri için oldukça önemlidir. Arazi çalışmalarını zorlaştıran bitki örtüsü ve sarp topografya nedeniyle bu çizgisellikler uzaktan algılama teknikleri kullanılarak çıkarılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, ASTER LIT ve ASTER GDEM verilerine uygulanan farklı aydınlatma ve yönlü Kernel filtresi sonucunda elde edilen harita ve görüntülerden yararlanılmıştır. Bu görüntülere otomatik çizgisellik analizleri uygulanarak bölgenin çizgisellikleri ortaya çıkarılmıştır. Yoğun tektonizma izlerinin hâkim olduğu bölgede hedefe yönelik sonuçlar elde etmek için, 135°'lik aydınlatma açısı ile hazırlanan DEM verisi ile 90°'li doğrusal filtreleme uygulanan PC1 görüntüsüne uygulanan çizgisellik analizlerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Yoğun bitki örtüsü nedeniyle GDEM verilerinden elde edilen sonuçlar uydu görüntüsüne göre daha iyi performans sergilemiştir. Çizgisellik haritalarındaki sonuçların bölgedeki mevcut cevherleşmeler ile uyumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle, granitik ve metamorfik kayaların dokanaklarında her iki birimi kesen çizgisellikler Pb-Zn cevherleşmesi için yeni hedef sahaları oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: ASTER, Çizgisellik analizi, Kurşun-çinko, Hidrotermal, Metalik maden

1 Giriş

Yapısal unsurlardan fay, kıvrım, çatlak gibi çizgiselliklerin belirlenmesi metalik ve/veya metalik olmayan madenler ile petrol aralamalarında oldukça önemlidir. Bu özelliklerin belirlenmesinde yüksek maliyetli yoğun arazi çalışmalarına gereksinim duyulur. Bu çalışmalarda, sarp topografya, ulaşılamayan noktalar ve yoğun bitki örtüsü ile kaplı alanlarda yeterli gözlem ve arazi

Abstract

This study focuses on the extraction of the structural features of the Akdağmadeni (Yozgat) region, which is rich in metallic minerals, by using remote sensing techniques, and its importance of these techniques in mineral exploration studies. Pb-Zn mineralizations in the region are located in granite-marble contacts and within metamorphics. These mineralizations were formed by hydrothermal fluids moving along faults in N70°-80°E directions. Extracting the lineaments in this direction is very important for mining activities in the region. Due to the vegetation and steep topography that complicates the field studies, these lineaments were tried to be detected by using remote sensing techniques. In the study, maps and images obtained as a result of different lighting and directional Kernel filter applied to ASTER LIT and ASTER GDEM data were used. The lineaments of the region were extracted by applying automatic lineament analysis to these images. In order to obtain targeted results in the region dominated by intense tectonism trends, the results of the lineament analyze applied to the GDEM data prepared with a lighting angle of 135° and the PC1 image applied to the 90° directional filtering were evaluated. Due to the intense vegetation, the results obtained from the GDEM data showed better performance than the satellite image. It was determined that the results in the lineament maps showed consistent results with the existing mineralizations in the region. In particular, the lineaments that cut both units at the contacts of granite and metamorphics show new target areas for Pb-Zn mineralizations.

Keywords: ASTER, Lineament analysis, Lead-zinc, Hydrothermal, Metallic deposits

çalışması yapılamadığı için tespit edilen yapısal özelliklerde eksiklikler olabilmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu çalışmalar, hava fotoğrafları ve uydu görüntüleriyle desteklenerek yararlı sonuçlar ortaya konmaya başlamıştır [1]. Özellikle yüksek çözünürlüklü multispektral uydu verileri ve dijital görüntü işleme teknikleri, uzaktan algılama ile jeolojik çizgisellikleri yüksek doğrulukta çıkarma potansiyelini arttırmıştır [2]. Jeolojik

çizgisellik çıkarımlarına ait çalışmalar manuel çıkarım [3], yarı-otomatik çıkarım [4] ve otomatik çıkarım [5], [6] olarak gruplandırılmaktadır [7]. Uzaktan algılama çalışmaları ile yapısal özelliklerin ortaya çıkarılmasına yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [8–23].

İnceleme alanı, farklı araştırmacılar tarafından Akdağmadeni Litodemi, Akdağmadeni Masifi, Kırşehir Masifi ve Orta Anadolu Kristalin Masifi şeklinde tanımlanan, magmatik ve metamorfik kayalardan oluşan bir temel üzerinde yer almaktadır [24]. Tektonik olarak, kuzeyde İzmir-Ankara-Erzincan Sütur Zonu, batıda Tuzgölü Fayı, doğuda ise Ecemiş Fay Zonu ile sınırlanmaktadır (Şekil 1). Bölgenin kayaç çeşitliliğinde ve günümüzdeki jeomorfolojik yapısını kazanmasında, Tetis okyanusunun güney ve kuzey kolları arasında kalan bölgede yer alması önemli bir rol oynamaktadır [25]. Akdağmadeni (Yozgat) bölgesi tektonizma ile ilişkili metalik cevherleşmeler açısından zengin bir bölgedir [26]. Bu cevherleşmeler, özellikle yoğun bitki örtüsüyle kaplı ve yüksek engebeli topografyaya sahip alanlarda konumlanmaktadır (Şekil 2). Bu nedenle, bölgede tektonizma ile ilişkili çizgiselliklerin arazi çalışmaları ile ortaya çıkarılması oldukça zor ve yüksek maliyetler gerektirmektedir.

Akdağmadeni (Yozgat) bölgesinde otomatik çizgisellik analizleri ile bölgenin yapısal özelliklerinin ortaya çıkarılması ve yeni hedef sahaların tespiti bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Çalışmada Gelişmiş Uydu-Bazlı Isıl Yayım ve Yansıtım Radyometresi (ASTER) ve ASTER Küresel Dijital Yükseklik Haritası (GDEM) verilerinden yararlanılmıştır. Bu verilerin, yoğun bitki örtüsüne sahip alanlardaki performansı değerlendirilmiştir.

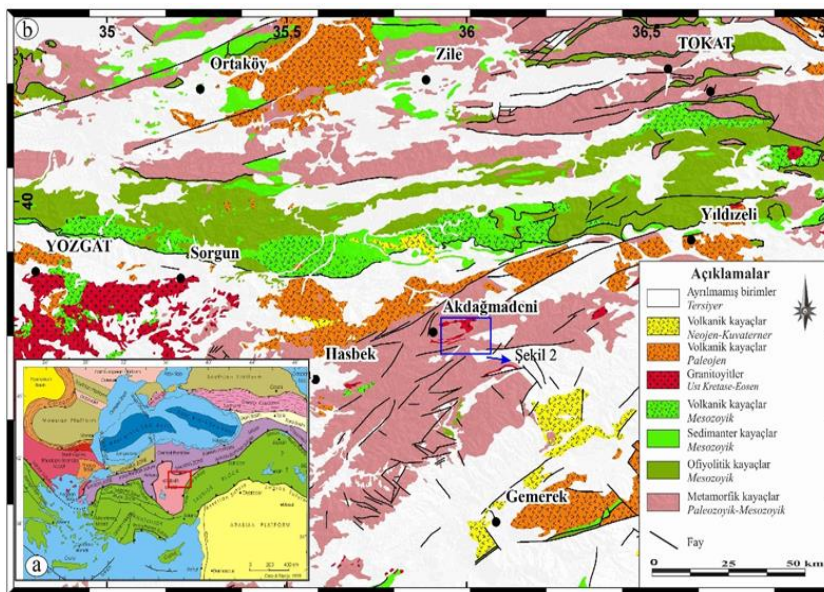
2 Jeoloji ve cevherleşme özellikleri

Çalışma alanının en yaşlı temel kayalarını oluşturan Akdağmadeni metamorfikleri, gnays, şist, mermer, amfibolit ve felsler (skarn) ile bu birimlerin farklı bileşimlerde

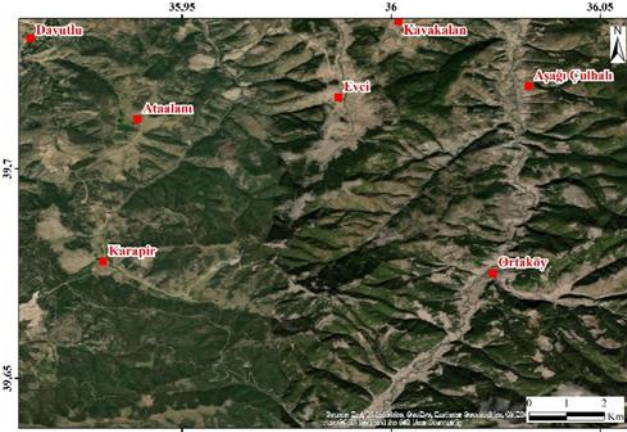
metamorfik türevlerinden oluşmaktadır [29–39]. Bu birimleri keser konumda yüzeyleyen granitoidler modal minerolojik bileşimlerine göre kuvars monzonit [32], jeokimyasal olarak ise kuvars monzonit ve granit [24] bileşimine sahiptirler. Ayrıca, mermerler ile granitlerin dokunaklarında gelişen felsler [40] ve/veya skarn [24] türü kayalar da bulunmaktadır. Bu birimler Eosen ve Kuvaterner aralığında farklı yaşlarda sedimanter kayalar tarafından örtülmektedir (Şekil 3).

Cevherleşmeler, metamorfik kayaları keserek bölgeye yerleşen granitik bileşimli kayalarla ilişkilidirler. Bunlar özellikle granitik bileşimli kayalar ile birimi çevreleyen metamorfik kayaların dokanağında skarn şeklindedir. Ayrıca, metamorfik kayalar içerisinde faylar, çatlaklar ve zayıf tabaka düzlemleri boyunca da gözlenirler [33]. Bölgede gözlenen Pb-Zn cevherleşmelerini masif, saçınımlı ve boşluk dolgu şeklinde üç farklı tipe tanımlanmıştır [33]. Kalınlıkları yaklaşık 40 metreye ulaşan masif yapıda cevherleşmeler skarn zonlarında gelişmiştir [33]. İkinci önemli masif cevherleşme fay zonlarında gözlenmektedir. KD doğrultulu faylanmalar içerisinde Pb-Zn cevherleşmesinin yanı sıra eski dönemlerde işletilmiş manyetit damarları da bulunmaktadır [33]. Sağiroğlu [33] bölgede farklı lokasyonlarda cevherleşmelerin gözlemlendiği fay zonlarının doğrultularının yaklaşık K70-80°D olduğunu araştırmalarında vurgulamaktadır.

Bölgedeki yoğun tektonizma cevherleşmelere neden olan hidrotermal çözeltilerin metamorfik kayaların içerisindeki hareketini kolaylaştırmıştır. Vache [29], bölgede ana fay doğrultularının metamorfiklerde K20°B ile K60°D arasında, granitik kayalarda ise K10°B ile K70°D arasında değiştiğini saptamıştır. Ayrıca, Sağiroğlu [33] ise, özellikle K70-80°D doğrultulu fayların metamorfik kayalardan itibaren granitik kayaların içine kadar devam etmesi nedeniyle bu doğrultulardaki fayların cevherleşmede önemli rol oynadıklarını belirtmişlerdir.



Şekil 1. (a) Türkiye tektonik haritası [27] (b) bölgesel jeoloji haritası ([28]'den değiştirilmiştir)



Şekil 2. Çalışma alanı Google Earth görüntüsü

3 Materyal ve yöntem

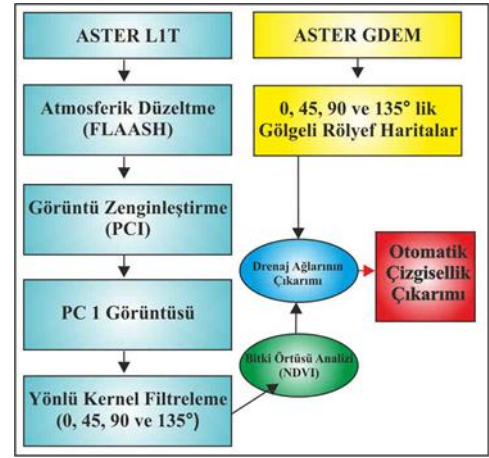
3.1 Materyal

Çalışmada, jeolojik çizgisellikleri ortaya çıkarmak için ASTER L1T ve ASTER GDEM 30 m mekânsal çözünürlüklü verilerinden yararlanılmıştır. 23 Eylül 2002 tarihli ve %10'dan az bulut içeren ASTER uydu verisi Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmaları Kurumu internet sitesinden (<http://earthexplorer.usgs.gov>) ücretsiz olarak temin edilmiştir. 1999 Aralık ayında uzaya konumlandırılan bu uydu, 60 m şerit genişliğine sahip olup, 15 m mekânsal çözünürlüğe sahip 3 adet görünür-yakın kızılötesi (VNIR), 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip 6 adet kısa dalga kızılötesi (SWIR) ve 90 m mekânsal çözünürlüğe

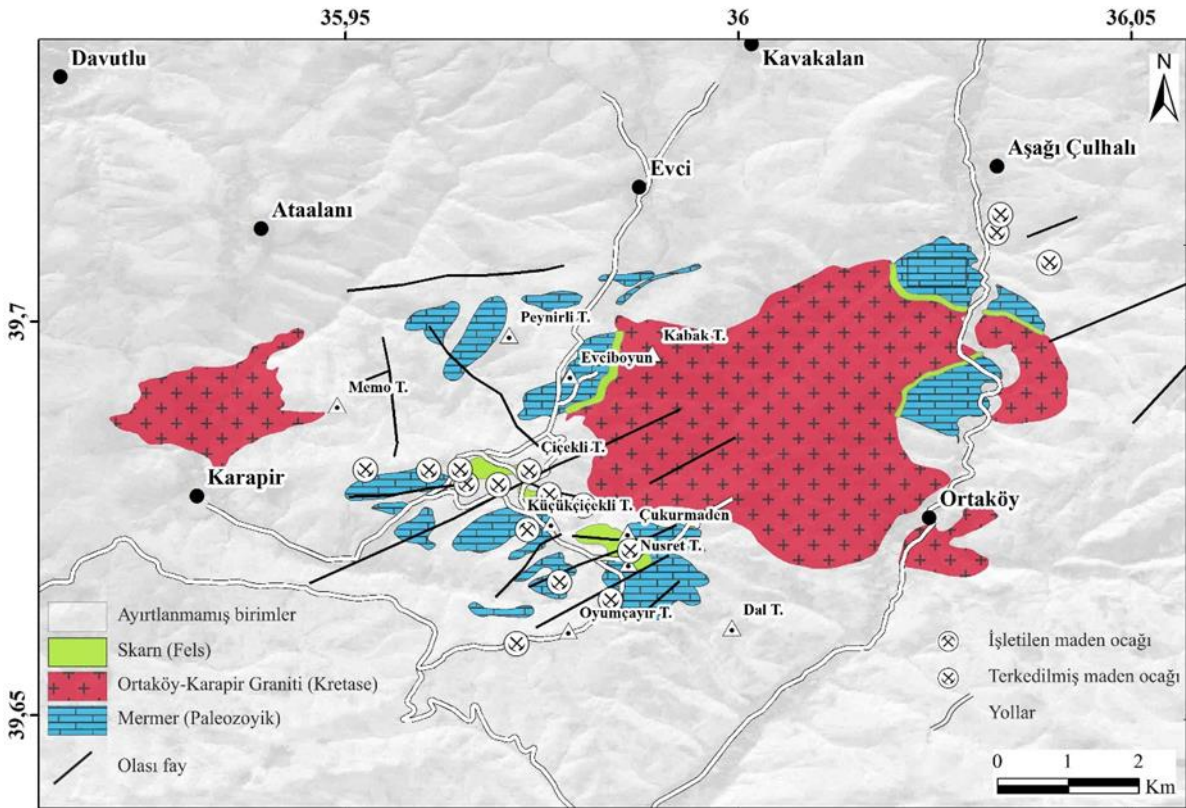
sahip 5 adet termal (TIR) olmak üzere toplam 14 spektral banttan oluşmaktadır [41].

3.2 Yöntem

Çalışmada uygulanan yöntemler Şekil 4'te verilmiştir. Uydu verilerinde buğu, su buharı gibi atmosferik etkileri ortadan kaldırmak ve radyans-yansıma değerlerini kalibre etmek için düzeltme uygulanması gerekmektedir. Bu işlem için ENVI yazılımının Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) aracı kullanılmıştır. Çizgisellik analizi için kullanılan bantlar farklı mekânsal çözünürlüğe sahip oldukları için çalışmada kullanılacak kompozit görüntü 30m' ye yeniden örneklendirilmiştir.

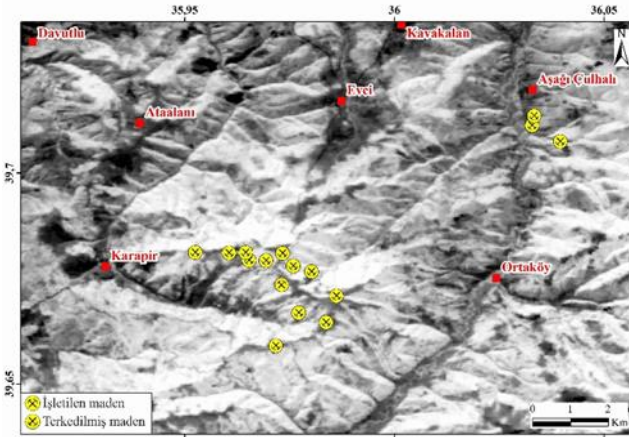


Şekil 4. Çalışmada uygulanan yöntemlere ait akış şeması



Şekil 3. Çalışma alanı basitleştirilmiş yerel jeoloji haritası ([24], [40]'dan değiştirilmiştir.)

Atmosferik düzeltmesi yapılan ASTER uydu görüntüsüne yapısal unsurları daha belirgin hale getirmek amacıyla görüntü zenginleştirme yöntemlerinden ana bileşenler dönüşümü (PCA) uygulanmıştır. PCA, görüntüdeki orjinal verileri, yeni ana bileşen eksenine dönüştürerek görüntüdeki benzerlikleri azaltır ve farklılıkların açığa çıkmasını dolayısıyla görsel yorumlanabilirliğin artmasını sağlar [42–47]. Bu dönüşümün amacı n sayıda giriş kanalının n'den daha az sayıda bileşen oluşturmasıdır [47,48]. Analize istenilen sayıda bant girilmesine karşılık, analiz sonucunda çıkan verinin birinci bileşeni en yüksek (%95) varyansı içerir. İkinci bileşen ise birinci bileşende tanımlanmamış verileri tanımlar. Son bantlar ise minimum varyans maksimum korelasyon içerdiğinden görüntü yorumlamada tercih edilmez [49]. ASTER VNIR ve tüm SWIR bantlar olmak üzere elde edilen kovaryans değerleri Tablo 1'de gösterilmektedir. PC1 görüntüsü, jeolojik birimlerin, yapısal unsurların ve görüntüde var ise yol, elektrik iletim hatları gibi insanı yapıların kenar sınırlarını keskin ve çok belirgin ortaya çıkarabildiği için analizlerde kullanılmak üzere tercih edilmiştir (Şekil 5)



Şekil 5. Ana bileşenler dönüşümü PC1 sonuç görüntüsü.

PC1 sonuç görüntüsüne çizgisel yapıları ortaya çıkarmak amacıyla yüksek geçirgen konvolüsyon yönlü Kernel boyutu (5x5) piksel boyutlu filtreleme uygulanmıştır. Yönlü filtreler uygulamanın ana amacı, görüntünün bulanıklığını azaltarak ve keskinleştirerek herhangi bir doğrusal şekli (kırıklar ve kusurlar) tespit etmektir [50]. Çalışmada, yüksek engebeli topografyaya sahip bu bölgenin farklı doğrultulara sahip çizgiselliklerini ortaya çıkarmak için filtreleme 0°, 45°, 90° ve 135° olmak üzere dört farklı yönde uygulanmıştır (Şekil 6).

Uydu görüntülerinde görüntü zenginleştirme ve çizgisellik çıkarımlarında bitki örtüsü etkisini değerlendirmek gerekmektedir. Normalleştirilmiş Farklılık Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), uydu görüntülerinde bitki örtüsünü ortaya çıkarmada kullanılmakta olup bitki örtüsü yoğunluğunu anlamada ve bitki sağlığındaki değişiklikleri değerlendirmede yararlıdır [51]. NDVI, geleneksel biçimde kırmızı (R) ve yakın kızılötesi (NIR) değerleri arasındaki bir oran olarak hesaplanmaktadır [51].

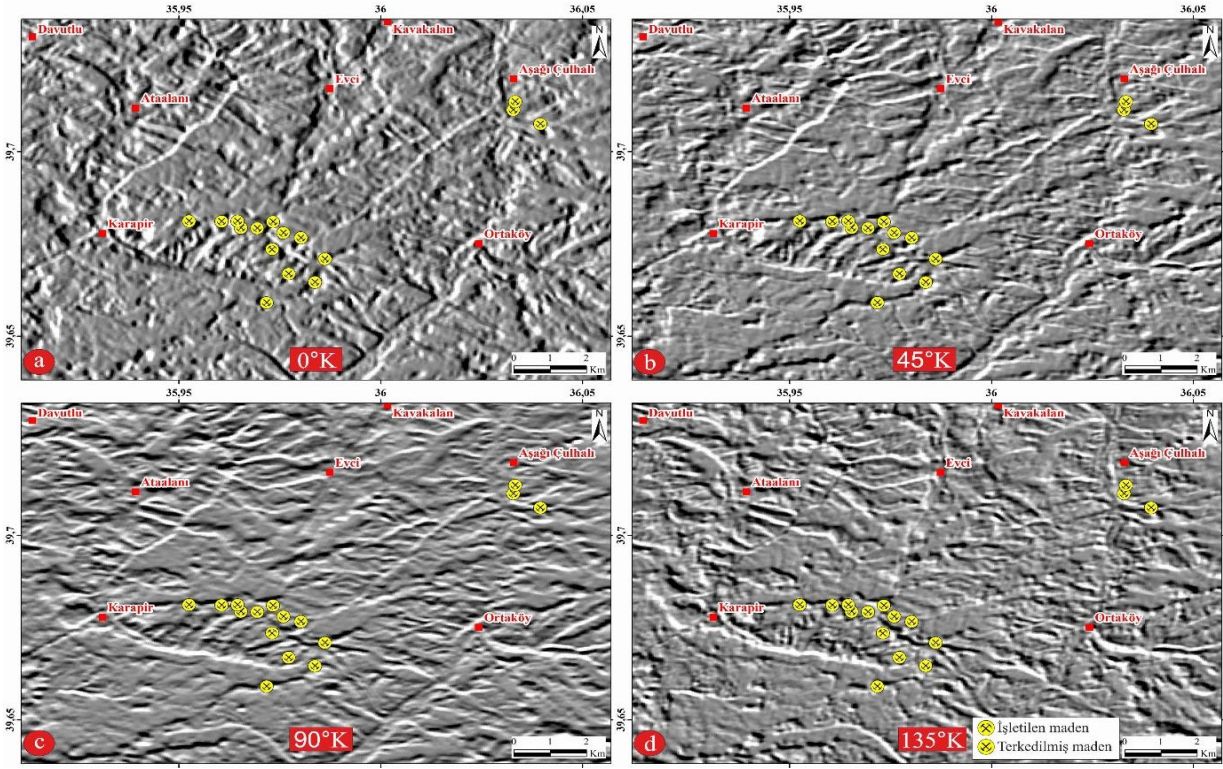
Çalışma alanının yoğun bitki örtüsüyle kaplı olması nedeniyle, atmosferik olarak düzeltilmiş ASTER uydu görüntüsünün 2 ve 3N bantları kullanılarak NDVI hesaplaması yapılmıştır. Bu işlemde kullanılan hesaplama Denklem (1)'de gösterilmektedir. NDVI'nin değeri -1 ile +1 arasında değişir ve 1 maksimum yeşillik seviyesini gösterir [52]. Bant 3, NIR'nin spektral yansımasıdır ve Bant 2 ise kırmızı bantın spektralini temsil eder (Şekil 7).

$$NDVI = (\rho_{bant3} - \rho_{bant2} / \rho_{bant3} + \rho_{bant2}) \quad (1)$$

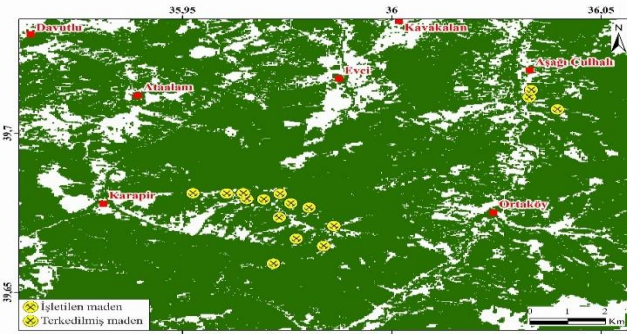
ASTER GDEM verileri, bir bölgenin topoğrafik yapısını ortaya çıkarmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle faylar, kıvrımlar ve akarsu drenaj ağları gibi çizgisel yapıların belirgin hale getirilmesinde oldukça sık tercih edilmektedir [53–55].

Tablo 1. ASTER uydu görüntüsünün 9 bandına uygulanan ana bileşenler dönüşüm analizi kovaryans değerleri

	Bant 1	Bant 2	Bant 3	Bant 4	Bant 5	Bant 6	Bant 7	Bant 8	Bant 9	Eigen değeri (%)
PC1	0.0011	0.0014	0.0010	0.0019	0.0014	0.0015	0.0015	0.0014	0.0012	94.998
PC2	0.0014	0.0019	0.0013	0.0025	0.0019	0.0020	0.0021	0.0019	0.0017	2.894
PC3	0.0010	0.0013	0.0015	0.0020	0.0014	0.0015	0.0015	0.0013	0.0012	1.381
PC4	0.0019	0.0025	0.0020	0.0038	0.0028	0.0030	0.0030	0.0027	0.0024	0.258
PC5	0.0014	0.0019	0.0014	0.0028	0.0021	0.0023	0.0023	0.0021	0.0018	0.153
PC6	0.0015	0.0020	0.0015	0.0030	0.0023	0.0024	0.0024	0.0022	0.0019	0.121
PC7	0.0015	0.0021	0.0015	0.0030	0.0023	0.0024	0.0025	0.0023	0.0020	0.074
PC8	0.0014	0.0019	0.0013	0.0027	0.0021	0.0022	0.0023	0.0020	0.0018	0.063
PC9	0.0012	0.0017	0.0012	0.0024	0.0018	0.0019	0.0020	0.0018	0.0016	0.058



Şekil 6. PC1 görüntüsünden üretilen dört yönlü filtrelenmiş görüntüler



Şekil 7. NDVI analizi sonuç görüntüsü (Yeşil pikseller bitki örtüsünü temsil etmektedir)

Günümüzde GDEM verilerini kullanarak gölgeli rölyef haritalar oluşturabilen birçok yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımlarda, bölgenin yükseklik modeli çıkarılırken farklı aydınlatma açıları seçilebilir. Bu çalışmada, ArcGIS yazılımı kullanılarak bölgeye ait 0°, 45°, 90° ve 135°'lik açılarda olmak üzere 4 farklı gölgeli rölyef haritası oluşturulmuştur (Şekil 8).

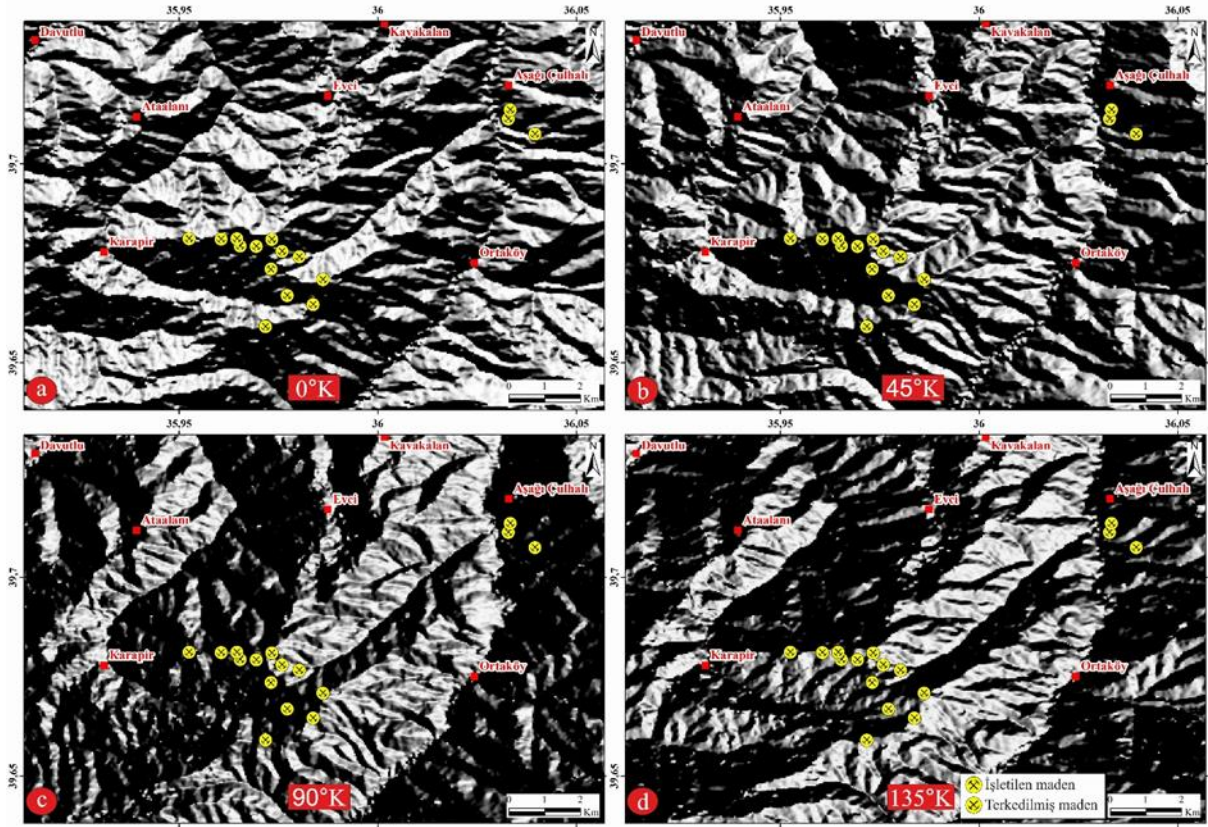
Jeolojik çizgiselliklerin çıkarılmasında arazi çalışmalarının yanı sıra bilgisayar temelli yazılımlar da kullanılmaktadır. Bu yazılımlarda ilgili veri seti üzerinden manuel, yarı otomatik ve otomatik olarak çizgisellik çıkarımı gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemlerden otomatik çizgisellik çıkarım analizleri basit, hızlı ve kullanışlı veriler sunabilmektedir. Bu çalışmada, çizgisellikleri otomatik olarak çıkarmak amacıyla PCI Geomatica 2015 yazılımının LINE modülünden yararlanılmıştır. Analizlerde, farklı açılarda üretilen gölgeli

rölyef haritalar ile yönlü filtrelenmiş PC1 görüntüler kullanılmıştır. Kullanılan algorithmda uygulanan parametre değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. LINE algoritmasında bu çalışmada kullanılan parametre değerleri

RADI	GTHR	LTHR	FTHR	ATHR	DTHR
10	100	30	3	30	20

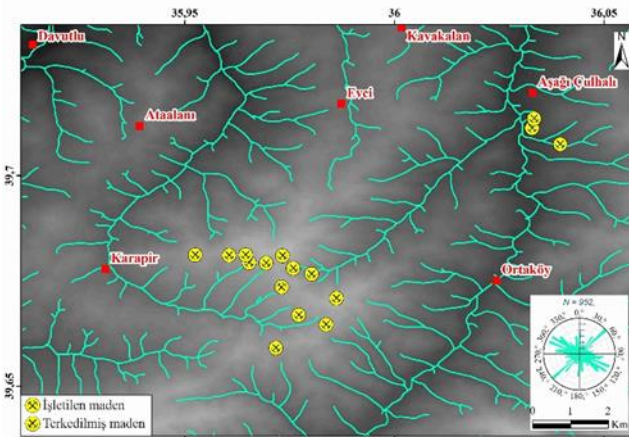
Algoritmanın ilk parametresi olan RADI (Radius of filter pixels), Gauss fonksiyonu ile görüntüde filtreleme yapar. RADI değeri bu fonksiyonun çapını belirlemek için kullanılan bir parametredir. Bu filtre, yerel görüntü varyasyonlarını geliştirmek için keskin olmayan maskeleye kullanır. Yüksek frekans bileşenlerini geliştirmek için görüntünün düşük geçiş (Gauss Düşük Geçiş) versiyonunu çıkararak çalışır [56]. Değer ne kadar küçük olursa daha fazla detay tespit edilebilir. İkinci aşamada olan GTHR (Threshold for Edge Gradient), kenar yakalama işleminden elde edilen raster verisinin ikili görüntüye dönüştürülmesinde kullanılan eşik değeridir. Algoritmanın son basamağında ise ikili görüntüye eğri yakalama işlemi uygulanır. Eğri yakalama işlemi dört alt aşamadan oluşur. Öncelikle, istenilen çizgisellikleri belirlemek için LTHR (Threshold for Curve Length) parametresi kullanılır. Uyumlu çizgisellik vektörleri FTTH (Line Fitting Threshold) parametresi ile belirlendikten sonra tanımlanan açısal eşik değerlerine (ATHR: Threshold for Angular) ve aralık eşik değerinden (DTHR: Threshold for Linking Distance) küçük olanlara göre birleştirilerek vektörel olarak çıktı alınır [57,58].



Şekil 8. GDEM verilerinden dört farklı açıda üretilen gölgeli rölyef haritalar

Yazılımdan elde edilen sonuçlar ArcGIS programında kullanılmak üzere '.shp' uzantılı vektör dosya formatına çevrilmiştir.

Çizgisellik çıkarımlarında, faylanmalarla akarsu drenaj ağlarının ilişkisine bakmak gerekmektedir. Bu nedenle, GDEM verisinden Global Mapper yazılımı kullanarak bölgenin drenaj ağ haritası çıkarılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Çalışma alanına ait akarsu drenaj ağ haritası

4 Bulgular ve tartışma

Bölgede tespit edilmiş, günümüzde işletilen ve/veya terk edilmiş cevherleşmelere ait yapısal özelliklerin ve yataklanma şekillerinin belirlenmesi bu çalışmanın önemli

adımlarından bir tanesini oluşturmaktadır. Literatür çalışmalarından elde edilen verilere göre bölgede tespit edilen kurşun-çinko cevherleşmeleri granitik bileşimli kayalar ile metamorfik kayaların (mermer) dokanağında skarn tipi, metamorfikler içerisinde ise damar tipi cevherleşmeler şeklinde gözlenmektedir. Bu cevherleşmelere neden olan hidrotermal çözeltilerin ise granitik kayaları keser konumunda bulunan faylar boyunca hareket ettiği ve ürünlerini bu zonlar boyunca bıraktıkları öngörülmektedir [33]. Bu nedenle, çalışmada çizgiselliklerin uzaktan algılama yöntemleri ile ortaya çıkarılmasının bölgedeki madencilik faaliyetlerine büyük katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Bununla birlikte Akdağmadeni bölgesinde olduğu gibi yoğun bitki örtüsü, sarp topografya ve yüksek kotlara sahip alanlar arazi çalışmalarını zorlaştırmakta ve maliyetleri artırmaktadır. Bu nedenle, bu tür sahalarda daha az maliyetli ve hızlı sonuçlar ortaya çıkarabilen uydu görüntüleri ve DEM verilerinden yararlanmak fayda sağlamaktadır [50, 59]. Bu çalışmada, ASTER verilerinden yararlanılmış olup bölgedeki çizgisellikleri ortaya çıkarmak amacıyla PCA uygulanmış ASTER LIT görüntüsünden filtrelenmiş görüntüler ve ASTER GDEM dört farklı aydınlatma açısı (0°, 45°, 90° ve 135°) ile gölgeli rölyef üretilmiştir.

Otomatik çizgisellik analizleri ilk olarak, ASTER uydu görüntüsünden üretilen PC 1 sonuç görüntüsüne farklı yönlerde doğrusal Kernel filtrelemesi uygulanarak elde edilmiş görüntülere uygulanmıştır. 4 farklı görüntüden elde

edilen çizgisellikler tek bir görüntü üzerinde birleştirilmiş ve tüm görüntülerdeki çizgiselliklerin gül diyagramları ayrı ayrı hazırlanmıştır. Buna göre, elde edilen çizgiselliklerin ana doğrultuları 0° filtre açısına sahip görüntüde K60°B ile K10-50°D, 45° açısına sahip görüntüde K40-70°D, 90° açısına sahip görüntüde K70°D, D-B ve K80°B ve 135° açısına sahip görüntüde ise K40-80°B olarak belirlenmiştir (Şekil 10a).

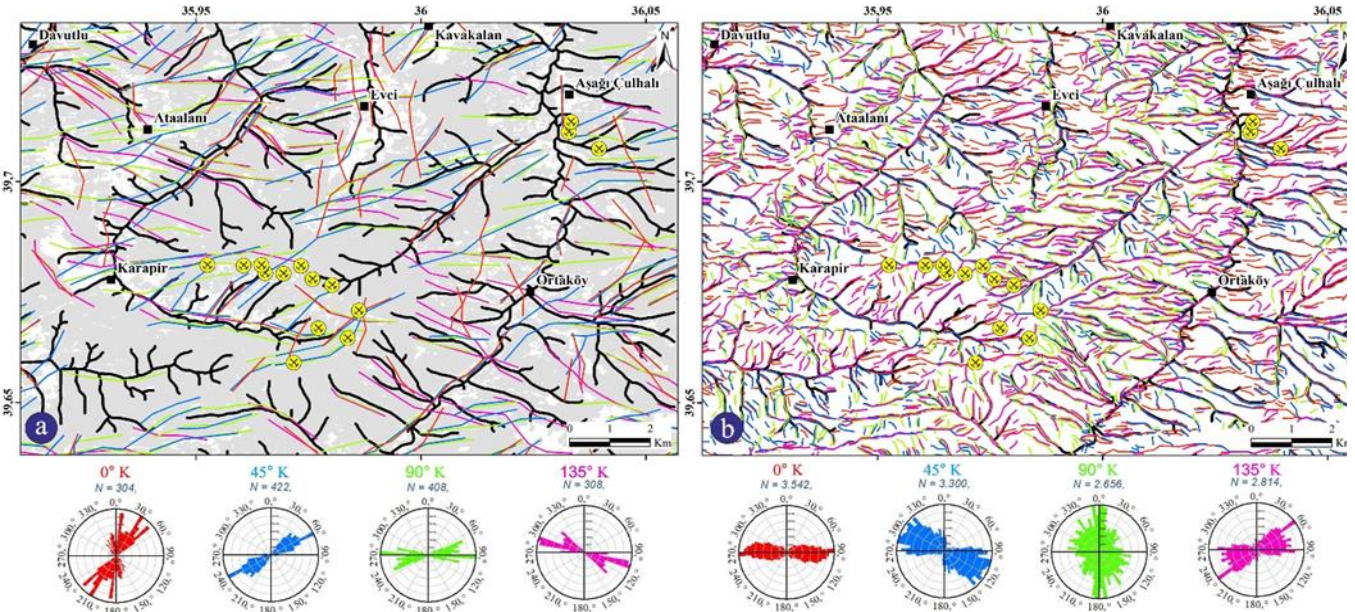
İkinci olarak, GDEM verisinden elde edilen farklı aydınlatma açılarına sahip gölgeli rölyef haritalarına çizgisellik analizi uygulanmıştır. Farklı aydınlatma açıları ile oluşturulmuş tüm haritalardaki çizgisellikler tek bir haritada gösterilmiş ve her haritada belirlenen çizgisellikler ayrı ayrı gül diyagramları hazırlanarak değerlendirilmiştir (Şekil 10b). Çizgiselliklerin genel doğrultusu, 0° aydınlatma açısına sahip gölgeli rölyef haritasında, K80°D ile D-B, 45° aydınlatma açısına sahip rölyef haritada K40-80°B ve D-B olarak belirlenmiştir. 90° açısına sahip rölyef haritada çizgisellikler çok yönlü bir dağılım gösterse de ana doğrultu K-G'dir. 135° aydınlatma açısına sahip rölyef haritada ise ana doğrultular K60°D ile D-B olarak belirlenmiştir.

Uygulanan çok yönlü aydınlatma açısı ve filtreleme işlemlerinde birçok çizgisellik çakışmasına rağmen, birbirini tamamlayan çizgisellikler de tespit edilebilmiştir. İki veriye ait sonuçlar karşılaştırıldığında GDEM verilerinden elde edilen çizgiselliklerin PC1 uydu görüntüsüne göre daha yoğun olduğu görülmektedir (Şekil 10b). Bununla birlikte her iki görüntüden elde edilen çizgisellikler benzer doğrultulara sahiptir. Otomatik çizgisellik çıkarımlarında faylar, kıvrımlar gibi yapısal unsurlar dışında akarsu drenaj ağları, yol, yerleşim yeri, yüksek gerilim hatları, bitki örtüsü ve tarımsal alanlardan kaynaklı farklı çizgisellikler de üretilir [60]. Analizlerde tespit edilebilen bu tür çizgisellikler de yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden belirlenebilmektedir [59]. Çalışma alanı içerisinde yoğun bitki örtüsü ve sarp topoğrafya nedeniyle ulaşım amaçlı

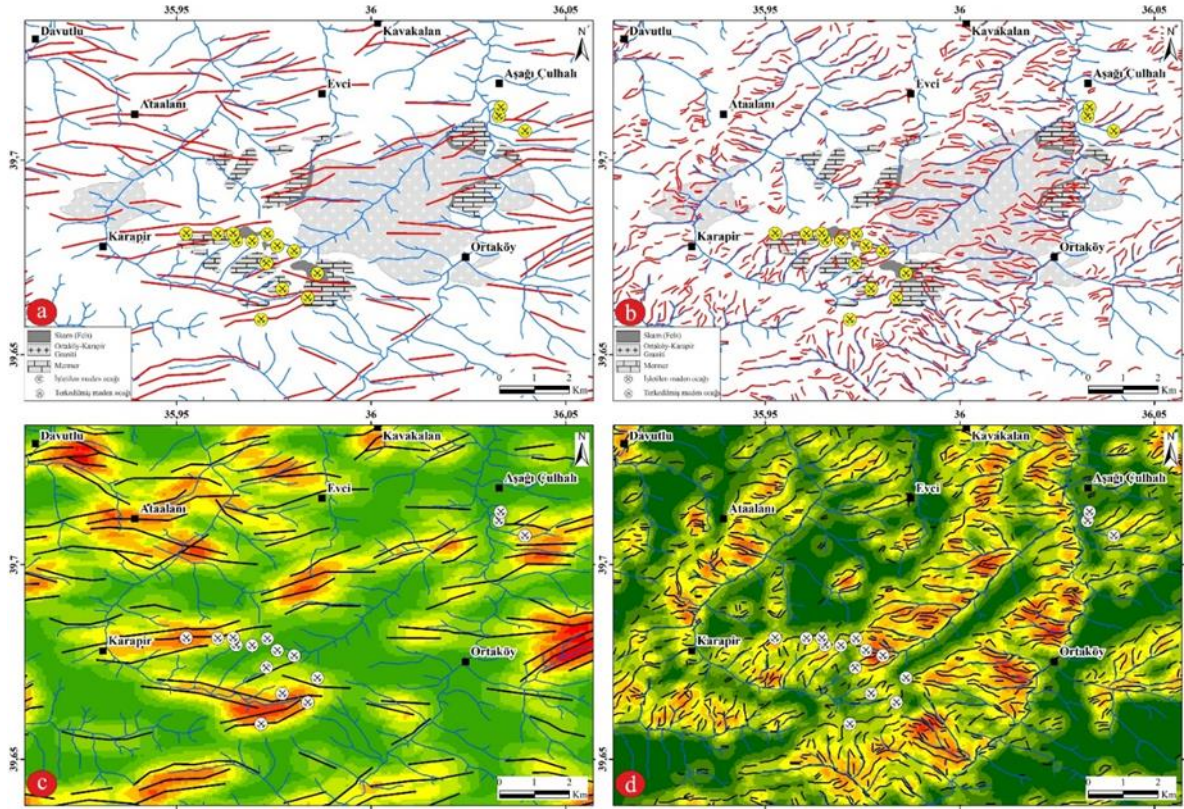
yollar, tarımsal alanlar gibi insan kaynaklı yapılar yok denecek kadar az olup, uydu görüntüleri ile tespit edilenler sonuç çizgisellik haritalarından çıkarılmıştır. ASTER L1T uydu görüntüsüne uygulanan NDVI analizi sonucuna göre, çalışma alanının neredeyse tamamının bitki örtüsü ile kaplı olduğu görülmektedir (Şekil 10a). Çizgisellikler genellikle bitki örtüsünün olmadığı ve seyrekleştiği alanlarda daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Bunun en büyük nedenlerinden bir tanesi akarsu yataklarıdır. GDEM verilerinde doğrudan topoğrafya bilgisi bulunması GDEM verilerinden üretilmiş haritalarda drenaj ağının da belirgin bir şekilde ortaya çıkmasına, bitki örtüsü yoğunluğu ise PC1 görüntülerinde daha az çizgiselliğin tespit edilmesine sebep olmuştur. Her iki sonuç görüntüsüne ait çizgiselliklerin değerlendirilmesinde drenaj ağlarının dikkate alınması gerekmektedir. Her iki sonuç görüntülerine ait çizgiselliklerin değerlendirilmesinde akarsu drenaj ağları dikkate alınması gerekmektedir. PC 1 görüntüsünde bitki örtüsü akarsu yataklarının görünürlüğünü azalttığı için bitki örtüsünün olmadığı ve/veya seyrekleştiği alanlarda ki çizgiselliklerin bazılarının drenaj ağları ile çakıştığı belirlenmiştir (Şekil 10a). GDEM verilerinde ise akarsu yataklarının neredeyse tamamı üretilen çizgisellikler ile örtüşmektedir (Şekil 10b).

Literatüre göre çalışma alanında granitik ve metamorfik kayalarda KB ve KD doğrultu fayların etkili olduğu belirtilmektedir [33]. Akarsu drenaj ağı haritasından hazırlanan gül diyagramında da KB ve KD ana doğrultuları oluşturmaktadır (Şekil 8). Ayrıca, çalışma alanında yüzeyleyen granitik ve metamorfik kayalar (foliasyon düzlemleri hariç) gibi sert ve masif kayalarda akarsu yataklarının faylar tarafından oluşturabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, akarsu yatakları ile çakışan çizgiselliklerin arazi çalışmaları ile kontrol edilmesi gerekmektedir.



Şekil 10. Dört farklı ışıklandırma ve filtreleme açılarına sahip gölgeli rölyef harita ve görüntülerden elde edilen çizgisellikler. (a) PC1 görüntüsünden (Gri pikseller bitki örtüsünü göstermektedir), (b) GDEM verisinden. (Renkler aydınlatma ve filtreleme açılarını, siyah renkli çizgisellikler drenaj ağını göstermektedir)



Şekil 11. PC1 görüntüsünde ise 90°'lik yönlü filtreleme uygulanan görüntü ile GDEM verisinde 135°'lik ışıklandırma açısı oluşturulan gölgeli rölyef haritasından elde edilen çizgisellik analizi sonuçları (a) PC 1, (b) GDEM, (c) PC1 görüntüsünde çizgisellik yoğunluğu, (d) GDEM sonuçlarında çizgisellik yoğunluğu. Mavi renkli çizgisellikler drenaj ağını göstermektedir

Çizgisellik analizlerinde elde edilen farklı doğrultulara sahip çizgisellikler yorumlama açısından karmaşıklığa sebebiyet verebilmektedir. Çalışma alanında, kurşun-çinko cevherleşmelerinin K70-80°D doğrultulu faylar ile ilişkili olduğu bilinmekte olup, analizlerde elde edilen ve bu doğrultu aralığındaki çizgiselliklerin daha gerçekçi yorumlanabilir hale getirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, K70-80°D doğrultu aralıklarına sahip çizgisellikleri ortaya çıkaran PC1'den 90° yönlü filtreleme ile edilen görüntü ve GDEM verisinden 135° aydınlatma açısı ile elde edilen rölyef haritası çizgisellik sonuçları kullanılmıştır (Şekil 11). Granit, mermer ve skarn (fels) dokanak sınırları bu birimleri kesen çizgisellikleri değerlendirmek amacıyla bu haritada verilmiştir. Her iki veriye ait çizgisellik sonuçları karşılaştırıldığında, PC1 görüntüsünden elde edilen çizgiselliklerden sadece bir kısmının mevcut cevherleşme lokasyonları ile örtüştüğü görülmüştür (Şekil 11a ve Şekil 11c). GDEM verisinden elde edilen ve akarsu yatakları dışındaki çizgiselliklerin ise neredeyse tamamının mevcut cevherleşmeler ile örtüştüğü belirlenmiştir (Şekil 11b ve Şekil 11d). Bu durum, yoğun bitki örtüsü ile kaplı alanlarda SYM (Sayısal Yükseklik Modeli) verilerinin uydu görüntülerinden daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

Otomatik çizgisellik analizleri ile sarp topoğrafyaya sahip alanların çizgisellikleri kısa süre de ortaya çıkarılsa da halen belirli alanlarda saha doğrulama çalışmalarına ihtiyaç

duymaktadır [50]. Bu nedenle, çalışma alanı için, sonuçlarda elde edilen yaklaşık K70-80°D doğrultulu her çizgisellik cevherleşmeler için hedef sahalar olarak düşünülmemelidir. Bölgede bilinen fayların doğrultusu ile uyumlu, granitik ve metamorfik kayaçları kesen çizgiselliklerin öncelikli olarak dikkate alınması gerekmektedir. Kurşun-çinko cevherleşmeleri için potansiyel hedef sahaları oluşturmakta olan bu unsurların arazi çalışmaları ile kontrollerinin gerçekleştirilmesi şarttır.

5 Sonuçlar

Bu çalışma, yoğun bitki örtüsüne sahip sarp topoğrafyalı ve ulaşılması güç kesimleri olan Akdağmadeni (Yozgat) bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Bölgede mevcut kurşun-çinko cevherleşmelerin oluşmasında önemli rol oynayan granitik ve metamorfik kayaçları kesen K70-80°D doğrultulu çizgiselliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada, 30 m çözünürlüklü ASTER L1T verisine uygulanan temel bileşen analizinden elde edilen uydu görüntüsü (PC1) ve ASTER GDEM verilerine sırasıyla çok yönlü filtreleme ve aydınlatma açıları uygulanarak bölgedeki çizgisellikler ortaya çıkarılmıştır. Bölge yoğun tektonizma izleri taşımasından dolayı, otomatik çizgisellik analizinde yoğun bir veri seti elde edilmiştir. Çizgisellik sonuç haritalarının daha doğru yorumlanabilmesi amacıyla cevherleşmelerle ilişkili olan K70-80°D doğrultulu çizgisellikleri diğerlerinden ayırt etmek için GDEM verisinde 135°'lik ışıklandırma açısı ile oluşturulmuş harita

ve 90°'li doğrusal filtreleme uygulanan PC1 görüntüsüne ait sonuçların öncelikli olarak değerlendirilmesi tercih edilmiştir. Elde edilen çizgisellik haritalarında, bölgenin yoğun bitki örtüsüyle kaplı olması nedeniyle GDEM verileri ASTER görüntüsüne göre daha detaylı çizgisellikleri ortaya çıkarmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma litolojinin gözlenmesine engel olacak kadar yoğun bitki örtüsüyle kaplı ve ulaşılması güç noktalara sahip arazilerde maden arama faaliyetleri öncesinde hedef sahalar için GDEM verilerinden elde edilecek çizgisellik verilerinin öncel arazi çalışmaları için yararlı bilgiler sunabileceğini göstermiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] Y. Tatar and O. Tatar, Jeolojide Uzaktan Algılama. Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, 2013.
- [2] D. I. J. Mallick, A Review of Image Interpretation in Geology”, by S. A. Drury, (London: Allen & Unwin, 1987.), International Journal of Remote Sensing, 1987. <https://doi.org/10.1080/01431169508954438>
- [3] G. Jordan and B. Schott, Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models: A case study. Remote Sensing of Environment, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.013>
- [4] J. P. Jourda, E.V.Djagoua, K. Kouame, M.B. Saley, C.C. Gronayes, J.J. Achy, and J. Biemi, Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de korhogo (nord de la côte d’ivoire): Apport de l’imagerie ETM+ de landsat. Rev. Télédétection, 6(2), 123–142, 2006.
- [5] A. Abdullah, S. Nassr, and A. Ghaleeb, Landsat ETM-7 for lineament mapping using automatic extraction technique in the SW part of Taiz area, Yemen. Global Journal of Human-Social Science Research, 2013.
- [6] R. G. Thannoun, Automatic extraction and geospatial analysis of lineaments and their tectonic significance in some areas of northern Iraq using remote sensing techniques and GIS. International Journal of Enhanced Research In Science Technology & Engineering, 2013.
- [7] S. Sedrette and N. Rebaï, Automatic extraction of lineaments from Landsat ETM+ images and their structural interpretation: Case study in Nefza region (North West of Tunisia). Journal of Research in Environmental and Earth Sciences, 2016.
- [8] M. Köküm, Landsat TM görüntüleri üzerinden Doğu Anadolu Fay Sistemi’nin Palu (Elazığ)-Pütürge (Malatya) arasındaki bölümünün çizgisellik analizi. Gümüşhane Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9 (1), 119–127, 2019. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.419865>
- [9] S. Cambazoğlu, M. K. Koçkar, and H. Akgün, ASTER uydu görüntülerinden çizgisellik analizi yapılarak ve literatür kullanılarak doğu marmara bölgesi için sismik kaynak modeli oluşturulması. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, Ekim 2017.
- [10] T. Öztürk and H. Uygucgil, Hidrokarbon aramacılığında çizgiselliğin bulunması için bir yöntem. VII. Uzaktan Algılama ve CBS Sempozyumu, Eskişehir, Eylül 2018.
- [11] Z. Adiri, A. El Harti, A. Jellouli, L. Maacha, M. Azmi, M.Zouhair and E.M.Bachouai, Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. Advances in Space Research, 60 (11), 2355-2367, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.006>
- [12] S. N. Goward, J. G. Masek, D. L. Williams, J. R. Irons, and R. J. Thompson, The Landsat 7 mission: Terrestrial research and applications for the 21st century. Remote Sensing of Environment, 78(1-2), 3-12, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00262-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00262-0)
- [13] M. Hashim, S. Ahmad, M. A. M. Johari, and A. B. Pour, Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. Advances in Space Research, 51(5), 874-890, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.004>
- [14] M. M. Maina and Y. Tudunwada, Lineament mapping for groundwater exploration in Kano state, Nigeria. Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engineering. 2017.
- [15] S. A. Meshkani, B. Mehrabi, A. Yaghubpur, and M. Sadeghi, Recognition of the regional lineaments of Iran: Using geospatial data and their implications for exploration of metallic ore deposits. Ore Geology Reviewers, 55, 48-63, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.04.007>
- [16] M. L. Suzen and V. Toprak, Filtering of satellite images in geological lineament analyses: An application to a fault zone in Central Turkey. International Journal of Remote Sensing, 19(6), 1101-1114, 1998. <https://doi.org/10.1080/014311698215621>
- [17] K. S. Kavak, Determination of palaeotectonic and neotectonic features around the Menderes Massif and the Gediz Graben (Western Turkey) using Landsat TM image. International Journal of Remote Sensing, 26(1), 59-78, 2005. <https://doi.org/10.1080/01431160410001709994>
- [18] M. Karaman, Comparison of thresholding methods for shoreline extraction from Sentinel-2 and Landsat-8 imagery: Extreme Lake Salda, track of Mars on Earth. Journal of Environmental Management, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113481>
- [19] Ö. Gürsoy, Ş. Kaya, Z. Çakir, O. Tatar, and O. Canbaz, Determining lateral offsets of rocks along the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) using spectral classification of satellite images and field measurements. Geomatics, Natural Hazards Risk, 8(2), 1276–1288, 2017. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1318794>
- [20] K. A. Tözün and A. Özyavaş, Automatic detection of geological lineaments in central Turkey based on test

- image analysis using satellite data. *Advance Space in Research*, 69(9), 3283-3300, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.026>
- [21] A. Khalifa, Z. Çakır, Ş. Kaya, and S. Gabr, ASTER spectral band ratios for lithological mapping: A case study for measuring geological offset along the Erkenek Segment of the East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Arabian Journal Geoscience*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05849-y>
- [22] Y. Öztürk, M. Çetin, and O. Turgay, Akarsuların yatak yeri seçiminde fay belirleyiciliğinin uzaktan algılama tabanlı analizi: Aras vadisi örneği (Karakurt - Kağızman Arası). *Jeomorfol. Araştırmalar Derg.*, 6, 81–97, 2021.
- [23] E. Gündoğdu, S. Özden, and Ö. Karaca, Simav Fayı ve yakın civarının saha verileri ile alos-palsar ve Landsat görüntülerinin karşılaştırmalı yapısal analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.*, 32 (1), 60–71, 2016.
- [24] O. Başdelioğlu, Karapir-Ortaköy (Akdağmadeni-Yozgat) granitoyitinde alterasyon ve eser element jeokimyası incelemeleri. Yüksek Lisans Tezi, Türkiye, 2017.
- [25] A. M. C. Sengör and Y. Yılmaz, Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 1981. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- [26] İ. Kuşcu, Skarns and Skarn Deposits of Turkey, in *Modern Approaches in Solid Earth Sciences*, 2019.
- [27] A. I. Okay and O. Tüysüz, Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society London Special Publications*, 156(1), 475–515, 1999. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22>
- [28] MTA, 1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası, Sivas paftası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 2002.
- [29] K. Vache, Akdağmadeni kontakt yatakları ve bunların Orta Anadolu kristalinine karşı olan jeolojik çerçevesi. *Maden Tetkik Arama Dergisi*, 60, 22–36, 1963.
- [30] Y. Erkan, Orta Anadolu masifinin kuzeydoğusunda (Akdağmadeni-Yozgat) etkili olan bölgesel metamorfizmanın incelenmesi. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 23, 213-218, 1980.
- [31] A. Özcan, A. Erkan, E. Keskin, A. Oral, M. Sümengen, and O. Tekeli, Kuzey Anadolu fayı-Kırşehir masifi arasının temel jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Rapor No: 1604, Ankara (yayımlanmamış)*, 1980.
- [32] E. Tülümen, Akdağmadeni (Yozgat) yöresinde petrografik ve metalojenik incelemeleri. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi, Trabzon, Türkiye, 1980.
- [33] A. Sağiroğlu, Akdağmadeni (Yozgat) kurşun-çinko yatakların cevherleşme. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 27, 15-29, 1984.
- [34] A. R. Çolakoğlu and Y. Genç, Akdağmadeni (Yozgat) kurşun-çinko yatağının makro-mikro dokusal özellikleri ve kökensel yorumu. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 44(1), 45-66, 2001.
- [35] M. Alpaslan, Yıldızeli yöresinin petrografik incelenmesi. Doktora Tezi. Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye, 1993.
- [36] A. Yılmaz, Ş. Uysal, Y. Bedi ve H. Yusufoglu, Akdağ Masifi ve dolayının jeolojisi', *Maden Tetkik Arama Dergisi*, 117, 125–138, 1995.
- [37] M. Yıldız, Akdağmadeni (Yozgat) doğusunda yer alan metamorfik birimlerin jeolojik petrografik incelenmesi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, 1998.
- [38] A. Sasmaz and F. Yavuz, REE geochemistry and fluid-inclusion studies of fluorite deposits from the Yaylagözü area (Yıldızeli-Sivas) in Central Turkey. *Neues Jahrb. fur Mineral. Abhandlungen*, 2007. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2007/0077>
- [39] M. B. Şahin and Y. Erkan, Akdağmadeni Masifi Metamorfizmaları, Yukarıçalhalı-Başçatak kesiminin petrolojik özellikleri, *Maden Tetkik Arama Dergisi*, 116, 21–28, 1994.
- [40] E. Coşkun, Akdağmadeni (Yozgat) Pb-Zn yataklarında metamorfizma etkisinin araştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye 2010.
- [41] 'ASTER Overview, <https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-ata/collection-overview/missions/aster-overview/>, Accessed: 09-Jun-2022.
- [42] M. Wolff and J. Pelissier-Combesure, Faciolog - automatic electrofacies determination. In *transactions of the SPWLA Annual Logging Symposium (Society of Professional Well Log Analysts)*, 1982.
- [43] A. Singh and A. Harrison, Standardized principal components. *International Journal of Remote Sensing*, 1985. <https://doi.org/10.1080/01431168508948511>
- [44] M. Abrams, E. Abbott, and A. Kahle, Combined use of visible, reflected infrared, and thermal infrared images for mapping Hawaiian lava flows. *Journal of Geophysical Research*, 1991. <https://doi.org/10.1029/90JB01392>
- [45] S. A. Bennett, W. W. Atkinson, and F. A. Kruse, Use of thematic mapper imagery to identify mineralization in the Santa Teresa District, Sonora, Mexico. *International Geology Review*, 1993. <https://doi.org/10.1080/00206819309465572>
- [46] M. H. Tangestani and F. Moore, Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping: A case study, Meiduk area, Kerman, Iran). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2001. <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854931>
- [47] Ş. Kaya, Uydu görüntüleri ve sayısal arazi modeli kullanılarak kuzey anadolu fayı gelibolu-ışıklar dağı kesiminin jeomorfolojik - jeolojik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri, Türkiye 1999.
- [48] A. P. Crósta, C. R. De Souza Filho, F. Azevedo, and C. Brodie, Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2003. <https://doi.org/10.1080/0143116031000152291>

- [49] P. K. Das and M. V. R. Seshasai, Multispectral sensor spectral resolution simulations for generation of hyperspectral vegetation indices from Hyperion data. Geocarto International, 2015. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.973065>
- [50] F. Abdelouhed, A. Ahmed, A. Abdellah, I. Mohammed, and O. Zouhair, Extraction and analysis of geological lineaments by combining ASTER-GDEM and Landsat 8 image data in the central high atlas of Morocco. Natural Hazards, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05122-9>
- [51] USGS, NDVI, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>. Accessed: 30-Jun-2022.
- [52] C. J. Tucker, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 1979. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- [53] R. Salehi, N. M. Saadi, A. Khalil, and K. Watanabe, Integrating remote sensing and magnetic data for structural geology investigation in pegmatite areas in eastern Afghanistan. Journal of Applied Remote Sensing, 2015. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096097>
- [54] C. de Oliveira Andrades Filho and D. de Fáltima Rossetti, Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. International Journal of Remote Sensing, 2012. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.549852>
- [55] N. Yusof, M. F. Ramli, S. Pirasteh, and H. Z. M. Shafri, Landslides and lineament mapping along the Simpang Pulai to Kg Raja highway, Malaysia. International Journal of Remote Sensing, 2011. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.484434>
- [56] High Pass Filter Task. <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/envihighpassfiltertask.html>. Accessed: 09-Jun-2022.
- [57] F. Olcay, Uydu görüntülerinden elde edilen çizgisellikler ve fluvial yapılar ile neotektoniğin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- [58] P. Geomatica, PCI Geomatica User's Guide. Richmond Hill, Ontario, A.B.D. 2015.
- [59] F. Abdelouhed, A. Ahmed, A. Abdellah, and I. Mohammed, Lineament mapping in the Ikniouen area (Eastern Anti-Atlas, Morocco) using Landsat-8 Oli and SRTM data. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100606>
- [60] B. B. S. Singhal and R. P. Gupta, Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer Science & Business Media, 2010.





Kozaklı (Nevşehir) jeotermal alanındaki obrukların jeofizik yöntemler kullanılarak belirlenmesi

Investigation of sinkholes in Kozaklı (Nevşehir) geothermal field using geophysical methods

Halil Bölük^{1,*} , Mustafa Afşin² , Murat Kavurmacı³ , Mutluhan Akın⁴ 

^{1,2,3}Aksaray Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray

⁴Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir

Öz

Bu makalede, Orta Anadolu'da radon gazları ve çamurla tedavinin gerçekleşebildiği en önemli termal turizm merkezlerinden birisi olan Kozaklı (Nevşehir) jeotermal alanında 2007 ve 2018 yıllarında meydana gelmiş iki obruğun bulunduğu sahada olası diğer obruklar çok elektrotlu öz direnç yöntemi ve yapılan karotlu sondajlarla araştırılmıştır. Jeotermal suların birincil akiferi Paleozoyik yaşlı mermerler, ikincil akiferi Eosen yaşlı kireçtaşları; örtü kayaları ise alandaki geçirimsiz birimlerdir. Jeotermal sular, jeotermal gradyan, granitik sokulumlar ve radyojenik yollarla ısınmaktadır. Jeotermal su kaynaklarına ait kuyuların derinlikleri, sıcaklıkları ve pH değerleri sırası ile 60 – 1493 m, 45 – 96°C ve 6.22 – 6.61 arasında değişim gösterir. Çöküntü yapılarının boyutlarını belirleyebilmek için iki boyutlu elektrik öz direnç yöntemi ile 15 – 30 m derinliklerin incelendiği jeofizik çalışmalarda, obrukların çevresinde yüzey kırıkları, yaklaşık 20 m doğudaki aktif karayolunda bir çökme yapısı ve obruğun etrafında özellikle doğusunda ve kuzeyinde boşluklu yapıda traverten tespit edilmiştir. Karotlu sondajlarla elde edilen loglarla bu veriler doğrulanmıştır. Bu bulgular bölgede karstlaşma sürecinin devam ettiğinin bir göstergesidir.

Anahtar kelimeler: Jeofizik, Jeotermal alan, Karstlaşma, Kozaklı, Obruk

1 Giriş

Obruklar, hipojenik karstlaşmanın neden olduğu genellikle dairesel şekilli dev çöküntü yapılarıdır. Çap ve derinlik olarak onlarca metreden yüzlerce metreye kadar farklı boyutta olabilirler. Çoğu karstik alanlara özgü olan obruklar ve buna bağlı olarak gelişen jeomorfolojik yapılar Türkiye'de oldukça sık gözlenir. Konya Kapalı Havzası (KKH) Obruk Platosu'nda, sayıları güncel olarak artmaya devam eden yüzlerce obruk mevcuttur [1]. Obruk oluşum süreci, bölgenin özellikle jeolojik ve hidrojeolojik özelliklerine bağlı olarak gelişir. Bu tür karstik yapılar daha çok kireçtaşı, mermer, dolomit, traverten gibi çözünebilen

Abstract

In this article, the temporal and spatial development of probable sinkholes in the close vicinity of a couple of sinkholes that occurred in 2007 and 2018 in the Kozaklı (Nevşehir) geothermal field, which is one of the most important thermal tourism centers where treatment with radon gases and mud can be carried out in Central Anatolia, was investigated using the multi-electrode resistivity method and core drilling data. The primary geothermal water aquifer consists of Palaeozoic aged marbles, the secondary Eocene aged limestone aquifer and cover rocks are the impermeable units of the area. Geothermal waters gain heat by geothermal gradient, granitic intrusions, and radiogenic ways. The depths, temperatures, and pH values of the wells belonging to geothermal water resources vary between 60 and 1493 m, 45 and 96 °C, as well as 6.22 and 6.61, respectively. Two-dimensional electrical resistivity methods were used to determine the dimensions of the collapse structures. In the geophysical studies examining the depths of 15-30 meters, surface fractures around the sinkhole, a subsidence structure nearby the active highway approximately 20 meters to the east, travertine was found around the pothole, especially in the east and north of the hollow structure. This data verified with log data obtained from core drilling. These findings are indicators for the ongoing karstification process.

Keywords: Geophysicsc, Geothermal field, Karstification, Kozaklı, Sinkhole

karbonatlı kayaçların buldukları alanlarda meydana gelirler.

Karstlaşma, kireçtaşı, mermer ve dolomitin dışında jips, anhidrit, halit ve kuvarsit gibi kayaçlarda da gerçekleşebilmektedir [2]. Çözünebilen ve çözünemeyen kayaçlar arasındaki dokanaklar karst gelişimi için uygun yerlerdir. Yeraltı suyunun kimyası, fiziksel özellikleri ve gaz içeriği de karstik yapıların oluşumunda etkilidir.

Obruklar, hipojenik karstlaşmanın neden olduğu genellikle dairesel şekilli dev çöküntü yapılarıdır. Çap ve derinlik olarak onlarca metreden yüzlerce metreye kadar farklı boyutta olabilirler. Çoğu karstik alanlara özgü olan obruklar ve buna bağlı olarak gelişen jeomorfolojik yapılar Türkiye'de oldukça sık gözlenir. Konya Kapalı Havzası

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: (halilboluk@gmail.com) (H. Bölük)

Geliş / Received: 25.06.2022 Kabul / Accepted: 15.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1135619

(KKH) Obruk Platosu'nda, sayıları güncel olarak artmaya devam eden yüzlerce obruk mevcuttur [1]. Obruk oluşum süreci, bölgenin özellikle jeolojik ve hidrojeolojik özelliklerine bağlı olarak gelişir. Bu tür karstik yapılar daha çok kireçtaşı, mermer, dolomit, traverten gibi çözünebilir karbonatlı kayaların buldukları alanlarda meydana gelir.

Karstlaşma, daha çok ana kaya yüzeyinde gerçekleşen asitliği düşük ortamlarda meydana gelen kimyasal süreçler tarafından yönetilmektedir [2, 3]. Çözünürlüğü arttıran faktörler ise suyun hızlı akması ve ortamın çalkantılı olmasıdır. [4]. Ayrıca, karstlaşmanın meydana gelmesinde ve devam etmesinde CO₂ ve H₂S gibi gazların etkisi de önemlidir. Örneğin, CO₂, atmosferik sularla karbonik asit meydana getirerek bu suların daha çözücü bir özellik kazanmasını sağlar. [1, 2, 4-6]. Bu sayede yeraltı suyu çözünmeye uygun kayalarda boşluklar oluşturur ya da mevcut boşlukların büyümesine sebep olur. Yeraltı suyunun azalması iç basıncı düşürür ve örtü tabakasının uyguladığı basınç görevi olarak artmış olacağından gevşek tutturulmuş örtünün çökmesine yol açar. Eğer örtü tabakasının kohezyonu yüksek ise, bu sefer örtünün dayanımına bağlı olarak çökme bir anda ve daha geniş bir alanda görülür. Çünkü karstik boşluk zamanla büyüyerek yüzeye yaklaşır ve boşluk tavanının kimyasal reaksiyonlarla erozyona uğrayıp zayıflamasına da sebep olur. Zamanla hem boşluk tavanı hem de örtü iç ve dış etmenler arasında denge bozulduğunda çökerek obruğu meydana getirir [7]. Obruk oluşumunu etkileyen çok sayıda aktif değişkenin olması bölgesel olarak çok farklı boyutlarda obruk oluşumlarının gelişmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı farklı obruk oluşumuna ilişkin çok sayıda kavramsal model bulunmaktadır. En çok kabul gören örtü (overburden) modelinde çözünebilir kayacın kum veya kil ile örtülü olmasına bağlı olarak, çöküntü farklı şekillerde oluşabilmektedir [3,8].

Mekanik özellikleri zayıf olan örtü kayalar bu süreçlerle büyüyen karstik boşlukları uzun süre örtemezler. Eğer örtü kilce zengin bir malzeme ise (kohezyonu yüksek), birimin aniden düşey yönde düşmesi ile örtü çöküntüsü (cover collapse) meydana gelir [3]. Bu tür çöküntüler genellikle zemin-kaya sınırında ve muhtemelen daha önce var olan bir karstik boşlukla (paleokarst) ilişkili olarak gerçekleşir [9]. Üstteki geçirimsiz zengin kohezyonlu zemin, eğer duraylı şartlarda değişim meydana gelmezse, alttaki boşluklu kayanın çatısında denge halinde kalır. Fakat, boşluklar genişlediğinde zemini oluşturan birim yenilir ve aniden obruk oluşur [3].

Kozaklı Jeotermal Alanı'nda (KJA) 14.01.2007 tarihinde Kozaklı'da Kaplıcalar bölgesinde oluşan çökme olayı sonucu yaklaşık 40 m çaplı, 10-12 m derinlikli dairesel bir çukur meydana gelmiş ve içerisinde 7 m sıcak su seviyesi olduğu görülmüştür [10]. Kaplıcalar bölgesinin ortasında meydana gelen obruk, yöre halkını ve termal turizmi olumsuz olarak etkilemekte ve endişelere neden olmaktadır. Afşin vd. [11] çöküntüyü tetikleyen asıl faktörün jeotermal suların aşırı çekimi olduğunu ifade etmişlerdir. Pasvanoğlu vd. [12] aşırı su çekimi, yeraltı suyu seviyesinin hızlı düşümü ve karbonik asidin karstik boşluklara sebep olduğunu ve bunların üzerinde yer alan, marn-kilden içeren örtü biriminin çökmesine neden olduğunu belirtmiştir. 14 Eylül 2018

tarihinde ise bu çöküntünün 175 m GD'sunda ilçede sıkça kullanılan bir yol üzerinde 20 m çapında ve yaklaşık 18 m derinliğinde ikinci bir obruk endişeleri arttırmıştır.

Bu çalışma kapsamında, KJA içerisinde meydana gelebilecek diğer obrukların ve bölgesel karstlaşmanın boyutları jeofizik yöntemler kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır.

1.1 Çalışma alanı

İnceleme alanı, İç Anadolu Bölgesi'nde 34° 49' ve 34° 52' doğu boylamları ile 39° 14' ve 39° 11' kuzey enlemleri arasında yer alır (Şekil 1). Bölgenin ortalama yıllık sıcaklığı 11.3 °C, ortalama yıllık yağış miktarı ise 428 mm.'dir. Kozaklı bölgesinde en fazla kar Ocak ayında yağmakta olup, ortalama kar yağışı 79 mm düzeyindedir. KJA, su sıcaklığı 27°C ve 93°C arasında değişen çok sayıda jeotermal kaynağa sahiptir ve ülkemizin en önemli jeotermal turizm alanlarından birisidir.

KJA'da güncel bilgilere göre farklı derinliklerde 30 adet jeotermal kuyu bulunmaktadır. Kuyuların derinlikleri 70 m ile 1493 m, sıcaklıkları 30 °C ile 105 °C ve debileri 1,5 L/s ile 95 L/s arasında değişmektedir [13]. Bu sondajlardan elde edilen akışkanlar konutların ısıtılmasında, seracılıkta ve termal turizm amaçlı olarak kullanılmaktadır. Kozaklı ilçe merkezinde son 15 yılda iki farklı karstik çöküntü (obruk) oluşmuştur. 2018 yılında sonradan oluşan ikinci obruk Kozaklı belediyesi tarafından doldurularak kapatılmış, diğer obruk alanında ise çevre düzenlemesi yapılmıştır (Şekil 2).

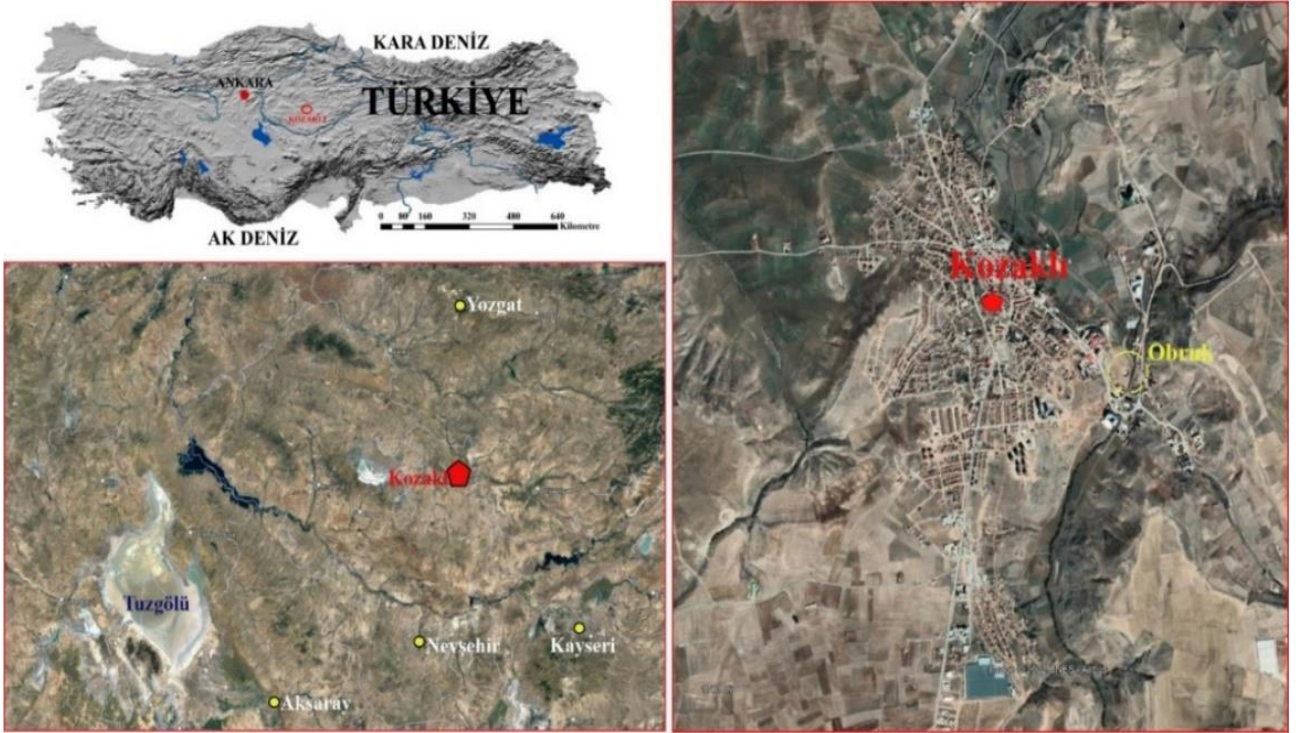
2 Materyal ve metod

Bu çalışmada obruk çevresindeki karstik boşluklar hem jeofizik yöntemlerle hem de karotlu sondajlarla ortaya konulmuş, karotlu sondajlar elde edilen kesitler üzerine yerleştirilerek, profilin diğer kısımlarının daha anlamlı yorumlanmasına katkı sağlamıştır.

2.1 Jeofizik yöntemler

Elektrik özdirenç çalışmaları halen jeofizik araştırmalarda en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir [14]. Obruk oluşumları için elektrik özdirenç ya da elektriksel iletkenlik önemli bir parametreyi teşkil etmektedir. Her bir kayacın, hatta aynı kayacın farklı jeoteknik durumlarının farklı elektrik özdirenç değerleri vardır [15].

Bu çalışmaların amacı, yeryüzünden yapılan potansiyel fark ölçümleriyle yeraltındaki katmanların derinlik ve görünür özdirenç bilgilerinin elde edilmesidir. Bu yöntemde, yüzeyde iki farklı noktadan elektrik akımı uygulanır ve seçilen yöntemle göre konumlandırılmış diğer iki nokta arasındaki gerilim farkı ölçülmektedir. Elektrik akımın yere yönlendirildiği noktalar "akım elektrotları" ve potansiyel farkın elde edildiği elektrotlar ise "gerilim elektrotları" olarak adlandırılır. Akım elektrotlarının arasındaki uzaklık incelenmek istenilen derinlikle doğru orantılı olacak şekilde hesaplanır. Bu sayede farklı derinliklerdeki birimlerin özdirenç değerleri ölçülebilir ve anomaliler ortaya konabilir. [16].

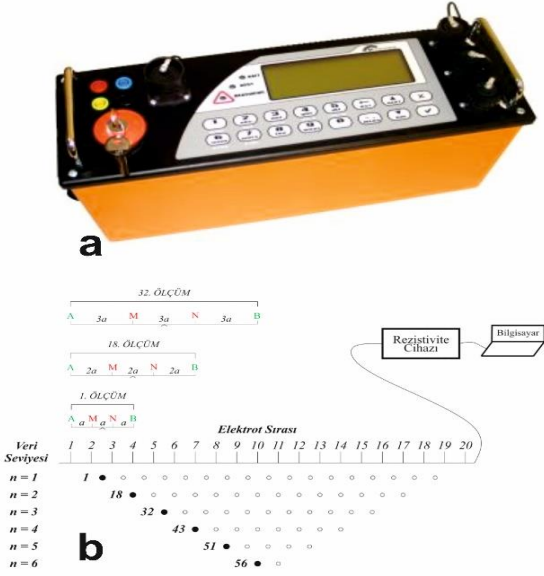


Şekil 1. Çalışma alanının yerbulduru haritası



Şekil 2. İnceleme alanında oluşan obrukların genel görünümü

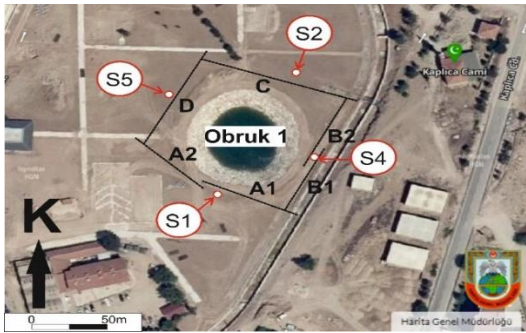
Elektrotların dizilimi yatayda farklı noktalardan ve farklı sıralamalarla uygulanarak, yeraltına ait iki ve üç boyutlu veriler toplanabilmektedir. Bu çalışmada, GF Instruments şirketinin ürettiği ARES model otomatik öz direnç cihazı ile wenner – alfa dizilimi kullanılarak alınan 2 boyutlu ölçümler (Şekil 3a) yine bu şirketin sağladığı RES2DINV programı ile yorumlanmıştır (Şekil 3b). Ölçümler, Obruk -1 çevresinde olası fayları kesebilmek amacıyla GD – KB ve GB – KD gidişli profiller şeklinde alınmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. a) ARES çok kanallı öz direnç cihazı b) 2B öz direnç çalışması için elektrotların düzenlenmesi [15].

2.2 Karotlu sondajlar

Jeolojik saha gözlemleri ve jeofizik çalışmaların tamamlanmasının ardından belirlenen noktalardan karotlu sondaj çalışması yapılarak jeofizik modelin daha anlamlı yorumlanması sağlanmıştır (Şekil 5a). Bu amaçla Obruk-1 çevresinde 4 noktadan yapılan sondajlardan karotlar alınmıştır (Şekil 5b). Sondajlarda çift tüplü karotiyer ile 22 m – 30 m derinliklerine inilmiş, 2 – 10 m toprak ve organikçe zengin bir zon (eski bataklık) ardından travertene girilmiş, 10 – 20 m arasında değişen kalınlıkta traverten kesildikten sonra tutturulmamış yeşil, kahve renkli çamur, kil, silt, kum boyu malzemeden oluşan bir seviyede sonlandırılmıştır.



Şekil 4. İnceleme alanında yürütülen jeofizik çalışmalar ve sondaj yerleri.

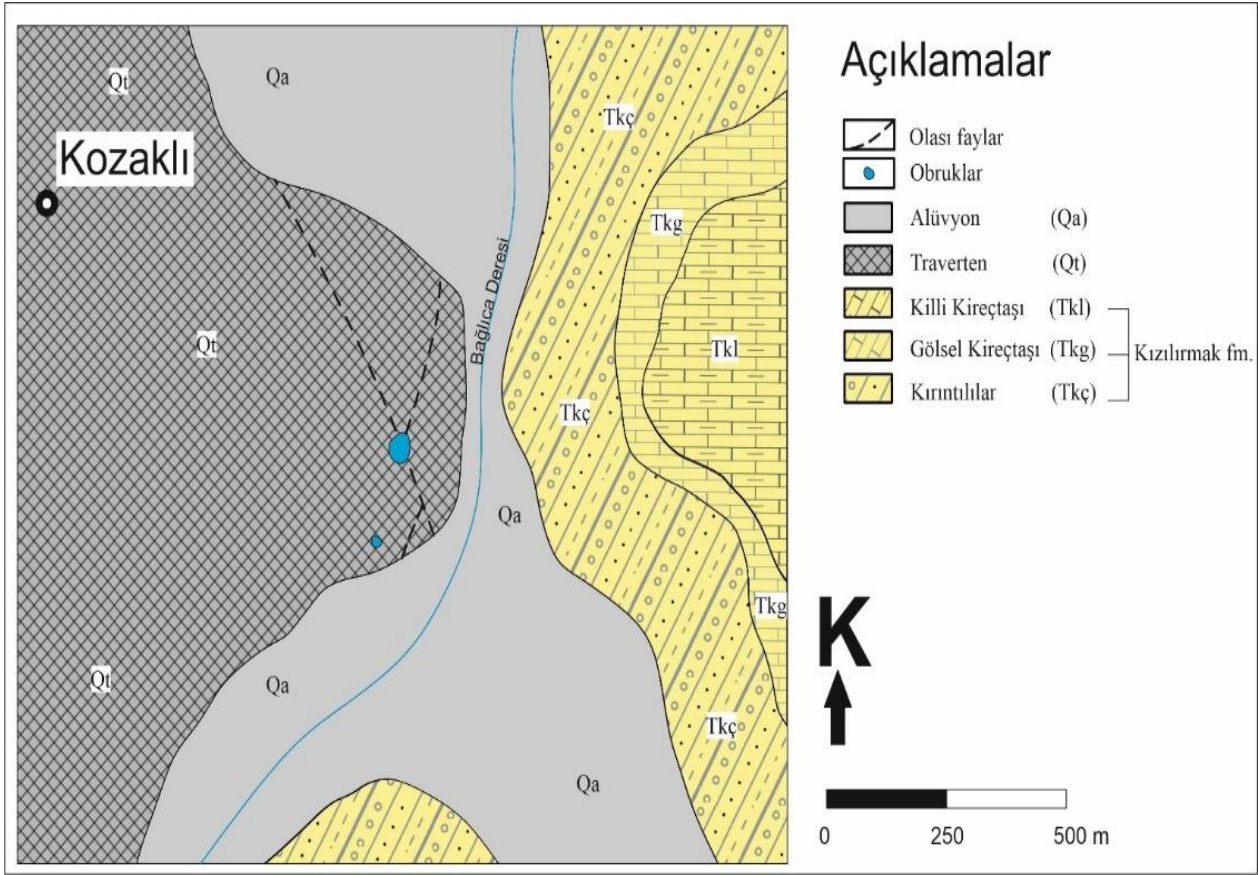


Şekil 5. a) Obruk -1 çevresinde yapılan sondaj çalışması b) Alınan karotların görünümü

2.3 Jeolojik özellikler

Çalışma alanında yüzeyde izlenmeyen fakat bölgesel jeoloji ve derin sondajlar incelendiğinde KJA'nın temelinde Kırşehir masifine ait Paleozoyik yaşlı gnays, şist, mermer ardalımalı metamorfik kayalar bulunduğu bilinmektedir [17, 18]. Granit, granodiyorit ve monzonitlerden oluşan granitoyitler bu metamorfikleri kesmiştir [17]. Üst Kampaniyen'den itibaren günümüze kadar ise temel birimlerinin üzerine farklı dönemlerde karasal ve denizel örtü birimleri çökelmiştir. [18]. Karasal birimler çoğunlukla ardalımalı dereceli geçişli çakıltası, kumtaşı, silttaşı, kiltası ve marnlardan oluşur. Çalışma alanı ve çevresinde Üst Eosen - Oligosen aralığı gölsel kireçtaşları, karasal kırıntılılar ve evaporitlerle temsil edilir [17]. Masifin üst seviyelerinde bulunan mermerler sahip oldukları kırık sistemleri ve boşluklar sebebiyle hazne kaya özelliği gösterir ve KJA'da birinci akiferi oluşturur [19]. İkincil akifer ise Tersiyer yaşlı kireçtaşlarıdır [10,20,21].

İnceleme alanında üç farklı birim yüzeylenmiştir. Bunlar, Çok geniş bir alana yayılım göstermiş olan Kızılırmak formasyonu, traverten ve alüvyondur (Şekil 6). Kızılırmak formasyonu kırmızı, kahve ve gri renk sunan, geçişli tutturulmuş, çakıllı, kumlu, yer yer de mercerler şeklinde tüf, sert kireçtaşı ve kumtaşı içeren çamurtaşlarından meydana gelir. Kumtaşları, genelde kaba taneli, kötü boylanmış, orta kalınlıkta tabakalanma gösteren seviyeler halinde gözlenmektedir. Açık renkli seviyeler düşük dayanıma sahip olup kolay kırılırken, kırmızımsı olanlar ise sert ve yüksek dayanıma sahiptirler.



Şekil 6. İnceleme alanının jeoloji haritası

Çakıltaşları içerisinde mermer ve kireçtaşı çakılları içermekte ve kumtaşlarına nazaran daha kalın tabakalar halinde görülmektedir. Kızılırmak formasyonunun orta seviyeleri bol kırıklı yer yer karstik boşuklu gösel kireçtaşları ile karakteristiktir (Şekil 7). Üst seviyelerinde killi kireçtaşı, marn seviyeleri ile temsil edilen birimin kalınlığı yaklaşık 150 m'dir [22]. Kızılırmak formasyonunun üzerine inceleme alanında geniş yayılım gösteren traverten ve alüvyon birim gelir. Travertenler jeotermal su çıkışlarına bağlı olarak tektonizmaya uyumlu olarak yerleşmiştir. İnceleme alanındaki travertenler birbiriyle kesin sınırlar içermese de iki farklı fasiyese ayrılmıştır. Daha masif halde gözlemlenen kalsit dolgulu travertenler nispeten daha masif yapılı, daha sert ve açık pembe renklidir (Şekil 8a). Boşuklu, daha zayıf dayanıma sahip olan, elle ufalanabilen ve daha koyu renkli olanlar ise aragonit dolgulu ya da boşukları dolgusuzdur (Şekil 8b). Obrukların oluştuğu bölge inceleme alanındaki travertenlerin doğu sınırına yakın, travertenlerin üzerinde yer yer 1m'yi bulan, büyük bölümü peyzaj çalışmaları sırasında yerel yönetimler tarafından doldurulmuş örtü tabaka (tur), traverten kalınlığı yaklaşık 15-20m olup içerisindeki boşuklarda ve travertenin altında yeşil, gri renkli tutturulmamış kil, silt ve kum boyu malzeme gözlemlenmiştir [23].

3 Bulgular ve tartışma

İnceleme alanında ilk aşamada Selçuk [24]'e ait veriler değerlendirilmiş ve jeofizik ölçüm için hatlar belirlenmiştir.

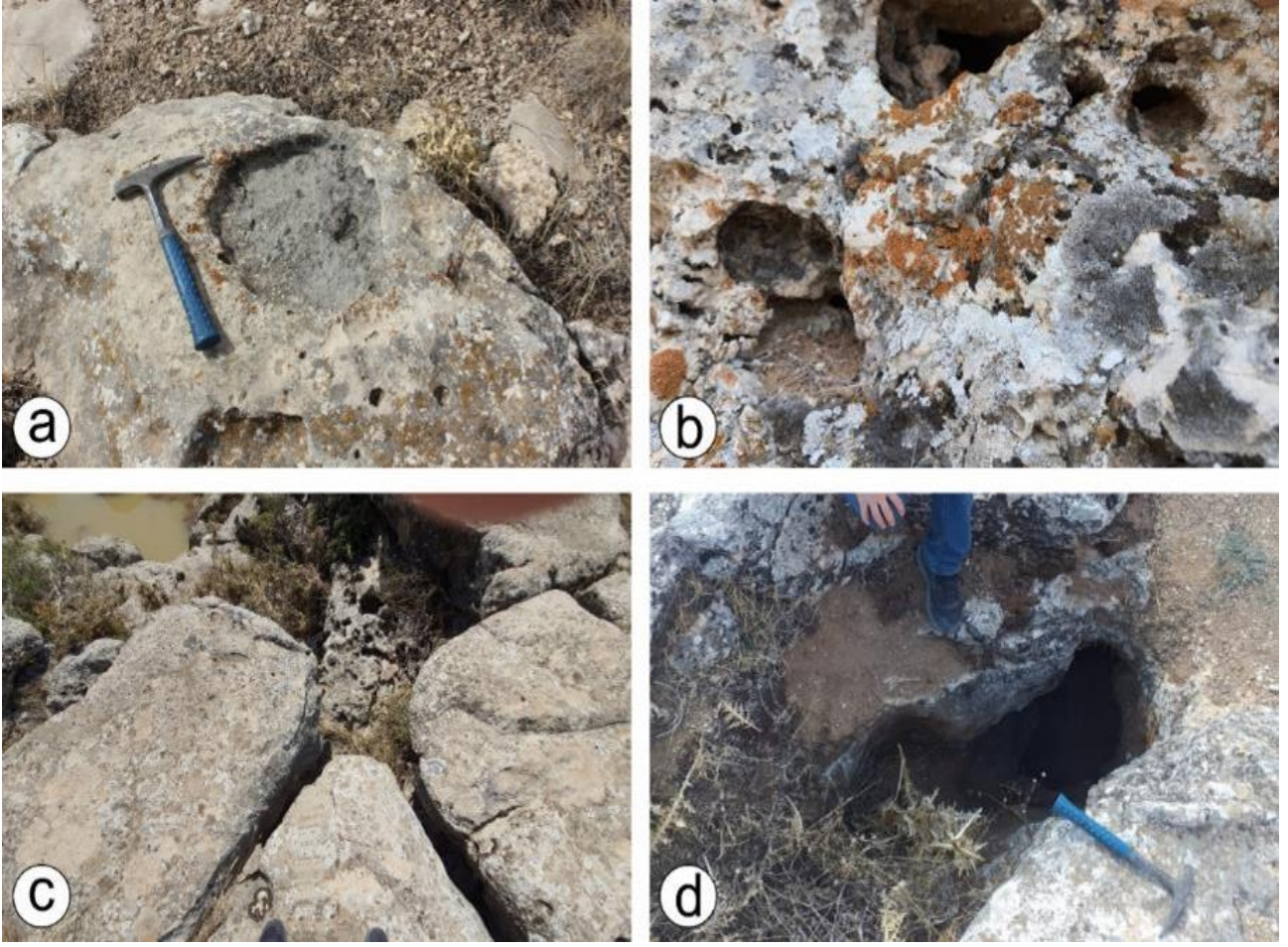
İkinci aşamada ise belirlenen hatlar boyunca jeofizik ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Selçuk [24] inceleme alanında öz direnç profil çalışmaları yapmıştır. Bunlardan öz direnç çalışmaları 3 hat üzerinde yapılmış, 5m elektrot aralığı ile ortalama 33 m derinliğe kadar inilebilmiştir. Üç profildeki anomali doğru konumlandırıldığında, KB-GD ve KD-GB gidişli süreksizlikler Obruk civarında kesişmiştir.

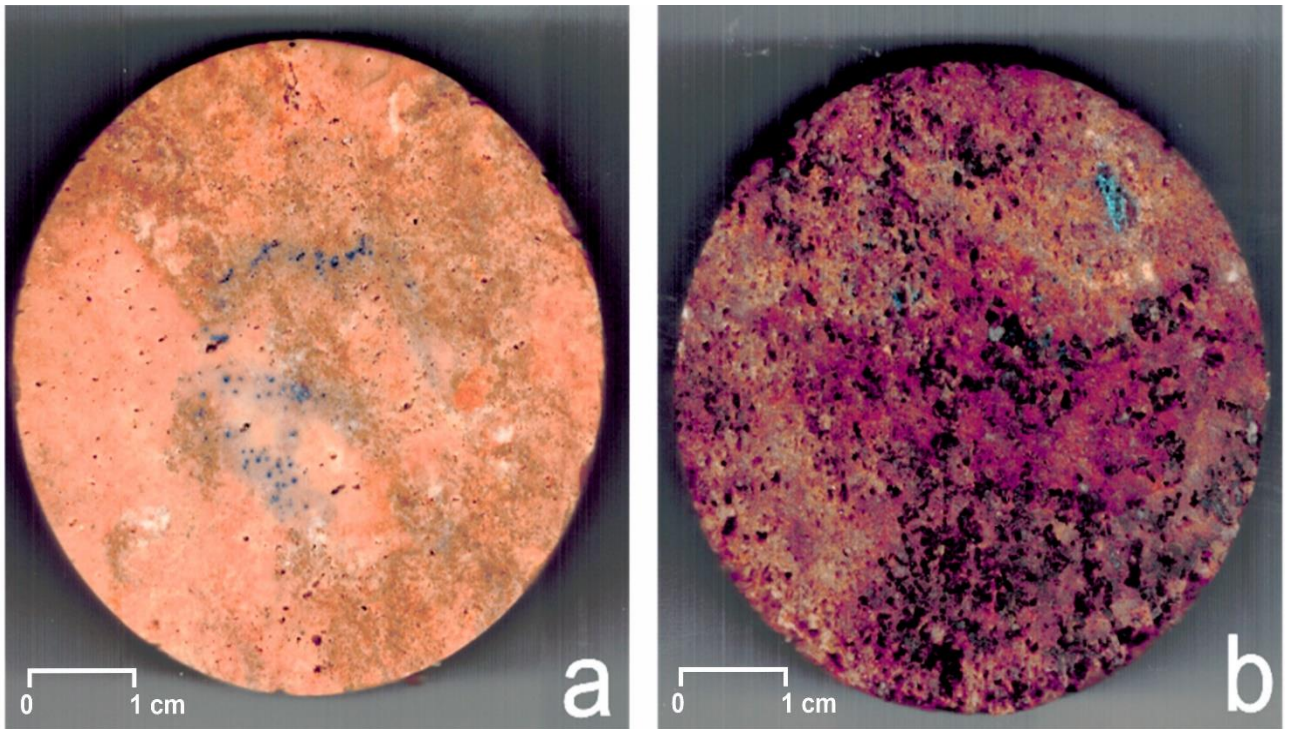
Ayrıca ERT 1 profilinin 120. m'sinde yaklaşık 30 m derinlikteki ve ERT 3 profilinin 80. m'sinde ve yine aynı derinliklerdeki göreceli olarak daha yüksek öz direnç anomalileri mevcuttur.

Dolayısıyla, yeraltı suyu seviyesinin 8-12 m olduğu obruk alanındaki beklenmeyen yüksek öz direnç değeri karstik boşluk şeklinde yorumlanabilir (Şekil 9). Jeofizik çalışmalardan beklenildiği gibi obruk K-G yönünde büyüme eğilimindedir. Obruk susuz halinde güney duvarında bir karstik boşluk gözlenmiştir [24].

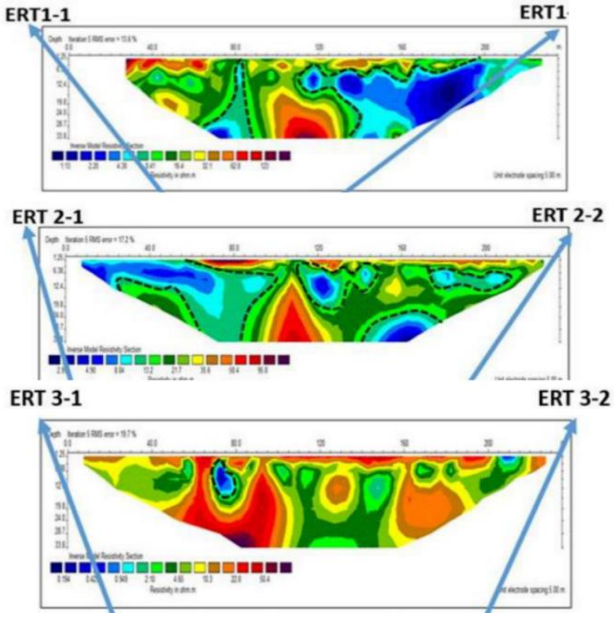
Bu çalışma kapsamında ise benzer güzergâhlar üzerinde faylara ve kaynakların yönelimine dik olarak bu çalışmalar yenilenerek obruk alanının çevresindeki güncel durum ve değişimi incelenmiştir. Kesitlerin genelinde literatürde boşluk olarak değerlendirilebilecek yüksek öz dirençli zonlar görülmemekle birlikte kesitlerin değerlendirilmesinde jeolojik ve hidrojeolojik koşullar da göz önüne alınmalıdır.



Şekil 7. İnceleme alanı ve çevresindeki karst yapıları: (a) tava, (b) huni, (c) karen ve (d) mağara



Şekil 8. Traverten örneklerinin dokularını gösteren makro fotoğrafları a) A tipi, b) B tipi



Şekil 9. Obruk-1 çevresinde yapılan öz direnç profilleri [24]

Hidrojeolojik saha çalışmalarında yeraltı su seviyesinin obruk çevresinde 4-6 m arasında ölçülmüştür. Jeotermal suların elektriksel iletkenliğinin obruk içerisinde yaklaşık 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, obruğa yakın kaynaklarda ise 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'den fazla olduğu gözlemlenmiştir. İletkenlik ile öz direncin ters orantılı olduğu bilindiğine göre bu değer jeofizik kesitlerde jeotermal suyla boşlukların 5 ohm.m'den daha düşük anomaliler göstermesi beklenir.

Şekil 10'da verilen kesitte (A1), KB'da, en üstte suya doygun ve çok düşük öz dirençli 4 m'ye kadar değişik

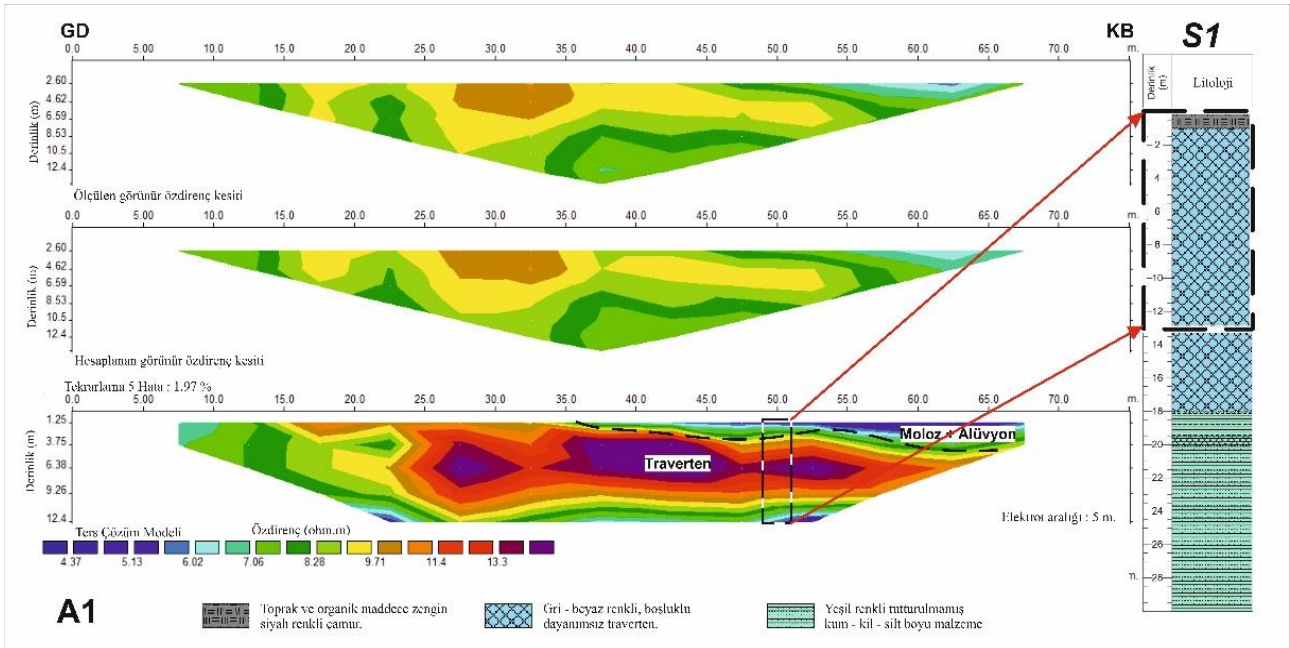
kalınlıkta bir toprak seviyesi, bu seviyenin altında ise az boşluklu (A Tipi) travertenlerin 10 – 12 metrelere kadar indiği, görülmektedir. Nitekim S1 sondajı, bu kesitte 50. metreye denk gelen noktadan yapılmış ve 18 metreye kadar traverten kesildikten sonra yeşil renkli tutturulmamış kum, kil, silt boyu malzemeye geçilmiştir. Jeofizik kesite bu denetimden sonra bakıldığında ise arazi gözlemleri ile uyumlu bir şekilde güzergahta travertenin 0 – 35 metre arasında yer yer yüzeyde görüldüğü, bazen de 30 – 40 cm'lik bir örtünün altında olduğu izlenmiştir.

A1 kesitinde en önemli husus 5 ohm.m civarındaki anomalilerin hem GD hem de KB uçlarında 12 m'nin altında yine görülmeye başlanmasıdır. Bu noktalar Selçuk [24]'daki ERT1 profilinde 120 m ile 150 m arasındaki alana düşmektedir ki açıkça bu alanın içi su dolu karstik bir boşluk olarak yorumlanabilir.

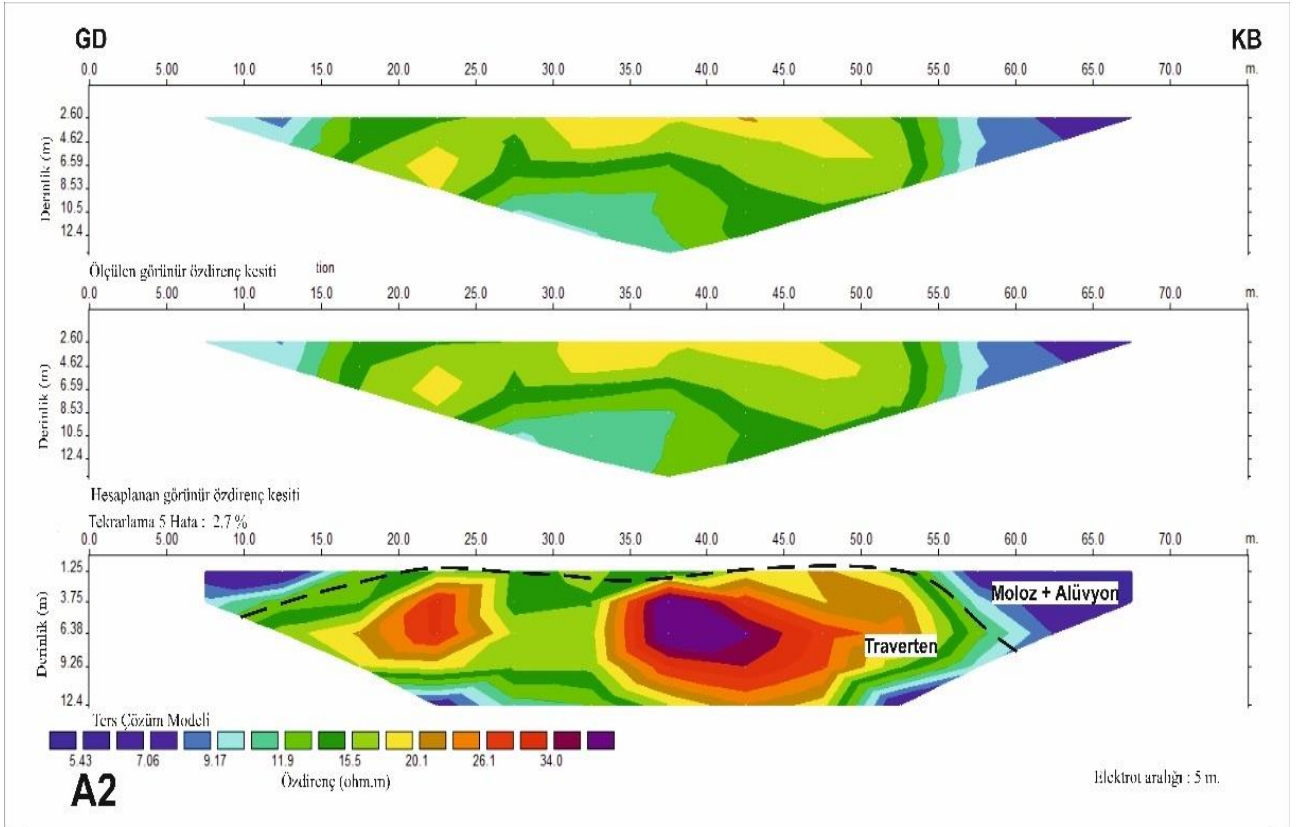
Arazi gözlemlerinde ve çalışmalarında obruk içerisinde profilin KB'sındaki düşük öz dirençli zona doğru bir devam eden bir boşluk olduğu gözlemlenmiş, bölgede çalışan belediye personelleri bu boşluğun içeri doğru (Obruk -2'ye doğru) devam ettiğini beyan etmiştir.

Şekil 11'de verilen kesit (A2) Şekil 10'daki kesitin KB'ya doğru devamı niteliğindedir. A2 kesitinde travertenin yatay devamlılığı 25 – 35 m aralığında kesilmiştir. Bunu konum itibari ile de bakıldığında aslında KD- GB gidişli olası fayın izi olmalıdır. Bununla birlikte bir önceki kesitte yapılan 12m altı için düşük öz direnç zonları burada da görülmektedir.

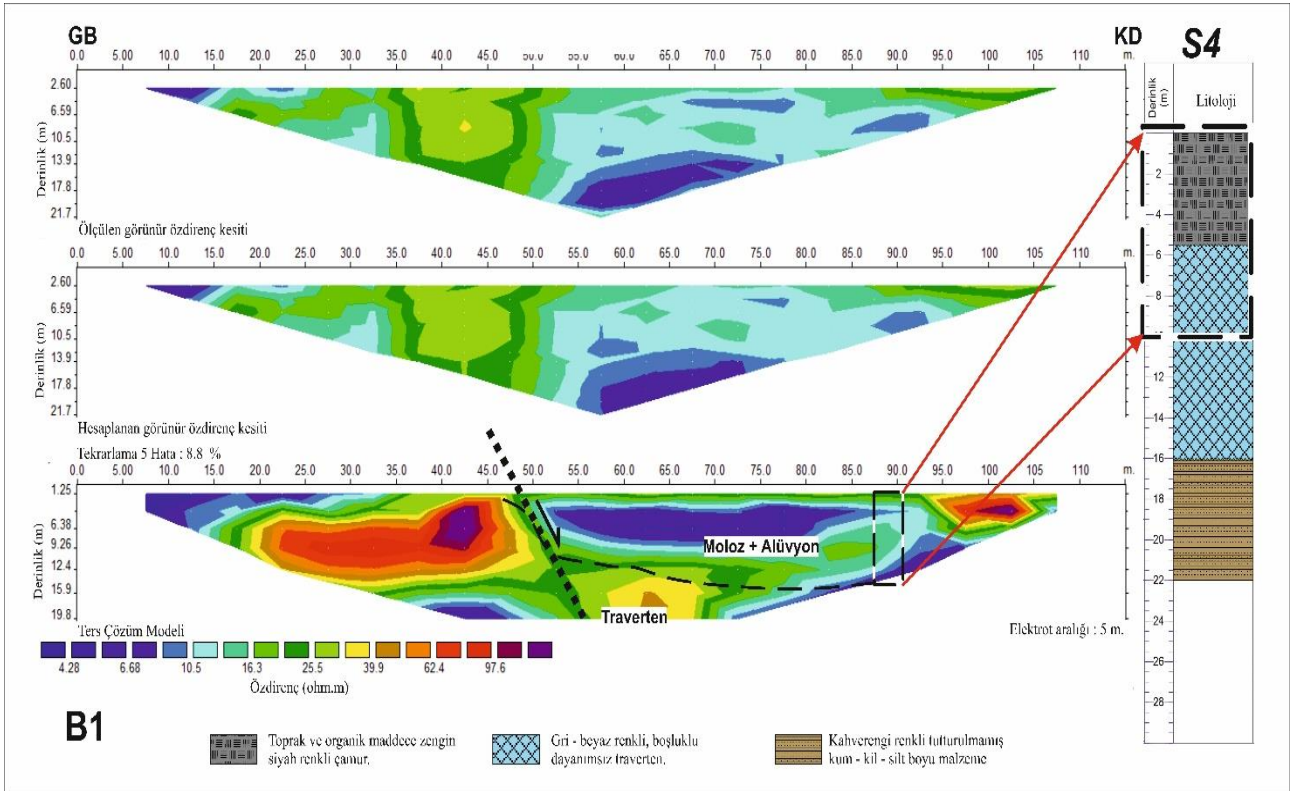
Şekil 12'de B1 profili ve S4 sondajı birlikte verilmiş ve sondajın kesit üzerindeki yeri gösterilmiştir. Anomali ve sınırların yorumu önceki kesitlere benzer olmakla birlikte, kesitin 50. metresinde travertenin bir düzlem boyunca düştüğü görülmektedir.



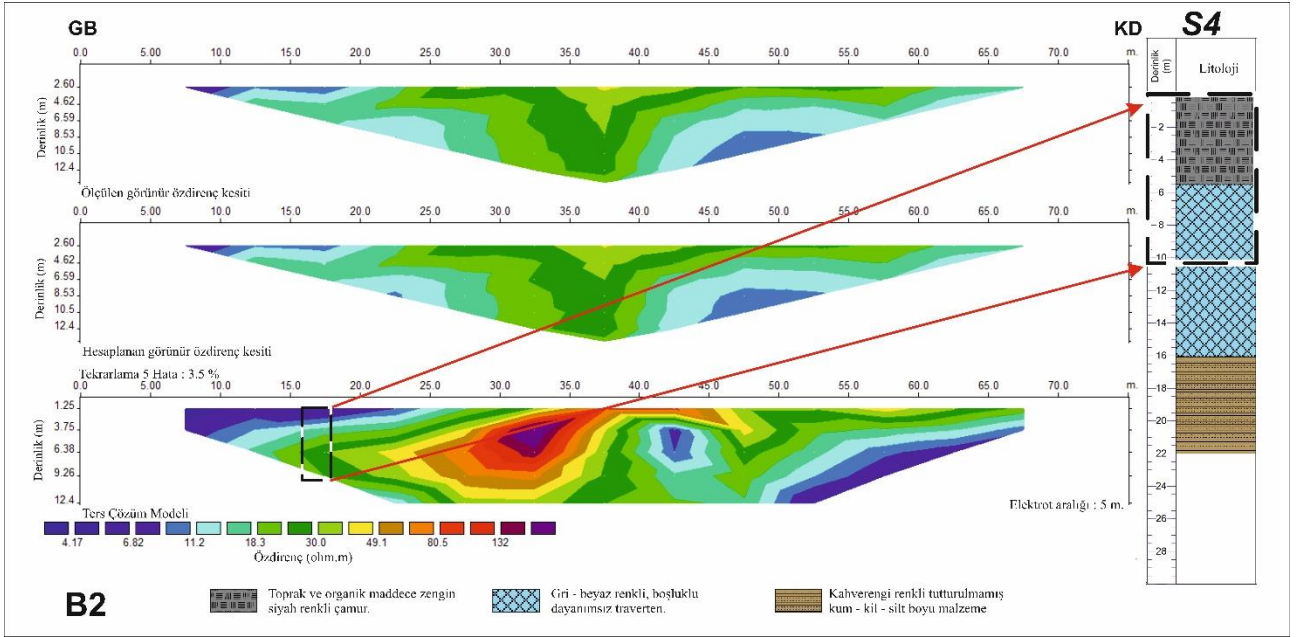
Şekil 10. A1 hattında ölçülen, hesaplanan ve modellenen görünür öz direnç kesiti ve S1 sondajının kesitteki yeri



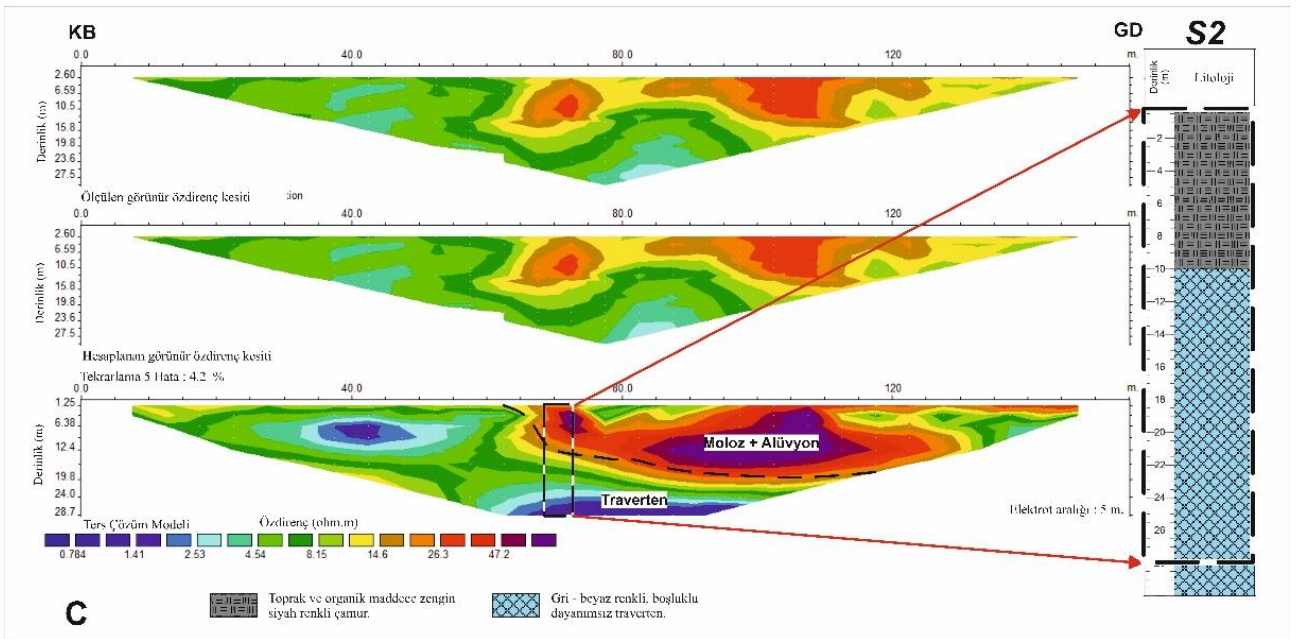
Şekil 11. A2 hattında ölçülen, hesaplanan ve modellenen görünür öz direnç kesiti



Şekil 12. B1 hattında ölçülen, hesaplanan ve modellenen görünür öz direnç kesiti ve S4 sondajının kesitteki yeri



Şekil 13. B2 hattında ölçülen, hesaplanan ve modellenen görünür öz direnç kesiti ve S4 sondajının kesitteki yeri



Şekil 14. C hattında ölçülen, hesaplanan ve modellenen görünür öz direnç kesiti ve S2 sondajının kesitteki yeri

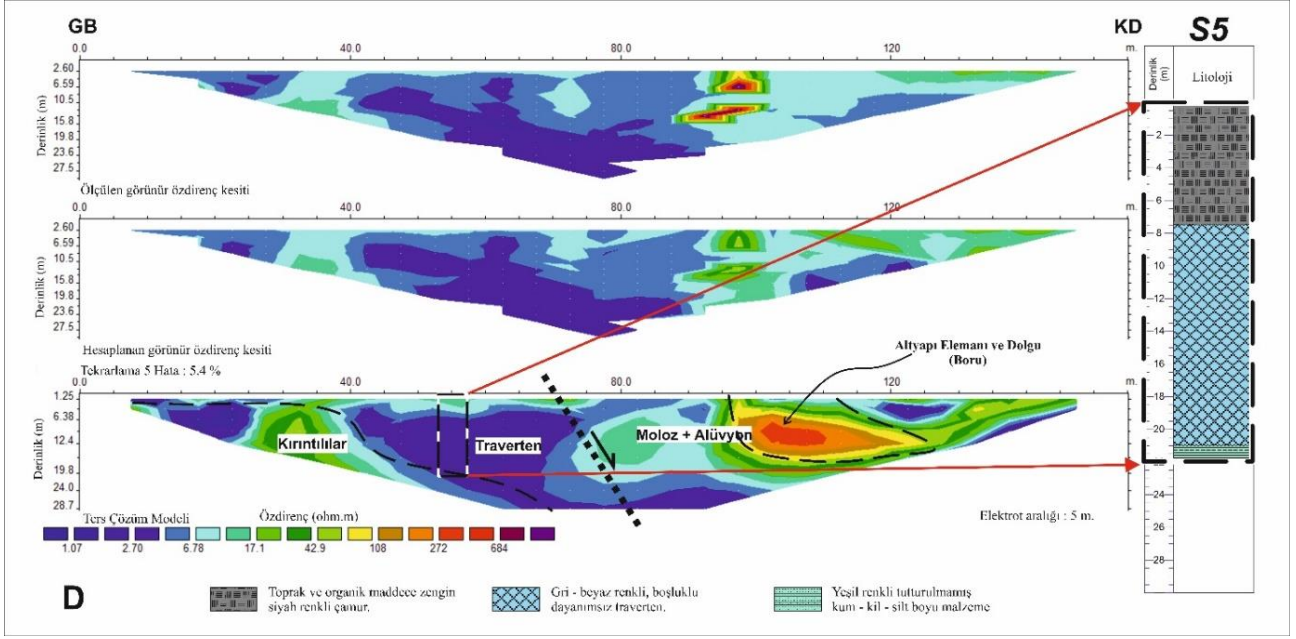
Kesit üzerinden yapılan yorumda normal bileşenli olduğu görülen fayın, jeotermal sistemi ve obruğu oluşturan KB – GD gidişli diğer bir fay sistemi olduğu düşünülmektedir.

Şekil 13'te verilen kesit B1 profilinin KD'ya doğru devamından alınmıştır. B2 Kesitinde 40- 45m arasındaki düşük öz dirençli kapanım yine bir karstik boşluğu işaret etmektedir. Şekil 14'de, K-KD – G-GB gidişli normal bileşenli düşeye yakın bir fay, taban blokta yüzeye yakın travertenler ile ~20 m derinde ise obruktaki su seviyesine denk gelen yeraltı suyu seviyesi açıkça gözlenmektedir.

Şekil 15'te verilen kesitte ise, B1 kesitindeki faya 70-75 m aralığında tekrar rastlanılmakta ve yine aynı karakteri sunmaktadır. Tavan bloğundaki 80-100 m 'de yaklaşık 10 m derinlikte ise gömülü bir altyapı elemanı (boru, kanalizasyon vs) yüksek öz dirençli bir alan oluşturmaktadır.

4 Sonuçlar

Orta Anadolu'da radon gazları ve çamurla tedavinin gerçekleştiği en önemli termal turizm merkezlerinden olan KJA ve çevresinde epijenik ve hipojenik karstlaşma göze çarpmaktadır [25]. Epijenik karstlaşma, daha önce sözü



Şekil 15. D hattında ölçülen, hesaplanan ve modellenen görünür öz direnç kesiti ve S5 sondajının kesitteki yeri

edilen atmosferik ve bitki kök zonundan aldıkları CO₂'ce zenginleşen yağış sularının H₂CO₃ oluşturarak süresizlikler boyunca hareket etmesi sonucu çatlak ve kırıkların yüzeyden itibaren düşey ve yanal yönlerde büyüyerek karstik şekillere dönüşmesidir.

Hipojenik karstlaşma ise, derinlerden gelecek yüzeye doğru fay ve hidrotermal oluklar boyunca yükselen karbonik asit ve /veya sülfürik asitçe zengin çözeltilerin ve jeotermal akışkanların yol açtığı hidrotermal karstlaşmadır [26].

KJA ve çevresinde, travertenler ve altındaki kireçtaşlarında, Çalış civarında mermerlerdeki taş ocaklarında yüzeyde epijenik, derinlerde ise hipojenik karstlaşma gözlenmiştir. Obrukların bulunduğu alanda travertenlerde, iç kökenli CO₂ ve H₂S gibi gazları içeren hidrotermal akışkanların yükselimleri esnasında daha soğuk olan sularla oluşturdukları karışım korozyonu sonucu karstlaşma ilerlemiştir. Bölgede açılan kuyularda gözlenen kısmî su kaçakları [27], karbonatlı kayalardaki karstlaşmanın derinlerde de etkin olduğunu göstermektedir. Evaporitler, kireçtaşı ve mermerlere göre daha kolay çözündükleri için karstlaşma bunlarda daha fazla gelişebilmektedir.

KJA obruk alanı bir obruk meydana getirebilecek şartların çoğunu taşımaktadır. KJA ve etrafında temel kaya olarak termal suyun birincil akiferini temsil eden mermerler, termal suyun yüzeye ulaştıktan sonra oluşturduğu travertenler, yine yakın çevrede ve yapılan sondajlarda rastlanan jips, anhidrit ve halit gibi evaporitler karstik boşluk oluşumu için en ideal ortamı oluştururken, bunların üstünde kohezyonu yüksek alüvyon bir örtü bulunmaktadır. Ayrıca, CO₂ bakımından oldukça zengin ve az miktarda da olsa H₂S de içeren termal su, traverten üzerinde eski bir bataklık kalıntısı olarak yaklaşık 50cm kalınlığında gözlemlenen organikçe zengin seviyede yıkanarak karbonik asit özelliği kazanan meteorik su zenginleşerek karstlaşmayı hızlandırmış olabilir [27]. Ayrıca KJA'da yapılan peyzaj

çalışmaları ile örtü basıncının artması, termal suyun kontrolsüz ve aşırı çekimi, obruk oluşumu için düşünülen çöküntü modeli ile uyumludur.

KJA'da tektonik açıdan aktifliğe işaret eden KB-GD, KD-GB ve D-B yönlü normal ve doğrultu atımlı faylar jeotermal suların yüzeye çıkışlarını kolaylaştırmış ancak karstlaşmada da etkili olmuştur. İki obruğun da bu fayların kesişme noktalarında açığa çıkması, koruma-kullanım şartlarına uyulmadığı takdirde KJA'da obruk vb. karstik oluşumların sürebileceğini göstermektedir.

Güncel çevre düzenlemesinden önce Obruk-1'in çevresinde bulunan yüzey kırıkları ve ~20 m doğusunda yer alan aktif karayolunda meydana gelen oturma karstlaşmanın tehlikeli bir boyutta devam ettiğine dair arazi gözlemleridir. Bu çalışmada yapılan 35-40 m derinliklerin incelendiği jeofizik çalışmalarda, Obruk-1'in hizasında, doğusunda ve kuzeyinde boşluklu fakat genellikle suya doymuş birimlerin de tespit edilmiş olması, bu alanda karstlaşmanın devam ettiğini jeofizik verilerle de ortaya koymaktadır. Ayrıca yapılan karotlu sondajlarda çıkan numunelerde boşluk miktarının gözle görünür bir şekilde fazla olduğu, sondaj sırasında karstik boşluklarda sondaj dizisinin ani olarak 30 – 50 cm düştüğü görülmüştür.

Jeofizik ölçümlerin alınması sırasında yeraltı suyu seviyesinin ve su kimyasının da dikkate alınması gerektiği ile ilgili önemli bir çıktı da elde edilen bu çalışmada traverten seviyesinin görünür öz direncinin 1.07 ile 25 ohm.m arasında değişmektedir. Bu geniş aralığın sebebi ise traverten içerisinde farklı seviyelerde farklı boşluk oranı olması ve düşük görünür öz dirençli seviyelerin neredeyse tamamen iletkenliği yüksek (>2000 µS/cm) ve dolayısı ile çok düşük öz dirençli termal su ile dolu olması olarak yorumlanmıştır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya 120Y313 numaralı proje ile mali destek sağlayan TÜBİTAK'a, jeofizik saha çalışmalarında

yardımcı olan Dr. Fatih UÇAR ve Dr. Ferdi Demirtaş'a, jeofizik ekipmanların kullanımına izin veren Akdeniz Üniversitesi ve Nevşehir Hacıbektas Veri Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümlerine, sondaj çalışmaları sırasında lojistik destek sağlayan Kozaklı Belediyesi'ne, makalenin son haline gelmesi için değerli görüşlerini paylaştıkları hakemlere teşekkür ederler.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] E. Pekkan, Konya Kapalı Havzası'nda karstik çöküntü yapıları olan obrukların oluşumunu etkileyen hidrojeokimyasal süreçlerin incelenmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2004.
- [2] D.C. Ford, P. Williams, Karst geomorphology and hydrology. Hyman, Winchester, MA, 1989
- [3] W. Zhou, M. Lei, Conceptual site models for sinkhole formation and remediation. Environmental Earth Sciences, 76(818), 1–12, 2017.
- [4] M.M. Sweeting, Karst landforms. Columbia University Press, New York, 1973.
- [5] A. Bögli, Karst hydrology and physical speleology (translated from the German by June C. Schmid). Springer, 1980.
- [6] D.C. Ford, P. Williams, Karst geomorphology and hydrology. Wiley, Chichester, UK, p. 562, 2007.
- [7] İ. Kopar, Kozaklı (Nevşehir) jeotermal sahasında oluşan örtü-çökme dolininin (Cover-Collapse Sinkhole) oluşumu ve sonuçları bakımından bir değerlendirme Türk Coğrafya Dergisi, 49; 73–88, 2007.
- [8] A.B. Tihansky, Sinkholes, west-central Florida. In: Galloway D, Jones DR, Ingebritsen SE (eds) Land subsidence in the United States US Geol Surv Circ, 1182, 121–140, 1999.
- [9] B. Canik, Terme kaplıcası ve çevresinin hidrojeolojik etüdü. AÜFF Jeoloji Mühendisliği Bölümü Yayını. Ankara, 1991.
- [10] M. Akyüz, I. Şeren, S. Sevim, A. Koçak, E. Kocabacak, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Jeolojik Etüd Raporu. Nevşehir, 2007
- [11] M. Afşin, H. Gürdal, A. Gürel, A. Onak, Ö. Oruç, M. Kavurmacı, G. Durukan, Orta Anadolu'daki sıcak ve mineralli suların ve travertenlerin hidrojeokimyasal ve izotopik incelenmesi ve suların tıbbî ve biyoiklimsel değerlendirilmesi. TÜBİTAK Proje No: ÇAYDAG 104Y197, 2007.
- [12] S. Pasvanoğlu, A. Güner, F. Gültekin, Environmental problems at the Nevşehir (Kozaklı) geothermal field, central Turkey. Environmental Earth Sciences, 66(2); 549–560, 2012.
- [13] KOP, KOP Bölgesi jeotermal kaynakların değerlendirilmesi projesi. Nevşehir ili raporu, 2020.
- [14] A. I. Samouëlian, A.T. Cousin, A. Bruand, G. Richard, Electrical Resistivity Survey in Soil Science: A Review, Soil and Tillage Research 83(2), 173–93, 2005.
- [15] M.H. Loke, 2D and 3D Electrical Imaging Surveys, 2014 https://sites.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/loke_course_notes.pdf
- [16] A.T. Başokur, Düşey elektrik sondajı verilerinin yorumu, Ankara Üniversitesi, 235 s, 2004.
- [17] A. Koçak, Kozaklı (Nevşehir) jeotermal alanının su kimyası ve rezervuar sıcaklığının incelenmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 1997.
- [18] H. Dağistan, İ. Kara, M. Duru, Nevşehir-Kozaklı jeotermal sahasında yeni bulgular Termal ve Maden Suları Konferansı, 2008.
- [19] B. Canik, I. Çörekçioğlu, The formation of sinkholes (Obruk) between Karapınar and Kızören-Konya. Karst Water Resources, IAHS Publication, 161, 193–205, 1985.
- [20] T. Özbek, Nevşehir Kozaklı kaplıcası hidrojeoloji etüd raporu, Derleme Rapor No:5451, MTA Enstitüsü, Ankara, 1975.
- [21] G. Ok, Kozaklı (Nevşehir) ve Terme (Kırşehir) sıcak ve mineralli sularının su kimyası ve izotopik yöntemlerle karşılaştırılması, tıbbî ve biyoiklimsel değerlendirilmesi. Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray, 2007.
- [22] H. Kara, Türkiye Jeoloji Haritaları Yozgat G-19 paftası. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 1997.
- [23] B. Erişen, R. Özgür, Kozaklı (Nevşehir) alanının jeotermal enerji olanaklarına ilişkin değerlendirme raporu. MTA Derleme Rapor No:10376, Ankara, 1999.
- [24] K. Selçuk, Kozaklı (Nevşehir) jeotermal alanındaki çöküntü mekanizmasının hidrojeolojik açıdan incelenmesi. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray, 2018.
- [25] M. Afşin, M. Kavurmacı, G. Doğan, H. Gürdal, N. Erdoğan, A. Gürel, Ö. Oruç, Kozaklı (Nevşehir) ve Terme (Kırşehir) jeotermal sularının hidrojeokimyasal ve tıbbî – biyoiklimsel değerlendirilmesi. III. Jeotermal Kaynaklar Sempozyumu, 339–347, 2015.
- [26] C.S. Bayarı, Yüksek dağlarda karst evriminin bütünleşik jeomorfolojik, hidrojeolojik ve speleolojik analizler ile kurgulanması: Aladağlar (Doğu Toroslar) Örneği. TÜBİTAK Proje No: ÇAYDAG 104Y211, 2008.
- [27] İ. Kara, Nevşehir Kozaklı MTA-K4 jeotermal araştırma sondajı kuyu bitirme raporu. Derleme Rapor No:11182, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 2009.





Kimyasal olarak işlenmemiş Midyat taşı kullanılarak sulu çözeltilerden Pb(II) iyonlarının etkin bir şekilde uzaklaştırılması: İzoterm, kinetik ve termodinamik çalışmalar

Effective removal of Pb(II) ions from aqueous solutions using chemically untreated Midyat stone: Isotherm, kinetic and thermodynamic studies

Mutlu Canpolat^{1,*}, Yalçın Altunkaynak², Ömer Yavuz³

^{1,2} Batman Üniversitesi, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, 72060, Batman, Türkiye
³ Dicle Üniversitesi, Kimya Bölümü, 21280, Diyarbakır, Türkiye

Öz

Endüstriyel atıklardan ağır metallerin uzaklaştırılması bilim insanlarının çözüm aradığı en önemli konulardan biridir. Bu araştırma, sulu çözeltilerden Pb²⁺ iyonlarının adsorpsiyonu için Midyat taşının (MT) değerlendirilmesini inceliyor. Çalışmada, temas süresi, başlangıç metal iyon konsantrasyonu, pH gibi çeşitli değişkenlerin adsorpsiyon verimliliği üzerindeki sonuçları araştırıldı. MT'nin yüzey özellikleri taramalı elektron mikroskopu, enerji dağılım spektroskopisi ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi ile araştırıldı. Pb²⁺ iyonunun uzaklaştırılması için en uygun çalışma koşullarında başlangıç konsantrasyonu, temas süresi ve çözelti pH'ı sırasıyla 800 mg/L, 90 dakika ve 4,23 olarak belirlendi. Sonuçlar, izoterm verilerinin Langmuir izoterm modeli için, kinetik verileri için de Yalancı birinci dereceden kinetik modeline (PSO) uygun olduğunu göstermiştir. Pb²⁺ iyonu için adsorpsiyon kapasitesi 298, 308 ve 318 K'da sırasıyla 129.87 mg/g, 178.57 mg/g ve 188.68 mg/g olarak hesaplandı. Termodinamik çalışmalar, MT yoluyla Pb²⁺ iyonunun uzaklaştırılmasının doğal ve endotermik olduğunu göstermiştir. MT'nin sahip olduğu yüksek adsorpsiyon kapasitesi, ucuz ve kolay bulunabilmesi gibi özelliklerinden dolayı Pb²⁺ iyonlarının sulu ortamdan uzaklaştırılmasında etkili ve gelecek vaat eden bir malzeme olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Midyat taşı, Adsorpsiyon, Kurşun, Langmuir izoterm modeli, Yalancı ikinci dereceden kinetik model

1 Giriş

Sanayideki hızlı gelişmeler, şehirleşme ve hızlı nüfus artışı nedeniyle doğal kaynaklar gün geçtikçe azalmaktadır. Doğal kaynakların azalması hava ve su kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır. Boya sanayi, tekstil, ilaç, ağır metal ve gübreleme gibi faaliyetlerle su kaynakları kirlenmektedir. Kirleticiler; insan ve çevre sağlığı için büyük tehlike oluşturmaktadır [1,2]. Suda doğal olarak 1 mg/L'den daha az miktarda bulunan ağır metallerin önemli kimyasal etkileri vardır [3]. Bazı metallerin belirli bir düzeyin üzerinde alınması insanlarda toksik etkilere neden olurken,

Abstract

One of the most pressing concerns that scientists are attempting to solve is the removal of heavy metals from industrial waste. The effectiveness of Midyat stone (MS) for the adsorption of Pb²⁺ ions from aqueous solutions is investigated in this study. The effects of numerous variables on adsorption effectiveness, such as contact duration, initial metal ion concentration, and pH, were studied in the study. Scanning electron microscopy, energy dispersion spectroscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy were used to analyze the surface properties of MS. Under the most favorable working conditions for the removal of the Pb²⁺ ion, the starting concentration, contact duration, and solution pH were determined to be 800 mg/L, 90 minutes, and 4.23, respectively. The results showed that the isotherm data fit the Langmuir isotherm model, and the kinetic data fit the pseudo-second-order (PSO) model. At 298, 308, and 318 K, the adsorption capacity of the Pb²⁺ ion was determined to be 129.87 mg/g, 178.57 mg/g, and 188.68 mg/g, respectively. The elimination of Pb²⁺ ions by MS was shown to be natural and endothermic in thermodynamic analyses. Because of its features, such as high adsorption capacity, low cost, and ease of availability, it has been determined that MS is an effective and promising material for removing Pb²⁺ ions from the aqueous environment.

Keywords: Midyat stone, Adsorption, Lead, Langmuir isotherm model, Second order kinetic model

düşük düzeylere uzun süre maruz kalınması çeşitli alerjik reaksiyonlarla birlikte kansere neden olabilmektedir [4]. Cıva, bakır, nikel, kurşun, krom gibi metaller toksik ağır metallerdir ve çevreye bırakıldıklarında toprakta birikerek çevreye ve canlılara önemli zararlar verirler [5]. Çevre sorunları arasında çok önemli bir yere sahip olan kurşun (Pb²⁺) kirliliğini önlemek için dünya çapında çok önemli çalışmalar yürütülmektedir. Madencilik, pil üretimi, boya endüstrisi gibi çeşitli tarımsal faaliyetler yoluyla çevreye kurşun atılabilmektedir [6-9]. Pb²⁺ iyonlarının birikmesi vücutta en fazla organ, sindirim ve sinir sisteminin olumsuz etkilenmesine neden olur. Ancak çocuklarda anemi, zihinsel

ve gelişimsel bozukluklar Pb^{2+} 'm olumsuz etkileri arasında sayılabilir [10-12]. Açıklanan nedenlerden dolayı Pb^{2+} 'm sulu çözeltilerden uzaklaştırılması hem çevre kirliliğinin azaltılması hem de yaşam kalitesinin iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Ağır metallerin veya toksik maddelerin sudan uzaklaştırılması için geliştirilmiş farklı analitik teknikler mevcuttur. Membran ayırma, adsorpsiyon, nanofiltrasyon, iyon değişimi, çöktürme gibi yöntemler bunlardan bazılarıdır [13-15]. Bu teknikler, ağır metal iyonlarının uzaklaştırılmasında yüksek konsantrasyonlarda etkili olsalar da, düşük konsantrasyonlarda yeterince ayırım yapamamaktadırlar. Adsorpsiyon, ağır metallerin etkin uzaklaştırılması ve düşük maliyet açısından diğer yöntemlere göre daha avantajlı ve pratik bir yöntemdir [16-18]. Metal iyonlarını sulu çözeltilerden uzaklaştırmak için farklı adsorbanlar kullanılır [19-21]. Farklı fizikokimyasal etkileşimler nedeniyle, her bir adsorban, belirli bir metal iyonu için seçici olabilir. Sulu çözeltilerden Pb^{2+} gibi ağır metal iyonlarının konsantrasyonunu kabul edilebilir sınıra altına indirebilen yeni bir adsorban her zaman tercih edilir.

Son yıllarda endüstriyel atıklar, düşük maliyetleri ve ikincil atık oluşumunun olmaması nedeniyle ağır metallerin giderilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde kurşun iyonlarının adsorpsiyon yöntemiyle uzaklaştırılmasında çeşitli doğal tarımsal atıklar, ön işlemlere tabi tutulmuş tarımsal atıklar, kil türleri, farklı bölgelere ait kalker türleri gibi farklı adsorbanlar kullanılmıştır. Bileşiminde $CaCO_3$ bulunan malzemeler ile Cu, Zn, Pb, Mn, Co, Ni, Cd gibi metal iyonları adsorplanabilir [22]. Bununla birlikte kalsit, kalkerli topraklarda metal iyonları için iyi bir adsorbandır ve çevre açısından iyi bir metal uzaklaştırma malzemesidir [23]. Sektördeki gelişme ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda üretim kapasitesi her geçen gün artan taş işleme tesislerinde mıcır ciddi bir çevre sorunudur [24]. MT beyazımsı sarı bir kalkerdir. Bu haliyle kolayca kesilebilen, delinebilen, oyulabilen ve kolayca şekillendirilebilen bir taştır. Taşların bu çekici özelliğinden dolayı bölgede inşa edilen yapılarda yapı malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. MT'nin kimyasal bileşimi incelendiğinde dolomit ve dolomitik kalker sınıfında olduğu anlaşılmaktadır. Mardin'in Midyat ilçesinde çıkartılan ve Midyat taşı olarak bilinen bu karbonat kayası, binaları yazın serin, kışın sıcak tutar ve üstün özelliklerinden dolayı işlenmesi kolaydır. Bölgede taşla ilgili taş işçiliğinin gelişmesini sağlamış; ve yapı inşaat malzemelerinde yaygın kullanılmaktadır. MT, yüzyıllardır Midyat evlerinde ve çeşitli yapılarda yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bölgede bu kalkerli taşın işlenmesi için çok sayıda ocak bulunmaktadır. Bu taşların işlenmesi sırasında ciddi miktarda atık oluşmakta ve bu atıklar gelişigüzel çevreye atılmaktadır. Bu atıkların hem çevre kirliliğine neden olması hem de sulu çözeltilerden ağır metallerin uzaklaştırılmasında yüksek maliyetli malzemelere alternatif olmalarından dolayı bu çalışmayı gerçekleştirdik. Literatüre bakıldığında kireç taşı kullanılarak kurşun iyonlarının uzaklaştırılması ile ilgili benzer çalışmalar bulunmaktadır [25,26], ancak bu çalışmalar arasında kimyasal işleme tabi tutulmadan Mardin-Midyat bölgesine ait Midyat taşı atıkları ile kurşun

iyonlarının sulu çözeltilerden uzaklaştırılması ile ilgili çalışmalara rastlanmamıştır.

Bu çalışmada Midyat taşı adsorban olarak kullanılarak sulu çözeltilerden Pb^{2+} iyonlarının uzaklaştırılması araştırılmıştır. MT ile metal iyonlarının uzaklaştırılmasında çözelti pH'ı, başlangıç metal iyon konsantrasyonu, sıcaklık ve temas süresi gibi çalışma değerlerinin sonuçları araştırılmıştır. Denge izotermi, kinetik ve termodinamik katsayıları değerlendirilerek ve adsorpsiyon kapasitesi belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Adsorbanın hazırlanması

Bu çalışmada adsorban olarak kullanılan MT, Türkiye'nin Mardin ili Midyat ilçesi Barış Tepe mevkiindeki taş ocaklarından getirilmiştir. Taş parçaları çeneli kırıcı ile öğütüldükten sonra bilyalı değirmen ile toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilmiş MT'nin parçacık boyutu, eleme yoluyla 100 mikronun altına düşürülmüştür. 378 K'de 24 saat ısıtılarak nemin uzaklaştırılması dışında herhangi bir kimyasal işlem uygulanmadan deneylerde kullanılmıştır.

2.2 Metal iyonu çözeltilerinin hazırlanması

Adsorpsiyon çalışmasında kullanılacak olan Pb^{2+} iyon stok çözeltisi, 5000 mgL^{-1} konsantrasyonunda Kurşun (II) nitrattan $[Pb(NO_3)_2]$ deiyonize su kullanılarak hazırlanmıştır. Stok çözelti ile daha düşük konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlandı. Her adsorpsiyon çalışması, yeni seyreltmeler yapılarak gerçekleştirilmiştir. HCl ve NaOH çözeltileri kullanılarak farklı pH'larda çözeltiler hazırlandı. Çalışmada kullanılan tüm kimyasallar Merck'ten satın alındı.

2.3 Toplu deneyler

MT'nin adsorpsiyon kinetiği, 1000-5000 mgL^{-1} konsantrasyon aralığında 0,2 g MT'ye 25 mL Pb^{2+} çözeltileri eklenerek gerçekleştirilmiştir. 298, 308 ve 318 K sıcaklıklarda 100 rpm karıştırma hızı ile dengelendi. Dengeye ulaştıktan sonra, Pb^{2+} konsantrasyonu, kalibrasyon eğrisi tekniği kullanılarak Perkin-Elmer Analyst AA2-400 atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) ile belirlenmiştir.

Birim kütle (Adsorban) başına t zamanında adsorbe edilen Pb^{2+} iyonlarının miktarı, aşağıda verilen denklem kullanılarak belirlenmiştir.

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{m} V \quad (1)$$

Burada q_t ($mg g^{-1}$), dengeleme sırasında adsorbanın kütle birimi başına adsorplanan Pb^{2+} iyonunun miktarıdır. m (g) adsorbanın kütlesidir, V (mL) çözeltinin hacmidir, C_0 ve C_t (mgL^{-1}) sırasıyla metal iyonunun başlangıç ve denge konsantrasyonudur.

Adsorpsiyon üzerine başlangıç metal iyonu konsantrasyonunun etkisini belirlemek için, Pb^{2+} iyon stok çözeltisinden 1000 ve 5000 mgL^{-1} arasında farklı konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlandı. 0.2 g midyat taşı üzerine 25 mL (1000/5000 mgL^{-1}) çözeltisi eklendi. 120 dakika boyunca 298, 308 ve 318 K'de çalkalandı. Çözeltiler

120 dakika çalkalandıktan sonra AAS cihazı ile adsorbe edilmemiş metal iyonlarının konsantrasyonları belirlendi. Adsorplanan metal miktarı **Denklem 1** kullanılarak hesaplandı. Maksimum adsorpsiyonun meydana geldiği ilk konsantrasyonlar belirlendi. Bu deney, dengelemenin tarifi için adsorpsiyon izotermelerinin elde edilmesine izin verdi.

Adsorpsiyon üzerindeki temas süresinin sonucunu tanımlamak için, 0,2 g MT'ye 25 mL 3000 mgL⁻¹ konsantrasyonda Pb²⁺ iyonu ilave edildi. Çalkalayıcı ile karıştırılan numunelerin Pb²⁺ konsantrasyonları, 10 ila 120 dakika arasında 10 dakikalık aralıklarla AAS ile ölçülerek belirlendi. Elde edilen veriler kullanılarak Pb²⁺ çözeltisinin doygunluğa ulaştığı adsorpsiyon süresi belirlendi.

Sıfır yük noktası (PZC), adsorban yüzeyinin nötr bir yüke sahip olduğu pH olarak tanımlanır. Bu çalışmada PZC tayini için 0,5 g adsorban (303 K) 50 mL çözelti ile karıştırılarak HCl ve NaOH çözeltileri ile farklı başlangıç pH değerlerinde (2.01, 2.94, 3.92, 4.98, 6.08, 6.99, 8.07, 9.02, 10.09 ve 11.02) çözeltiler hazırlanmıştır. Çözeltinin iyonik gücü 0.1 molL⁻¹ KCl eklenerek değiştirildi. Dengeye ulaştıktan sonra (24 saat), nihai pH ölçüldü, bu verilere dayalı olarak bir nihai pH'a karşı ilk pH grafiğinin oluşturulması mümkün kıldı ve nihai pH sabit değerine atıfta bulunulan PZC pH'ı belirlendi [27].

pH'ın adsorpsiyon üzerindeki sonucunu belirlemek için, 0,1 molL⁻¹ HCl ve 0.1 molL⁻¹ NaOH çözeltileri kullanarak pH = 2 ila pH = 7 arasındaki farklı pH değerlerinde 3000 mgL⁻¹ Pb²⁺ iyon çözeltileri hazırlandı. Hazırlanan bu çözeltilerin 25 mL'sine 0,2 g MT eklendi ve 120 dakika boyunca bir çalkalayıcıda çalkalandı. Daha sonra adsorbe edilmemiş metal iyonlarının konsantrasyonları AAS cihazı ile belirlendi.

2.4 Adsorban karakterizasyonu

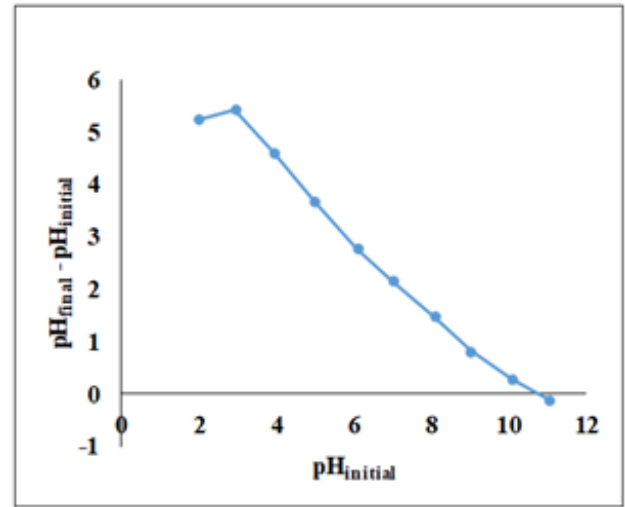
Midyat taşının yüzey özellikleri ve temel analizi SEM-EDS enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile birlikte taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak araştırıldı. Adsorbanın kristal yapısını doğrulamak için X-ışını kırınımı (XRD) analizi yapıldı. Spesifik yüzey alanı, düşük sıcaklıkta (77,15K) N₂ sorpsiyonunda Brunauer, Emmett ve Teller (BET) analizi kullanılarak ölçüldü. Pb²⁺ iyonlarının adsorban maddeye (MT) tutunmasında etkin olarak rol alan amid, amin, karbonil ve hidroksil grubu gibi MT'nin olası tutunma bölgelerini ve kimyasal bağ yapısını belirlemek için FTIR spektroskopisi kullanıldı.

3 Bulgular ve tartışma

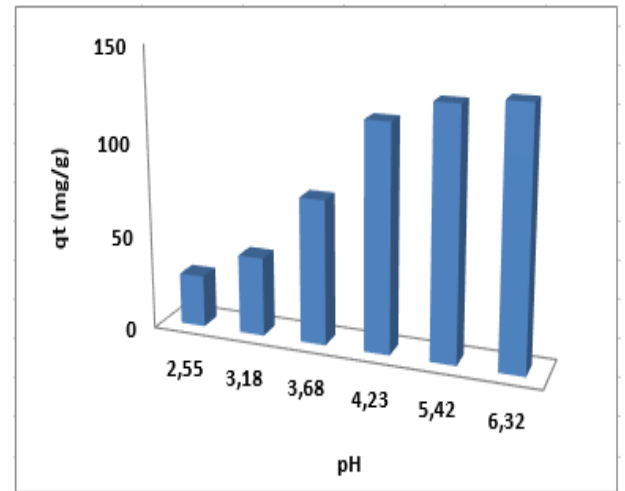
3.1 Adsorpsiyona pH'ın etkisi

PZC, bir yüzey üzerindeki elektriksel yük yoğunluğunun sıfır olduğu durumu tanımlar ve adsorban yüzey yükünün ağırlıklı olarak pozitiften negatife değiştiği pH'ı kontrol etmek amacıyla adsorban için burada belirlenir. Midyat taşı örneklerinin adsorpsiyon kapasitesi iyon değişimi ve fiziksel adsorpsiyon ile ilgilidir [28]. Bu mekanizmalar genellikle, adsorpsiyon sürecini etkileyen pH değişimi ile değiştirilebildikleri sulu bir ortamda metal türlerini yakalayabilen ve tutabilen yüzey gruplarını içerir [29]. Bu nedenle Midyat taşının asit-baz davranışının ön çalışması PZC tayini ile yapılmıştır. 0,1 mol/ L KCl çözeltisi için

sonuçlar **Şekil 1a**'da gösterilmektedir. pH, adsorbanın yüzeyindeki aktif bölgelerin yükünü etkiler, adsorbatların iyonlaşma derecesini değiştirir ve metal iyonlarının sulu çözeltideki çözünürlüğünü etkiler. pH'ın yüzey bölgelerinin doğası üzerindeki etkisi, malzemenin sıfır yük noktası (pHPCZ) cinsinden, yani adsorbanın yüzey yükünün nötr olduğu zaman olarak açıklanabilir. **Şekil 1**, pHPCZ'nin 10,76 olduğunu gösterir, bu nedenle pH_{solution} < pHPCZ olduğunda, adsorban pozitif olarak yüklenir. Çözeltinin pH değeri arttıkça, pozitif yüzey yükü azalır ve adsorban ile metal iyonu arasındaki itme azalır. Sonuç olarak, kaldırma kapasitesi artma eğilimindedir.



(a)



(b)

Şekil 1. (a) Midyat taşında PZC karakterizasyonu. KCl konsantrasyonu: 0.1 molL⁻¹ (b) MT kullanılarak Pb²⁺ iyonunun uzaklaştırılmasında pH'ın sonucu. pH 2.0 – 7.0, başlangıç Pb²⁺ iyon konsantrasyonu 3000 mgL⁻¹

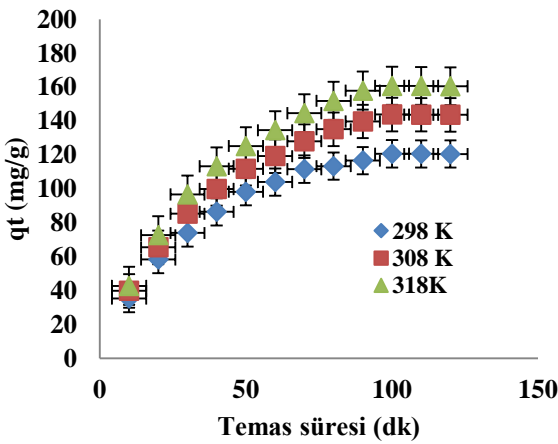
Çözelti pH'ının, uzaklaştırma işlemi sırasında Pb²⁺ iyonlarının davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için farklı pH (2-7) aralıklarında çalışmalar yapılmıştır. Pb²⁺ iyonlarının çökmesini önlemek için alkali pH değerlerinde adsorpsiyon deneyleri yapılmamıştır. Çözelti pH'ının Pb²⁺ adsorpsiyonu üzerindeki sonucu **Şekil 1b**'de verilmiştir. OH

ve $-NH_2$ gibi fonksiyonel gruplar, düşük pH'da OH_2^+ ve $-NH_2^+$ oluşturmak üzere protonlanır, bu da Pb^{2+} 'nın bağlanma yeteneğinin azalmasına neden olur [30]. Ek olarak, pozitif yüklü yüzey ve Pb^{2+} arasındaki güçlü elektriksel itme, Pb^{2+} 'nın adsorbanla temas etmesini önler. pH'daki artışla birlikte, fonksiyonel gruplar kademeli olarak protonsız hale gelir. Bu durumda, adsorban bağlanma kabiliyetini yeniden kazanır ve çözelti pH'ının artmasıyla uzaklaştırma kapasitesi artar. pH artmaya devam ettikçe, Pb^{2+} hidrolize olacak ve $PbOH^+$ ve $Pb(OH)_2$ formlarına dönüşecektir. Bu, Pb^{2+} iyonunun adsorpsiyonunda azalmaya yol açacaktır [31].

Şekil 1b, Pb^{2+} iyonlarının uzaklaştırılmasının pH'a bağlı olduğunu göstermektedir. Pb^{2+} iyonu ve 0.2 g MT 25 mL, 3000 mgL^{-1} başlangıç konsantrasyonunda pH 2,0 ile 7,0 arasında kullanıldığında, uzaklaştırma kapasitesinin 2 saatte 219.84 ila 1067.83 mgL^{-1} (% giderim: 7.33 ila 35.59) arasında değiştiği belirlendi. Çalışmanın sonraki aşamalarında metal hidroksitlerin çökmesini önlemek için çözeltinin doğal pH değeri olan pH 4.23'te çalışmaya devam edilmiştir.

3.2 Temas süresinin etkisi

Adsorpsiyon işleminde çözüldüğü Pb^{2+} iyonlarının adsorban üzerindeki temas süresi çok önemli bir faktördür. Başlangıç konsantrasyonu 3000 mgL^{-1} olan Pb^{2+} iyon çözeltisinin denge süresi, farklı sıcaklıklarda (298, 308, 318K) ve farklı zaman aralıklarında (10 - 120 dakika) 100 dakika olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Pb^{2+} iyonlarının uzaklaştırılması sırasında, geniş kullanılabilir yüzey alanı sayesinde ilk aşamada uzaklaştırma oranı hızla artmıştır. Adsorban yüzey alanının doygunluğunun başlangıcından dengeye ulaşılan kadar geçen zaman aralığında uzaklaştırma hızı yavaşlamıştır [28]. Şekil 2'de görüldüğü gibi 3000 mgL^{-1} başlangıç konsantrasyonunda çalışma sıcaklıklarında dengede tutulan Pb^{2+} iyonlarının miktarları sırasıyla 120.61, 143.79 ve 160.71 $mg.g^{-1}$ (% giderim: 32.11 (298K), 39.56 (308K), 43.17 (318K)) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen veriler, uzaklaştırma işleminin kinetiğini değerlendirmek için de kullanıldı.



Şekil 2. MT kullanılarak Pb^{2+} iyon adsorpsiyonunda temas süresinin sonucu

3.3 Kinetik çalışmalar

Pb^{2+} iyonlarının MT üzerine adsorpsiyon mekanizmalarını anlamak ve sürecin hız sınırlayıcı adımını tanımlamak için kinetik çalışmalar uygulanmıştır. Adsorpsiyon prosesinde temas süresi önemli bir değişkendir. Şekil 3'te verilen sonuçlara göre, MT'nin adsorpsiyon kapasitesi, başlangıç aşamasındaki temas süresi ile hızla artmıştır. Pb^{2+} iyonlarının çoğu 100 dakikalık temas süresi içinde adsorbe edildi. Bunun nedeni, kısa temas sürelerinde büyük miktarda boş adsorpsiyon bölgeleridir. Temas süresinin artmasıyla boşluklar hedef iyonlar tarafından doldurulur ve adsorpsiyon süreci giderek yavaşlar [29]. Kinetik yöner hakkında daha kapsamlı veriler elde etmek için doğrusal olmayan kinetik modelleme yapıldı [30,31]. Adsorpsiyon verilerini analiz etmek için deneysel veriler Yalancı birinci derece (PFO), Yalancı ikinci derece (PSO) and Elovich kinetik modellerine uygulandı. PFO, PSO ve Elovich için doğrusal olmayan kinetik denklemler sırasıyla (Denklem 2, 3, 4) verilmiştir [32,33]. Bununla birlikte, film difüzyonunu ve gözenek difüzyon hızını netleştirmek için partikül içi difüzyon (Weber-Morris) kinetik modeli kullanılabilir [34]. Bu kinetik modelin lineer formu Denklem 5'teki gibi gösterilebilir.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (3)$$

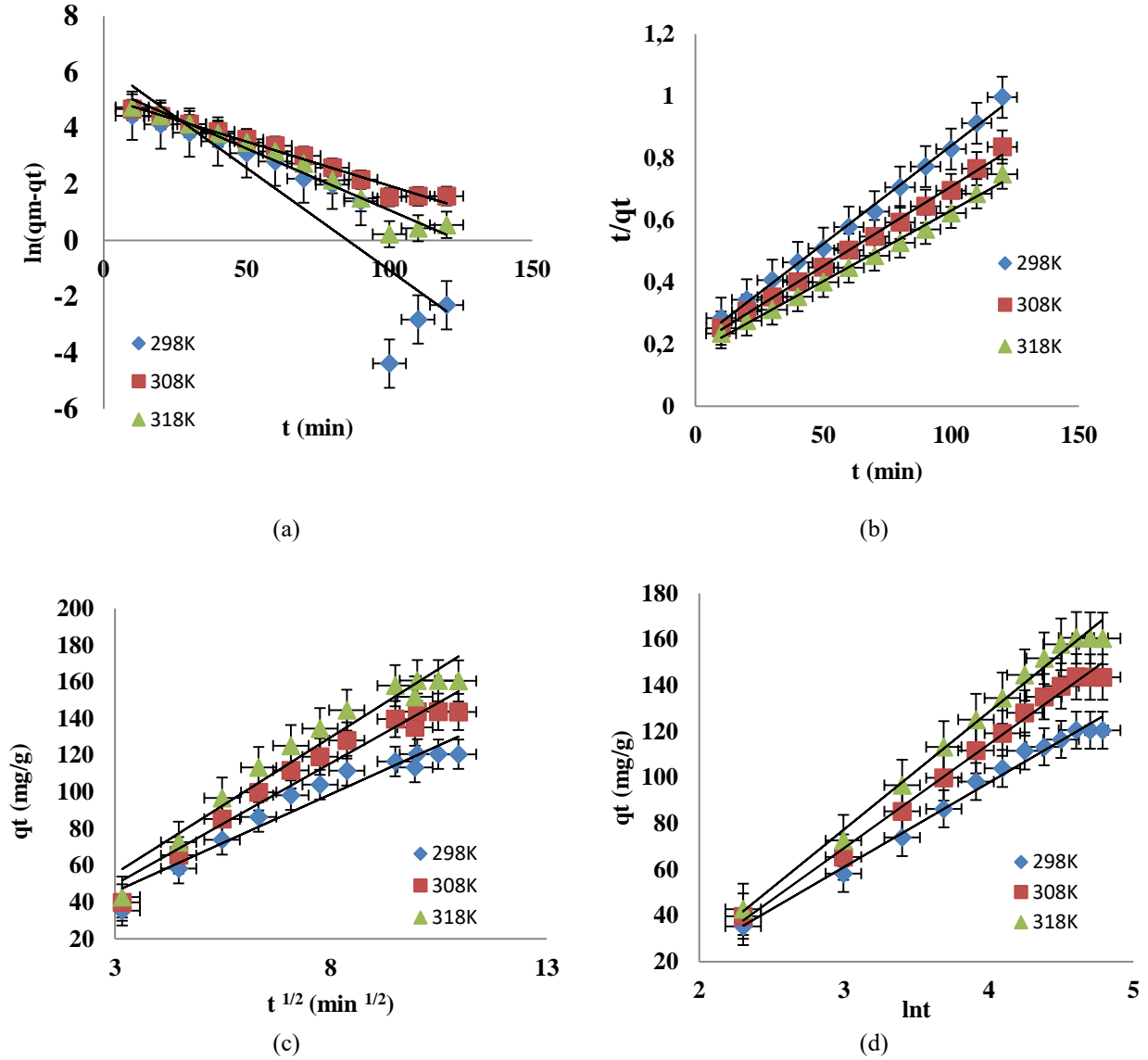
$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (4)$$

$$q_t = k_d t^{0.5} + C \quad (5)$$

Burada q_e ve q_t sırasıyla t zamanındaki denge adsorpsiyon kapasitesini ve adsorbe edilen iyonların miktarını gösterir. k_1 ve k_2 , PFO ve PSO adsorpsiyonunun hız sabitleridir ve α , ilk adsorpsiyon hızıdır. β yüzey kaplamasının adsorpsiyon sabiti, K_d reaksiyon hız sabiti ve C oluşan sınır tabakasının kalınlığına bağlı olarak elde edilen kesişme noktasıdır.

Modellerin lineer grafiklerinden hesaplanan kinetik değerler Şekil 3 ve Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablo 1'de gösterildiği gibi, q_e ve t 'nin değeri 298, 308 ve 318 K için tahmin edilebilir. Deneylerle tanımlanan değere yakın teorik adsorpsiyon kapasitesi ve nispeten yüksek R^2 değerleri, PSO modelinin MT tarafından Pb^{2+} iyon adsorpsiyonunun kinetiğini tatmin edici bir şekilde açıklar. Artan sıcaklık (298, 308, 318K) ile hesaplanan k_2 değerlerindeki artış, etkileşimlerin sıcaklığa bağımlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 1'de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça reaksiyon hızı sabitleri artar. Bu veriler lineerleştirilmiş Arrhenius Denklemi (Denklem 6) kullanılarak aktivasyon enerjisi (E_a) hesaplandı. MT kullanılarak Pb^{2+} iyonlarının uzaklaştırılmasında E_a değeri 18,41 $kJmol^{-1}$ olarak hesaplandı.



Şekil 3. MT üzerinde Pb²⁺ adsorpsiyonu için; (a) PFO (b) PSO (c) Weber-Morris (d) Elovich model grafikleri

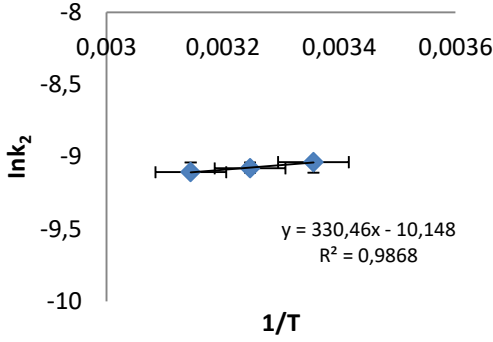
Tablo 1. Farklı sıcaklıklarda MT üzerinde Pb²⁺'nin adsorpsiyonu için kinetik sabitler

(K)	PFO				PSO				
	Doğru denklemleri	R ²	k ₁	q _m	Doğru denklemleri	R ²	k ₂	q _m	% giderim
298	y=-0.0731x + 6.2476	0.7794	0.0731	516.77	y=0.0063x + 0.2074	0.9960	0.00019	158.73	32.11
308	y=-0.0314x + 5.0942	0.9787	0.0314	163.07	y=0.0051x + 0.1951	0.9965	0.00013	196.07	39.56
318	y=-0.0439x + 5.4733	0.9541	0.0439	238.24	y=0.0046x + 0.1752	0.9946	0.00012	217.39	43.17
(K)	Weber- Morris				Elovich				
	Doğru denklemleri	R ²	K _d	C _b	Doğru denklemleri	R ²	β	α	
298	y=10.63x+13.764	0.9328	10.63	13.764	y=36.635x-48.79	0.9880	0.0272	9.71	
308	y=13.20x+10.08	0.9543	13.20	10.08	y=45.075x-65.942	0.9923	0.0221	10.48	
318	y=14.884x+10.786	0.9465	14.88	10.786	y=50.997x-75.616	0.9909	0.0196	11.58	

Zayıf kuvvetlerin aktif olduğu yerde, Ea 4.2 kJmol⁻¹'den küçüktür [35]. Bununla birlikte, aktive edilmiş proseslerde, 8.4 ile 83.7 kJmol⁻¹ arasındaki aktivasyon enerjisi (kimyasal soğurmada) kuvvetli kuvvetler tarafından sağlanır. Buna göre, bu çalışmada hesaplanan Ea değerleri, MT üzerindeki

Pb²⁺ iyonlarının uzaklaştırılmasının aktive edilmiş kemisorpsiyon olduğunu tanımlar.

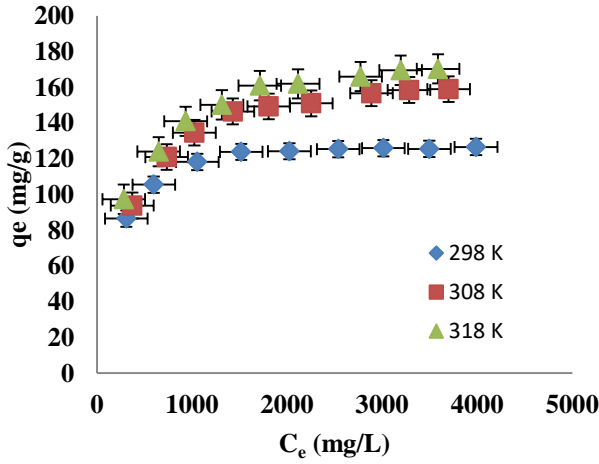
$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (6)$$



Şekil 4. Arrhenius eğrisi

3.4 İzoterm çalışmaları

Pb²⁺ iyon konsantrasyonunun adsorpsiyon üzerindeki etkisi, Şekil 5'te verilen sonuçlara göre araştırıldı. Pb²⁺ iyon konsantrasyonunun adsorpsiyon doygunluk sınırına kadar artmasıyla uzaklaştırma kapasitesi hızla arttı. Pb²⁺ iyon konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte, MT yüzeyinin doygunluğu nedeniyle uzaklaştırma hızı önce yavaşlamış ve dengeye ulaştıktan sonra sabit kalmıştır.



Şekil 5. MT kullanılarak adsorpsiyon üzerinde Pb²⁺ iyon konsantrasyonunun etkisi

Adsorpsiyon izotermi, adsorbat-adsorban etkileşiminin uygun bir tanımını sağlar. Ayrıca adsorpsiyon amaçları için temel bir değişken süreç planı sağlar. Toplu deneysel veriler, Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich ve Temkin izotermi olan dört doğrusal olmayan izoterm modeline uygulandı [36, 37].

Langmuir izotermi; Bir çözeltideki adsorbat partikülleri ile temas halinde olan katı yüzeydeki desorpsiyon-adsorpsiyon dengesine atıfta bulunur. . Bu modele göre, enerjik olarak benzer etki alanlarında homojen ve tek tabakalı adsorpsiyon varsayılmaktadır. Bu model Denklem 7 gibi ifade edilir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} \cdot K_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (7)$$

C_e, dengedeki metal iyon konsantrasyonu, q_e, denge adsorpsiyon kapasitesi, q_m maksimum adsorpsiyon kapasitesi, K_L adsorpsiyon sabitidir. K_L ve q_m değerleri, q_e ve C_e'nin doğrusal olmayan grafiklerinden elde edilir [36].

Freundlich izotermi; Adsorban yüzeyinin çok katmanlı adsorpsiyonunu ve heterojenliğini hesaba katan bu model Denklem 8'deki gibi ifade edilir.

$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (8)$$

Burada K_F ve n, sırasıyla çıkarma kapasitesini ve yoğunluğu temsil eden Freundlich sabitleridir. Bu sabitlerin değerleri, deneysel veri noktalarının doğrusal olmayan çizimlerinden elde edildi [36].

Dubinin-Radushkevich izotermi; Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasında ayırım yapmaya izin veren bu model, adsorpsiyonun hem homojen hem de heterojen yüzeylerde gerçekleşebileceğini belirtir. Bu model Denklem 9 ve 10'da açıklanmıştır.

$$\ln q_e = \ln q_{max} - K_{DR} \varepsilon^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e}\right) \quad (10)$$

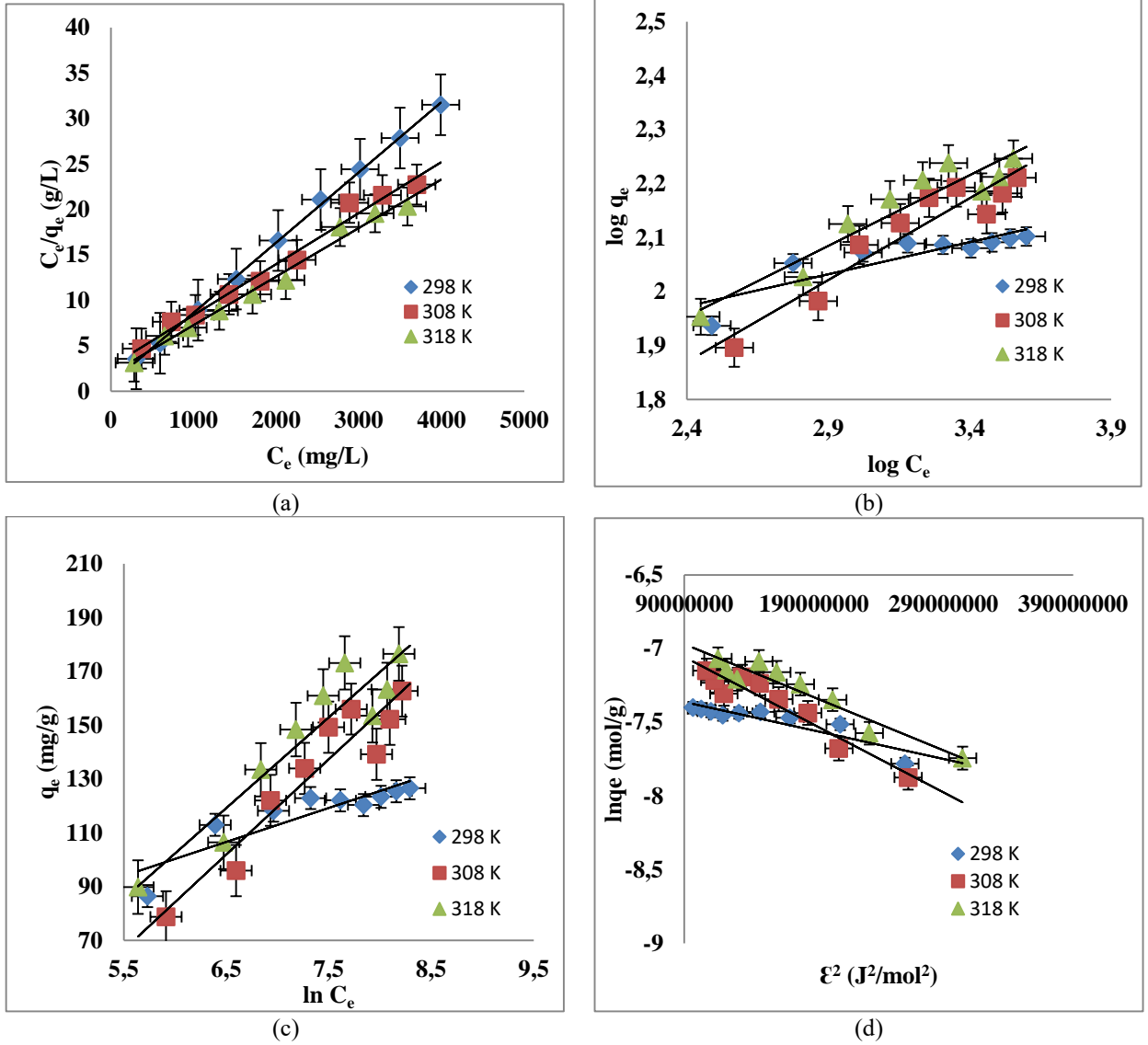
Bu denklemlerde ε Polanyi potansiyeli, K_{DR} ise ortalama adsorpsiyon enerjisi ile bağlantılı izoterm sabitidir.

Temkin izotermi; Bu modele göre adsorbat ve adsorbanın etkileşimi nedeniyle yüzey kaplamasının arttığı ve bunun sonucunda katmandaki moleküllerin adsorpsiyon ısısının lineer olarak azaldığı düşünülmektedir [37]. Bu özellikler, Denklem 11'de verilen matematiksel model ile temsil edilir.

$$q_e = \frac{RT}{b_T} + \ln(K_T C_e) \quad (11)$$

Burada b_T adsorpsiyon ısı, K_T dengeleme sabitidir. b_T ve K_T değerleri, q_e'ye karşı C_e çizilerek hesaplandı. Adsorpsiyon izoterm grafikleri Şekil 6'da ve adsorpsiyona bağlı değişkenler Tablo 2'de verilmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi, uzaklaştırma kapasitesinin (q_e) başlangıçta hızla arttığı ve daha sonra Pb²⁺ konsantrasyonundaki artışla yavaşladığı ve dengeye ulaştıktan sonra sabit kaldığı görülmektedir. Pb²⁺ iyonu için Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin izoterm modellerine uygun adsorpsiyon dengeleme verileri sırasıyla Şekil 6a, 6b, 6c ve 6d'de verilmiştir. Belirtilen izoterm modellerine göre hesaplanan değişkenler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde, R² bazında Langmuir modelinin Pb²⁺ iyonunun adsorpsiyonu için en iyi izoterm modeli olduğu görülmektedir. Bu modelin uygunluğu, işlemin kimyasal adsorpsiyonunu ve olası tersinmezliğini doğrular.



Şekil. 6. MT üzerinde Pb^{2+} iyonlarının adsorpsiyonunda, (a) Langmuir (b) Freundlich (c) Temkin (d) Dubinin-Radushkevich, izoterm grafikleri

Tablo 2. Farklı sıcaklıklarda MT üzerinde Pb^{2+} 'nın adsorpsiyonu için izoterm sabitler

	Constants	298 K	308 K	318 K
Langmuir	K_L (L/mg)	0.0085	0.0020	0.0028
	q_{max} (mg/g)	129.87	178.57	188.68
	% giderim	31.89	39.79	42.91
	R^2	0.9996	0.9997	0.9996
Freundlich	n	8.43	3.30	3.82
	K_f	48.78	13.85	21.17
	R^2	0.8505	0.9310	0.9587
Temkin	K_T (L/g)	6.82	0.03	0.05
	b_T (j/mol)	195.70	72.33	78.41
	R^2	0.8717	0.9607	0.9808
D-R	K_{D-R}	2.10^{-9}	5.10^{-9}	4.10^{-9}
	E (kj/mol)	15.81	10.00	11.18
	R^2	0.8985	0.9630	0.9833

Langmuir koşullarının geçerli olduğu varsayılarak, MT üzerindeki en yüksek Pb^{2+} uzaklaştırma kapasitesi sırasıyla 298, 308 ve 318 K'da 129,87, 178,57 ve 188,68 $mg\ g^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu, tek katmanlı bir kaplamayı ifade eder.

Bu özellik, MT'nin Pb^{2+} iyonları için iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu gösterir.

Adsorplanmış Pb^{2+} iyonları için bilimsel makalelerdeki benzer çalışmalar incelendiğinde elde edilen sonuçların

oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada bulunan adsorpsiyon kapasiteleri, Tablo 3'te verilen bilimsel makalelerdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. MT üzerindeki Pb²⁺ iyon adsorpsiyon kapasitesi, benzer adsorbanlar kullanılarak bulunan değerlere yakın veya daha iyi bulunmuştur. Bu, MT'nin adsorpsiyon işlemlerinde umut verici bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 3. Pb²⁺ uzaklaştırılmasında MT ile diğer adsorban maddelerin adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması

Adsorban	Adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)	Kaynak
Zeolite	20.72	[38]
Kireç taşı (Malezya)	263.13	[25]
Celtek kili	18.08	[39]
Kaolin (Bandırma)	31.75	[40]
Fe ³⁺ modifiye killi kireçtaşı	184.4	[41]
Demir kamışı kompozit	38.3	[42]
Polianilin-kitosan kompozit	16.07	[43]
Ham demirhindi tohumları	16	[44]
Ham Cassia fistül tohumları	13.22	[45]
Midyat taşı	129.87 (298K) 178.57 (308K) 188.68 (318K)	Bu çalışma

3.5 Termodinamik çalışmaları

MT tarafından Pb²⁺ iyonlarının uzaklaştırılması sırasında sıcaklığın etkisinin incelenmesi, uzaklaştırma işleminin temel termodinamik fonksiyonları olan Serbest enerji (ΔG), Entalpi (ΔH°) ve Entropi (ΔS°) parametrelerinin değerlendirilmesine yardımcı oldu. Serbest enerji değişim değerleri (ΔG°) Denklem 12 kullanılarak hesaplandı.

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ = -RT \ln K_e^0 \quad (12)$$

Burada K_e^0 dengeleme sabitidir ve Denklem 13 kullanılarak hesaplandı [46]. Bu denklem, en iyi izoterm modelinden elde edilen denge sabitini (K) boyutsuz bir termodinamik denge sabitine dönüştürür.

$$K_e^0 = \frac{(1000KM)[\text{Adsorbate}]^0}{\gamma} \quad (13)$$

Bu denklemde, $[\text{Adsorbat}]^0$ adsorbat standart konsantrasyonudur, M adsorbat molekül ağırlığıdır ve γ , adsorbat çözeltisi seyreltildiğinde üniter aktivite katsayısıdır.

Denklem 14'e göre, ΔS° ve ΔH° , $\ln K_e^0 - 1/T$ grafiğinin kesişiminden ve eğiminden elde edilebilir.

$$\ln K_e^0 = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (14)$$

Termodinamik değişkenler, tersinir süreçler olarak MT üzerinde Pb²⁺ adsorpsiyonu dikkate alınarak hesaplandı. Tablo 4'te verilen değerler incelendiğinde dağılım sabitinin ($\ln K_d$) sıcaklığa güçlü bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir. Sıcaklık arttıkça Pb²⁺ iyonu için uzaklaştırma kapasitesinin arttığı tespit edildi. Negatif ΔG° değerleri, MT

kullanılarak Pb²⁺ iyonunun uzaklaştırılmasının termodinamik olarak uygun ve doğal bir süreç olduğunu gösterir. Artan sıcaklıkla ΔG° 'deki azalma, Pb²⁺ iyonu uzaklaştırma kapasitesinin sıcaklıkla arttığını gösterir. ΔH° 'nin pozitif değeri (+16.63 kJ mol⁻¹), MT'de Pb²⁺'nin uzaklaştırılmasının endotermik bir süreç olduğunu gösterir.

Tablo 4. MT'de Pb²⁺ adsorpsiyonunun hesaplanan Gibbs serbest enerjisi, entalpi ve entropi değerleri

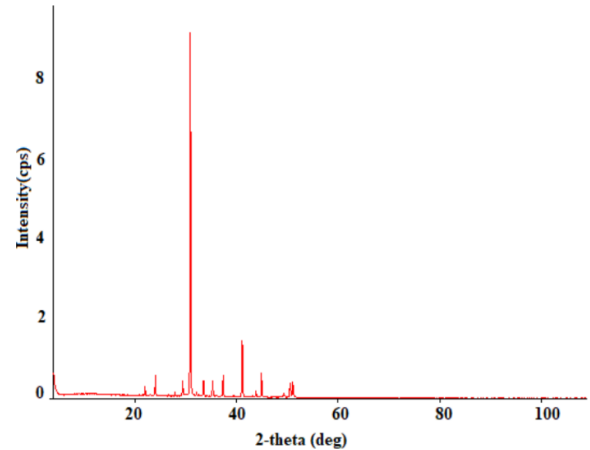
Metal	Temperature (K)	lnKd	ΔG° (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (J mol ⁻¹ K ⁻¹)
Pb ²⁺	298	7.868	-32.63	16.63	109.54
	308	8.107	-33.72		
	318	8.199	-34.82		

ΔS° 'nin pozitif değeri, sıvı/katı arayüzündeki serbestlik derecesinin çıkarma işlemi boyunca arttığını gösterir [47]. Pb²⁺ adsorpsiyonu sırasında, pozitif ΔS° (+109.54 J.mol⁻¹.K⁻¹) ile birlikte negatif ΔG° değerleri, adsorbat (MT) özelliklerinin sıvı-katı arayüzünde rastgeleliği arttırdığını gösterir. Bu durumda, uzaklaştırma işlemi boyunca adsorbat ve adsorbanda bazı yapısal değişikliklerle birlikte bir dissosiyatif mekanizma meydana gelebilir [48].

3.6 Adsorpsiyon öncesi ve sonrası malzemenin analizi

3.6.1 X-ışını kırınım analizi

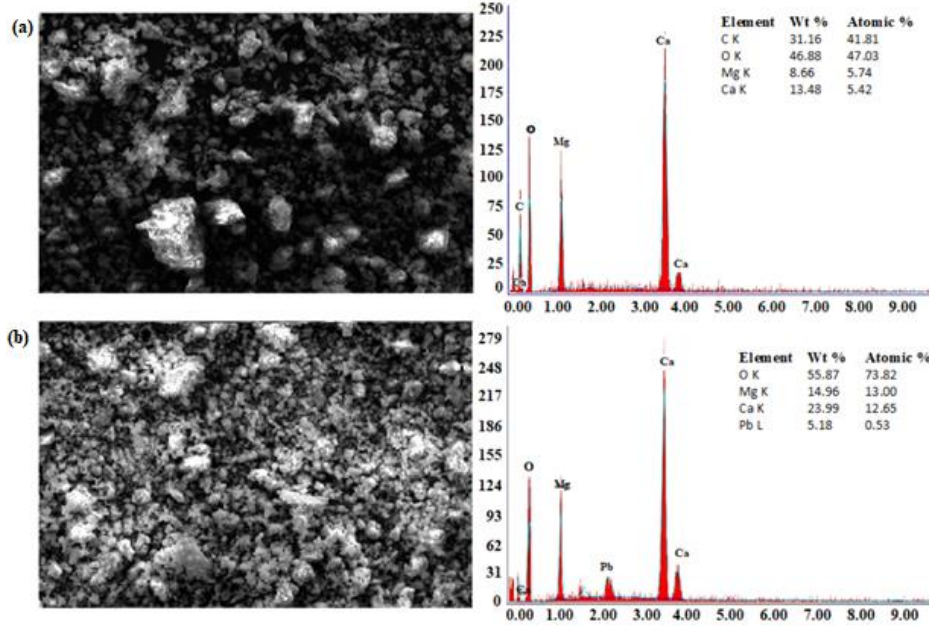
Adsorban malzemenin kristal yapısı, adsorpsiyon deneylerinden önce XRD ile analiz edilmiştir. MT'nin XRD modeli, malzemenin kristal yapısının karakteristik keskin ve dar tepe noktalarını gösterir (Şekil 7). Baskın çizgiler ($2\theta = 30,9^\circ$) dolomite (CaMg(CO₃)₂) atfedilir. SiO, SiO₂ ve MgO fazlarından dolayı küçük yoğunluk pikleri de gözlemlendi.



Şekil 7. MT'nin X-ışını kırınım grafiği

3.6.2 SEM/EDS ve yüzey alanı analizi

Uzaklaştırma işlemi sırasında, MT yüzeyindeki değişiklik, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. SEM mikrograflarına (Şekil 8a) bakıldığında, Midyat taşının çok çeşitli boyutlarda düzensiz ve köşeli şekillerde parçacıklar oluşturduğu görülmektedir. Tek noktali BET N₂ adsorpsiyon yöntemiyle Midyat taşının yüzey alanı 15.848 m²g⁻¹ olarak ölçülmüştür.



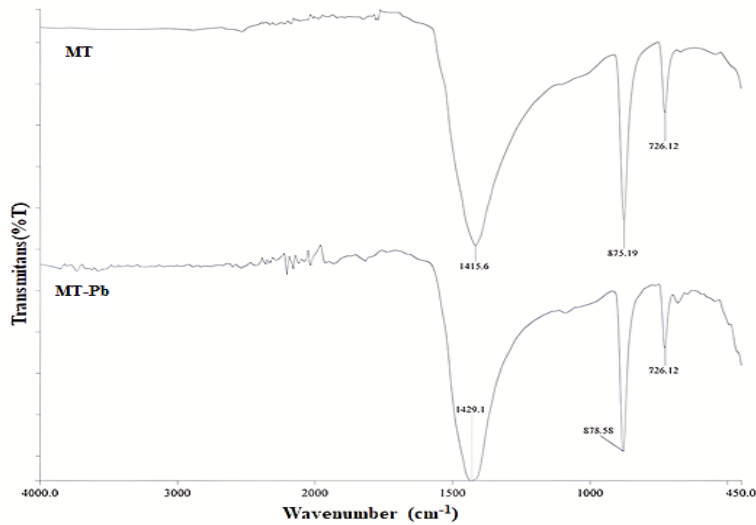
Şekil 8. MT'nin SEM ve EDS mikrografı: a) Adsorpsiyon öncesi b) Adsorpsiyon sonrası

Pb²⁺ iyonlarının adsorpsiyonundan sonraki görüntülerde (Şekil 8b), Midyat taşının yüzey özelliklerinin değişmesiyle büyük kristal yapılar üzerinde küçük kümelenmiş yapılar görülmektedir. Bu durum; Pb²⁺ adsorpsiyonu sırasında yüzeyde yeni kimyasal yapıların oluştuğunu açıklar. MT yüzeyinde meydana gelen bu olay, sulu çözeltilerden metal iyonlarının uzaklaştırılması sırasında bir çözünme-çökeltme mekanizmasının oluşması olarak ifade edilebilir [49]. Parçacıkların EDS analizi ile belirlenen MT'nin kimyasal bileşimi (Şekil 8a), yüksek miktarlarda Ca (%13.49), Mg (%8.66) ve O (%46.69) gösterir. Bu, MT'de kalsit ve dolomit varlığına bağlanmaktadır. Adsorpsiyondan sonra MT'nin kimyasal bileşiminde önemli değişiklik olduğu görülmektedir. Adsorpsiyon öncesine göre Ca oranının %23.99'a, Mg oranının %14.96'ya, O oranının ise %55.87'ye çıktığı ve adsorpsiyon öncesinde görülmeyen Pb

oranının ise adsorpsiyondan sonra %5,18 olduğu görülmektedir.

3.6.3 FTIR analizi

FTIR, MT yüzeyinde metal iyonlarının adsorbana bağlanmasına yardımcı olacak fonksiyonel grupları (amin, amid, hidroksil gibi) belirlemek için kullanıldı, yani potansiyel adsorpsiyon bölgeleri FTIR spektrumları daha önce kaydedildi ve Pb²⁺ çıkarıldıktan sonra (Şekil 9). 1415 cm⁻¹'de tanımlanan tepe, O-H titreşimleri olarak farklı fonksiyonel grupları ifade ederken, 875 cm⁻¹ ve 726 cm⁻¹'deki tepe -CH gerilmesini açıklar. Pb²⁺ iyonlarının adsorpsiyonu üzerine, bu fonksiyonel grupların tepe konumlarında hafif kaymalar gözlemlendi. Örneğin, 1415.6 cm⁻¹'de gözlemlenen pik, adsorpsiyondan sonra 1429.1 cm⁻¹'e kaymıştır.



Şekil 9. MT ve MT-Pb'nin FTIR spektrumları

3.7 Desorpsiyon çalışmaları

Malzemelerin yeniden kullanılabilirliği, ayırma prosesi ekonomisinin iyileştirilmesinde muhtemelen önemli bir faktör olacaktır. Büyük bir desorpsiyon potansiyeli, malzemenin yeni adsorpsiyon süreçlerinde yeniden kullanılabilmesi anlamına gelir. Adsorbandan kurşun desorpsiyonunu değerlendirmek için adsorban bilinen miktarda metal iyonu yüklenerek, ardından 150 mL Milli-Q su ile yıkanarak ve 24 saat boyunca 323 K'de bir fırında kurutularak gerçekleştirilmiştir. Bu süreden sonra materyaller, kurşun geri kazanımı için 0,1 mol/L HCl solüsyonuna (50 mL) batırıldı. Elde edilen değerler Tablo 5'te verilmiştir.

Asitli ortamda bile desorbe edilen kurşunun düşük yüzde değerleri gözlemlendi. Bu sonuç, MT tarafından güçlü kurşun adsorpsiyonunu gösterir, böylece sözde ikinci derece kinetik ve entalpiden elde edilen bulguları destekler. Desorpsiyon yüzdesi, MT'nin yeni adsorpsiyon fazları için olası bir yeniden kullanımı için tatmin edici olarak kabul edilmedi.

Table 5. Adsorpsiyon-Desorpsiyon Değerleri. (Başlangıç Konsantrasyonu; 3000 mg/L)

Material	Metal ion	% Adsorption	% Desorption
MT	Pb ²⁺	86.58	28.86

4 Sonuç

Bu çalışmada, sulu çözeltilerden Pb²⁺ iyonunun uzaklaştırılmasında adsorban olarak Midyat taşı kullanılmıştır. Herhangi bir kimyasal işleme tabi tutulmayan Midyat taşı, Pb²⁺ iyonu adsorpsiyonunda çok iyi bir adsorpsiyon performansı göstermiştir (129,87 (298 K), 178,57 (308 K), 188,68 (318 K) mg.g⁻¹). Midyat taşı ile Pb²⁺ iyonunun adsorpsiyonu için en yüksek uzaklaştırma kapasitesi, çözeltinin doğal pH (pH 4,23) ortamında gerçekleştirilmiştir. Denge çalışması, sistemin Langmuir izoterm modelini diğer modellerden daha iyi takip ettiğini gösterdi. Kinetik çalışmalar, Pb²⁺ iyonunun çıkarılmasının Yalancı İkinci Derece denklemine uyduğunu göstermiştir. Hesaplanan termodinamik değişkenler, uzaklaştırma işleminin fizibilitesini ve doğal yapısını gösterdi. Entropi değişikliğinin pozitif değeri, Pb²⁺ için katı-çözelti arayüzünde iyileştirilmiş rastgelelik gösterdi. SEM/EDS, FT-IR analizi Midyat taşının adsorpsiyondan önce ve sonra belirgin bir farklılık gösterdiğini doğruladı. Bu morfolojik ve yapısal değişiklikler, sedimentasyon reaksiyonu ile bağlantılı adsorpsiyonun, sulu çözeltilerden Pb²⁺ uzaklaştırma mekanizmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, MT'nin önemli adsorpsiyon kapasitesinin yanı sıra düşük maliyeti ve bolluğu nedeniyle sulu çözeltilerden Pb²⁺'yi uzaklaştırmak için etkili bir madde olduğu sonucuna varılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] I. Acosta-Rodríguez, A. Rodríguez-Pérez, N. C. Pacheco-Castillo, E. Enríquez-Domínguez, J. F. Cárdenas-González and V. M. Martínez-Juárez, Removal of Cobalt (II) from Waters Contaminated by the Biomass of Eichhornia crassipes. *Water*, 13(13), 1725, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13131725>.
- [2] S. Babel and T. A. Kurniawan, Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of hazardous materials*, 97(1-3), 219-243, 2003.
- [3] S. Pandey and J. Ramontja, Natural bentonite clay and its composites for dye removal: current state and future potential. *American Journal of Chemistry and Applications*, 3(2), 8-19, 2016.
- [4] C. L. Văcar, E. Covaci, S. Chakraborty, B. Li, D. C. Weindorf, T. Frențiu and D. Podar, Heavy metal-resistant filamentous fungi as potential mercury bioremediators. *Journal of Fungi*, 7(5), 386, 2021. <https://doi.org/10.3390/jof7050386>.
- [5] V. Prabhu, S. Lee and H. L. Clack, Electrostatic precipitation of powdered activated carbon and implications for secondary mercury adsorption within electrostatic precipitators. *Energy & Fuels*, 25(3), 1010-1016, 2011.
- [6] R. V. Hemavathy, A. Saravanan, P. S. Kumar, D. V. N. Vo, S. Karishma, and S. Jeevanantham, Adsorptive removal of Pb (II) ions onto surface modified adsorbents derived from Cassia fistula seeds: Optimization and modelling study. *Chemosphere*, 283, 131276, 2021.
- [7] P. Ozpinar, C. Dogan, H. Demiral, U. Morali, S. Erol, C. Samdan, D. Yildiz, and I. Demiral, 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.
- [8] S. Erol, Process Model Development of Lithium-ion Batteries—An Electrochemical Impedance Spectroscopy Simulation. *Sakarya University Journal of Science*, 24(6), 1191-1197, 2020.
- [9] Y. Koç, U. Morali, S. Erol, and H. Avci, Investigation of electrochemical behavior of potassium ferricyanide/ferrocyanide redox probes on screen printed carbon electrode through cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy. *Turkish Journal of Chemistry*, 45(6), 1895-1915, 2021.
- [10] A. Saravanan, P. S. Kumar, P. R. Yaashikaa, S. Karishma, S. Jeevanantham, and S. Swetha, Mixed biosorbent of agro waste and bacterial biomass for the separation of Pb (II) ions from water system. *Chemosphere*, 277, 130236, 2021.
- [11] S. N. H. Azmi, M. Al-Balushi, F. Al-Siyabi, N. Al-Hinai, and S. Khurshid, Adsorptive removal of Pb (II) ions from groundwater samples in Oman using carbonized Phoenix dactylifera seed (Date stone).

- Journal of King Saud University-Science*, 32(7), 2931-2938, 2020.
- [12] A. B. Rakhym, G. A. Seilkhanova and T. S. Kurmanbayeva, Adsorption of lead (II) ions from water solutions with natural zeolite and chamotte clay. *Materials Today: Proceedings*, 31, 482-485, 2020.
- [13] S. Kaushal, N. Kaur, M. Kaur and P. P. Singh, Dual-Responsive Pectin/Graphene Oxide (Pc/GO) nanocomposite as an efficient adsorbent for Cr (III) ions and photocatalyst for degradation of organic dyes in waste water. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 403, 112841, 2020.
- [14] Y. Altunkaynak, Effectively removing Cu (II) and Ni (II) ions from aqueous solutions using chemically non-processed Midyat stone: equivalent, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 1-14, 2022.
- [15] A. Benhamou, M. Baudu, Z. Derriche and J. P. Basly, Aqueous heavy metals removal on amine-functionalized Si-MCM-41 and Si-MCM-48. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 1001-1008, 2009.
- [16] M. E. Malool, M. KeshavarzMoraveji and J. Shayegan, Hydrothermal carbonization of digested sewage sludge coupled with Alkali activation: Integrated approach for sludge handling, optimized production, characterization and Pb (II) adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 104203, 2022.
- [17] C. Ren, X. Ding, W. Li, H. Wu and H. Yang, Highly efficient adsorption of heavy metals onto novel magnetic porous composites modified with amino groups. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 62(6), 1865-1875, 2017.
- [18] S. Kaushal, S. K. Mittal and P. Singh, Developments in Synthesis, Characterization and Applications of Composite Ion-exchange Materials: A Review. *Oriental Journal of Chemistry*, 33(4), 1726, 2017.
- [19] Y. Altunkaynak, M. Canpolat and Ö. Yavuz, Adsorption of cobalt (II) ions from aqueous solution using orange peel waste: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 1-12, 2021.
- [20] S. Bhardwaj and T. Sarkar, Core-shell type magnetic Ni/NiO nanoparticles as recyclable adsorbent for Pb (II) and Cd (II) ions: One-pot synthesis, adsorption performance, and mechanism. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 113, 223-230, 2020.
- [21] J. M. Zachara, C. E. Cowan and C. T. Resch, Sorption of divalent metals on calcite. *Geochimica et cosmochimica acta*, 55(6), 1549-1562, 1991. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90127-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90127-Q).
- [22] J. A. Davis, C. C. Fuller and A. D. Cook, A model for trace metal sorption processes at the calcite surface: Adsorption of Cd²⁺ and subsequent solid solution formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6), 1477-1490, 1987. <https://doi.org/10.1016/0016->
- [23] A. Rana, P. Kalla, H. K. Verma and J. K. Mohnot, Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. *Journal of cleaner production*, 135, 312-331, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.126>.
- [24] V. V. D. S. Guillarduci, J. P. D. Mesquita, P. B. Martelli and H. D. F. Gorgulho, Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio alcalino. *Química nova*, 29, 1226-1232, 2006.
- [25] H. B. Aziz, M. N. Adlan, and K. S. Ariffin, Heavy metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Cu and Cr (III)) removal from water in Malaysia: post treatment by high quality limestone. *Bioresource technology*, 99(6), 1578-1583, 2008.
- [26] A. Sdiri, T. Higashi, F. Jamoussi, and S. Bouaziz, Effects of impurities on the removal of heavy metals by natural limestones in aqueous systems. *Journal of Environmental management*, 93(1), 245-253, 2012.
- [27] S. Ilhan, A. Cabuk, C. Filik and F. Caliskan, Effect of pretreatment on biosorption of heavy metals by fungal biomass. *Trakya Univ J Sci*, 5(1), 11-17, 2004.
- [28] Z. Aksu and İ. A. İsoğlu, Removal of copper (II) ions from aqueous solution by biosorption onto agricultural waste sugar beet pulp. *Process biochemistry*, 40(9), 3031-3044, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.02.004>
- [29] I. Kara, D. Tunc, F. Sayin and S. T. Akar, Study on the performance of metakaolin based geopolymer for Mn (II) and Co (II) removal. *Applied clay science*, 161, 184-193, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.027>.
- [30] I. A. Mohammed, A. H. Jawad, A. S. Abdulhameed and M. S. Mastuli, Physicochemical modification of chitosan with fly ash and tripolyphosphate for removal of reactive red 120 dye: statistical optimization and mechanism study. *International journal of biological macromolecules*, 161, 503-513, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.069>.
- [31] N. J. Vickers, Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?. *Current biology*, 27(14), R713-R715, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.064>.
- [32] Y. A. Neolaka, Y. Lawa, J. N. Naat, A. A. Riwu, M. Iqbal, H. Darmokoesoemo and H. S. Kusuma, The adsorption of Cr (VI) from water samples using graphene oxide-magnetic (GO-Fe₃O₄) synthesized from natural cellulose-based graphite (kusambi wood or *Schleichera oleosa*): Study of kinetics, isotherms and thermodynamics. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6544-6556, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.040>.
- [33] Y. A. Neolaka, Y. Lawa, J. N. Naat, A. A. P. Riwu, H. Darmokoesoemo, G. Supriyanto and H. S. Kusuma, A Cr (VI)-imprinted-poly (4-VP-co-EGDMA) sorbent prepared using precipitation polymerization and its application for selective adsorptive removal and solid phase extraction of Cr (VI) ions from electroplating industrial wastewater. *Reactive and Functional Polymers*, 147, 104451, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2019.104451>.
- [34] M. R. Abukhadra, F. M. Dardir, M. Shaban, E. A. Ahmed, and M. F. Soliman, Superior removal of Co²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ contaminants from water utilizing spongy Ni/Fe carbonate-fluorapatite; preparation,


- application and mechanism. *Ecotoxicology and environmental safety*, 157, 358-368, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.085>.
- [35] M. Kragović, A. Daković, M. Marković, J. Krstić, G. D. Gatta, and N. Rotiroti, Characterization of lead sorption by the natural and Fe (III)-modified zeolite. *Applied Surface Science*, 283, 764-774, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.016>.
- [36] Y. Man, B. Wang, J. Wang, M. Slaný, H. Yan, P. Li and X. Feng, Use of biochar to reduce mercury accumulation in *Oryza sativa* L: A trial for sustainable management of historically polluted farmlands. *Environment International*, 153, 106527, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106527>.
- [37] M. Khajeh, S. Laurent and K. Dastafkan, Nanoadsorbents: classification, preparation, and applications (with emphasis on aqueous media). *Chemical reviews*, 113(10), 7728-7768, 2013. <https://doi.org/10.1021/cr400086v>.
- [38] D. A. Sruamsiri, and M. Ogawa, Adsorption of Pb²⁺ on a layered alkali titanate from water. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 950(1), 012040, 2022.
- [39] A. Sari, M. Tuzen, and M. Soylak, Adsorption of Pb (II) and Cr (III) from aqueous solution on Celtek clay. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1-2), 41-46, 2007.
- [40] A. Sari, M. Tuzen, D. Citak, and M. Soylak, Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of adsorption of Pb (II) from aqueous solution onto Turkish kaolinite clay. *Journal of hazardous materials*, 149(2), 283-291, 2007.
- [41] S. He, Y. Li, L. Weng, J. Wang, J. He, Y. Liu and Z. Zhang, Competitive adsorption of Cd²⁺, Pb²⁺ and Ni²⁺ onto Fe³⁺-modified argillaceous limestone: Influence of pH, ionic strength and natural organic matters. *Science of the Total Environment*, 637, 69-78, 2018.
- [42] S. Zhu, S. H. Ho, X. Huang, D. Wang, F. Yang, L. Wang and F. Ma, Magnetic nanoscale zerovalent iron assisted biochar: interfacial chemical behaviors and heavy metals remediation performance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 9673-9682, 2017. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00542>.
- [43] R. Karthik and S. Meenakshi, Removal of Pb (II) and Cd (II) ions from aqueous solution using polyaniline grafted chitosan. *Chemical Engineering Journal*, 263, 168-177, 2015.
- [44] R. Jayasree, P. S. Kumar, A. Saravanan, R. V. Hemavathy, P. R. Yaashikaa, P. Arthi and K. C. Choi, Sequestration of toxic Pb (II) ions using ultrasonic modified agro waste: Adsorption mechanism and modelling study. *Chemosphere*, 285, 131502, 2021.
- [45] R. V. Hemavathy, A. Saravanan, P. S. Kumar, D. V. N. Vo, S. Karishma and S. Jeevanantham, Adsorptive removal of Pb (II) ions onto surface modified adsorbents derived from *Cassia fistula* seeds: Optimization and modelling study. *Chemosphere*, 283, 131276, 2021.
- [46] E. C. Lima, A. Hosseini-Bandegharai, J. C. Moreno-Piraján and I. Anastopoulos, A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoof equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. *Journal of Molecular Liquids*, 273, 425-434, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048>.
- [47] V. K. Gupta, Equilibrium uptake, sorption dynamics, process development, and column operations for the removal of copper and nickel from aqueous solution and wastewater using activated slag, a low-cost adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37(1), 192-2, 1998. <https://doi.org/10.1021/ie9703898>.
- [48] K. G. Akpomie, F. A. Dawodu and K. O. Adebowale, Mechanism on the sorption of heavy metals from binary-solution by a low cost montmorillonite and its desorption potential. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 757-767, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.025>.
- [49] G. De Angelis, L. Medeghini, A. M. Conte and S. Mignardi, Recycling of eggshell waste into low-cost adsorbent for Ni removal from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1497-1506, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.085>.





KBH₄ hidrolizinde ince film nikel katalizörünü kullanarak hidrojen üretimi ve proses optimizasyonu

Hydrogen production and process optimization using thin film nickel catalyst in KBH₄ hydrolysis

Meryem Sena Akkuş^{1,*} 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, Türkiye

Öz

Bu çalışmada nikel, magnetron saçtırma işlemi ile lam üzerine ince bir film olarak kaplanmış ve alkali potasyum borhidrür hidrolizinde katalizör olarak kullanılmıştır. Ayrıca ortam sıcaklığı, katalizör miktarı, % KBH₄ oranı, HCl hacmi ve % NaOH oranı gibi parametrelerin potasyum borhidrür çözeltisinin katalitik hidrolizinde hidrojen üretimi hızına olan etkileri de yanıt yüzey metodu ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Proses optimizasyonu merkezi kompozit dizaynı kullanılarak yapılmış ve parametrelerin etkinliği varyans analizi ile belirlenmiştir. Oluşturulan model sonucunda, maksimum HGR değeri için optimum parametreler; ortam sıcaklığı 55 °C; %13 oranında KBH₄; %0.6 oranında NaOH; 9 mL 0.5 M HCl olarak belirlenmiştir. Maksimum hidrojen üretim hızı 92.8 L/dk. g olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Potasyum borhidrür, Hidroliz, Hidrojen üretimi, Nikel, Magnetron saçtırma

1 Giriş

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve bu kaynakların enerji üretimi için kullanımı sırasında açığa çıkan çevre sorunlarının olumsuz etkilerinin artmasından dolayı sürdürülebilir, çevre dostu enerji kaynakları ve teknolojilerine yönelik araştırmalar yoğunlaşmıştır [1]. Fosil yakıtlara en iyi alternatif olarak, çevre dostu olması, yüksek enerji yoğunluğu ve enerji üretiminde kullanıldığında yüksek verim sağlaması gibi avantajlarından dolayı hidrojen (H₂) ön plana çıkmaktadır. Bu yüzden, hidrojen geleceğin yakıtı olarak görülmekte ve enerji sistemleri hidrojene dayalı olarak tasarlanmaktadır [2, 3]. Ayrıca hidrojen, fosil yakıtların gazifikasyonundan, biyokütle pirolizi veya fermantatif mikroorganizmaların kullanıldığı proseslerden, suyun elektrolizi ya da fotoelektrokimyasal yöntemi gibi farklı kaynak ve proseslerden üretilebilmektedir [4-7]. Hidrojen kullanımının yaygınlaşmasındaki en büyük engel, hidrojenin depolanması ve kontrollü salınımıdır.

Kontrollü hidrojen üretimi üzerine yapılan araştırmalar sonucunda, inorganik bor hidrürlerin, özellikle amonyak boran (NH₃BH₃), lityum borohidrür (LiBH₄), sodyum borhidrür (NaBH₄), potasyum borhidrür (KBH₄, PBH₄), gibi bileşiklerin hidrolizi ile hidrojen üretiminin verimli, güvenilir ve nispeten düşük maliyetli olduğu görülmüştür. ABD Enerji Bakanlığı tarafından önerilen hidrojen

Abstract

In this study, nickel was coated as a thin film on the slide by magnetron sputtering and used as a catalyst for alkali potassium borohydride hydrolysis. The effects of parameters such as ambient temperature, catalyst amount, wt% KBH₄ ratio, volume of HCl and wt% NaOH ratio rate on the hydrogen production rate in the catalytic hydrolysis of potassium borohydride solution were investigated in detail by response surface method. Process optimization was done using central composite design and the efficiency of the parameters was determined by analysis of variance. As a result of the model created, the optimum parameters for the maximum HGR value; ambient temperature 55 °C; 13% KBH₄; 0.6% NaOH; Determined as 9 mL of 0.5 M HCl. The maximum hydrogen generation rate was calculated as 92.8 L/min g.

Keywords: Potassium borohydride, Hydrolysis, Hydrogen production, Nickel, Magnetron sputtering

depolama kapasitesi için minimum değer ağırlıkça %6.5'tir [8, 9]. NaBH₄ ağırlıkça %10.8 hidrojen içeriğine sahip iken PBH₄'nin ise ağırlıkça %8.9 hidrojen içermektedir. Metal borhidrür bileşiklerinden hidrojen depolama kapasitesinin su miktarına bağlı olduğuna dikkat etmek önemlidir [10]. Ancak, metal bor hidrür bileşiklerinin hidrolizinin reaksiyon kinetiğini hızlandırmak için uygun katalizör kullanılması koşuluyla yüksek saflıkta ve verimli bir şekilde hidrojen üretmek mümkündür (Denklem (1)) [11].



Denklem 1'de verilen denklemden de görüldüğü üzere üretilen hidrojenin 2 molü metal borhidrürden (MeBH₄) geriye kalan 2 molü ise sudan karşılanmaktadır [12, 13]. Metal borhidrür çözeltilerinin raf ömrünü uzatmak ve bekletildiğinde açığa çıkan hidrojeni önlemek amacıyla çözelti içerisine sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) gibi bazik çözeltiler eklenerek alkali çözeltileri şeklinde depolanabilmektedir [14, 15].

Literatürde birçok katalizör hazırlama yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden magnetron saçtırma tekniği ile istenen yüzeye düşük yükleme miktarlarıyla, nano boyutta, homojen bir ince film oluşturulması sağlanmaktadır. Uygulanan basınç ve süreye göre

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: msakkus@aybu.edu.tr (M. S. Akkuş)

Geliş / Received: 12.07.2022 Kabul / Accepted: 23.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1143291

kaplamanın kalınlığı değişmektedir [16, 17]. Literatürde bu yöntemle hazırlanan bir katalizörün PBH katalitik hidroliz sistemi alanında kullanımı hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

KBH_4 'ün katalitik hidroliz çalışmalarından bazıları aşağıda verilmiştir. Genel olarak çalışmalarda öncelikle katalizör sentezi sonra karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmalarda KBH_4 hidroliz reaksiyonuna etki eden ortam sıcaklığı, katalizör miktarı, baz derişimi ve KBH_4 derişimi faktörlerin etkisi de incelenmiştir. Kılınc vd. yaptıkları çalışmada, hidrojen üretimi için potasyum borhidrür hidrolizinde kullanılmak üzere 5-Amino-2,4-diklorofenol-3,5-ditertbutilsalisilaldimin -Pd kompleksi sentezlenmiştir. Sentezlenen Palladyum kompleksi katalizörünün PBH hidrolizindeki aktivasyon enerjisi 25.194kJ/mol olarak bulunmuştur [14]. Başka bir çalışmada KBH_4 hidroliz reaksiyonunda Co-Schiff Base kompleksini katalizör olarak kullanılmıştır. KBH_4 hidroliz reaksiyonunun başlangıç hızları 30 °C'de 61220 mL/dk. g iken 50 °C'de ise 99746 mL/dk. g olarak hesaplamışlardır [15]. TiO_2 destekli Ni-Mo-Ru-B katalizörünün PBH çözeltisinin hidrolizindeki çalışmasında denenmiştir. Optimum metal/ TiO_2 oranı %10 olarak belirlenmiş ve hidrojen üretim hızı 30 °C'de 2410 mL/dk. g olarak hesaplanmıştır [18]. Saka ve Balbay'ın yaptıkları çalışmada PBH'nin etanoliz ve hidroliz reaksiyonlarından hidrojen üretimini incelemişlerdir. 1 M fosforik asit ile etanoliz ve hidroliz reaksiyonlarında maksimum hidrojen üretim hızları sırasıyla 6423 ve 4296 mL/dk. g olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda, 1 M asit konsantrasyonu ile etanoliz ve hidroliz reaksiyonları sırasıyla 7 ve 9 s içinde tamamlandığını tespit edilmiştir [19]. Onat vd. potasyum borhidrür hidrolizinde kullanılmak üzere kobalt ve kromdan oluşan bimetalik nano katalizörün katalitik performansını incelemişlerdir. 30 °C'de, 25 mg katalizör, %10 KOH ve %2 KBH_4 derişiminde hidroliz deneyi gerçekleştirildiğinde maksimum HGR değerine ulaşılmış ve 2448 mL/dk. g olarak hesaplanmıştır [20]. Sahin ve Kılınc'ın yaptıkları çalışmada Ru- Imine kompleks katalizörünü sentezleyip, PBH hidroliz reaksiyonunda kullanmışlardır. Sentezlenen Ru- Imine kompleks katalizörünün kullanıldığı PBH hidrolizinde hidrojen üretim hızları 30 °C ve 50 °C'de sırasıyla 45466 mL/ dk. g ve 76815 mL/ dk. g olarak hesaplanmıştır [21].

Yapılan bu çalışmada magnetron saçırma yöntemiyle hazırlanan ince film nikel katalizörü nün PBH'ın hidrolizindeki etkinliği incelenmiştir. Ayrıca sisteme uygun deney tasarım modeli kullanılarak yapılan çalışmanın kısa zamanda minimum maliyette güvenilir sonuç elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada, ince film nikel katalizörü ile hidrojen üretimini maksimize etmek amacıyla yanıt yüzey metodu kullanılarak sıcaklık, katalizör miktarı, kütlece % PBH miktarı, kütlece % NaOH miktarı ve HCl hacmi gibi parametrelerinin hidrojen üretim hızı (HGR) üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar merkezi kompozit deneysel tasarım modeli kullanılarak planlanmıştır. Bağımsız parametrelerin eş zamanlı olarak bireysel etkinliği ve birbiri ile ikili etkileşimlerinin varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Son olarak, bu tasarlanan deney sistemin

maksimum HGR değeri için optimum koşullar belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Katalizör hazırlığı

Katalitik hidroliz deneylerinde katalizör seçimi ve tasarımı oldukça önemlidir. Bu çalışmada uygun maliyetli ve katalitik olarak aktif olan nikel malzemesi seçilmiştir. PBH deneylerinde daha önce magnetron saçırma yöntemiyle hazırlanan ince film katalizörüyle deney yapılmadığı tespit edilmiştir. Alt tabaka olarak istenen ebatlarda kesimi ve kaplanması kolay olan mikroskop lamı seçilmiştir. Başarılı bir kaplama yapılabilmesi için öncelikle kaplanacak yüzeyin temiz olması gerekmektedir. Aksi takdirde yüzeydeki kir, yüzeyde homojen film oluşmasını engellemektedir. Lamları temizlemek için aşağıdaki adımlar izlenmiştir. Sırasıyla aseton (Isolab, %99.5 saflık), izopropil alkol (Isolab, %99.5 saflık) ve etanol (Sigma - Aldrich, %99.5 saflık) içerisinde 50 °C'de 10 dakika ultrasonik banyoda tutuldu. Sonra lamlar deiyonize su ile yıkayıp, 80 °C'de etüvde kurutuldu. Temizleme işleminden sonra lamlar 1 cm x 2.5 cm boyutlarında kesildi.

Kaplama için kullanılan nikel target %99.99 saflıkta, boyutları 2" çapında ve 0.125" kalınlığında olup Nanografi markadır. Magnetron saçırma çalışma koşulları; Rf modda saçırma gücü 150 W'da 0.01 mbar argon basıncı altında 1.5 saat kaplama yapılmıştır.

2.2 Hidrojen üretim deneyleri

Hidroliz reaksiyonunda kullanılan malzemeler KBH_4 (Sigma-Aldrich, %99 saflık), NaOH (Isolab, %99 saflık) ve HCl (Merck, %37 saflık) kullanılmıştır. Suyun gerektiği her kısımda saf su kullanılmıştır.

Deney sisteminde kesikli reaktör kullanılmıştır. Reaktörün her kısmında sıcaklığın aynı olması için su banyosunda reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Katalizör ağırlığında, kaplanmış nikel ve lam kesitinin ağırlığının toplamı olarak dikkate alınmıştır. PBH reaktöre çözelti halinde beslendiği için deneye başlamadan önce planlanan miktarda NaOH çözeltisinde PBH eklenerek besleme çözeltisi hazırlanmıştır.

Hidroliz deney planı şöyledir; deneysel planda belirlenen miktarda katalizör üç boyunlu 200 mL hacimli cam reaktöre yerleştirilmiştir. Reaktörün bir boynundan 2 mL alkali PBH çözeltisi beslemesi, ikinci boynundan HCl çözeltisi beslenirken, üçüncü boynundan çıkan hidrojeni ölçmek için gaz bürete bağlanmıştır. Üretilen hidrojenin hacmi, zamanın bir fonksiyonu olarak gaz büretindeki su hacminin değişim yöntemi ile belirlenmiştir.

2.3 Deney tasarımı

Yapılan çalışmada, deney planının hazırlanmasında ve ANOVA yapmak için Minitab 19 programından faydalanılmıştır. Deney planında maksimum HGR optimizasyonu gerçekleştirmek için merkezi kompozit deneysel tasarım modeli kullanılmıştır. Çalışmada bağımsız parametre olarak sıcaklık (25-55 °C), katalizör miktarı (0.5-1.40 g), kütlece % PBH miktarı (2.5-13), kütlece % NaOH miktarı (0.5-6.5) ve 0.5 M HCl çözeltisinden eklenen hacim

(0-9 mL) olarak seçilmiştir. Seçilen parametrelerden HCl eklenmesinin sebebi katalizör aktivasyon- deaktivasyonuna ve hidroliz reaksiyon hızına etkisi incelenmiştir.

Yanıt olarak her bir deney için HGR değeri hesaplanmıştır. HGR değeri, üretilen hidrojen hacminin zamana karşı grafiğin eğimi kullanarak Denklem (2)'ye göre hesaplanmıştır [22].

$$HGR = \frac{V (mL)}{t (dk). m (g)} \quad (2)$$

Burada HGR hidrojen üretim hızı (mL dk⁻¹ g⁻¹), V üretilen hidrojen hacmi (mL), t zaman (dk) ve m katalizörün ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Eş zamanlı olarak seçilen bağımsız değişkenlerin bireysel ve ikili etkileşimlerinin HGR'ye etkilerini belirlemek için ANOVA tekniği kullanılmıştır. Bu tekniğe göre F değeri ne kadar yüksekse yanıt olan HGR üzerine etkisi o kadar çok demektir.

2.4 Katalizörün karakterizasyonu

Hazırlanan ince film katalizörün yüzey morfolojisini ve yapısını, taramalı elektron mikroskobu (Hitachi, yüksek vakumlu FE-SEM SU5000) kullanılarak değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Hidroliz deney planı ve hidrojen üretim hızları

Merkezi kompozit modeline göre hazırlanan deney planı ve bu deneylerdeki HGR değeri **Tablo 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney planı ve HGR değerleri

Deney no	Sıcaklık (°C)	Katalizör g	% KBH ₄	% NaOH	0,5 M HCl	HGR
1	40	0.5	6	3.5	3	29000
2	40	1	13	3.5	3	46537
3	55	0.66	2.5	2	0	280
4	40	1	6	3.5	3	32647
5	25	0.66	2.5	2	6	40000
6	25	0.75	2.5	5	0	45
7	40	1	6	0.5	3	35207
8	25	1.16	2.5	2	0	62
9	40	1	6	6.5	3	15000
10	25	0.75	10	5	6	32150
11	25	1.25	10	2	6	27748
12	40	1	6	3.5	3	32647
13	25	1.28	2.5	5	6	27195
14	55	1.25	10	2	0	39567
15	40	1	6	3.5	9	55423
16	40	1.4	6	3.5	3	40961
17	40	1	6	3.5	3	32647
18	55	0.66	2.5	2	6	40000
19	40	1	6	3.5	3	32647
20	25	1.25	10	5	0	85
21	55	0.75	10	2	6	67005
22	25	1	10	2	0	70
23	55	0.75	10	5	0	125
24	40	1	6	3.5	3	32647
25	55	1.25	2.5	5	0	308
26	55	1.25	10	5	5.8	37283
27	55	0.75	2.5	5	6	27850
28	40	1	6	3.5	3	32647

3.2 Bağımsız değişkenlerin varyans ve ANOVA analizleri

Bu çalışmada PBH'nin hidrolizi için nikel katalizörünün kullanıldığı deney düzeneğinin optimizasyonunda; sıcaklık, katalizör miktarı, kütlece % PBH miktarı, kütlece % NaOH miktarı ve 0.5 M HCl eklenen hacmi dikkate alınarak yapılmıştır. Optimizasyonda merkezi kompozit deneysel tasarım modeli kullanarak belirlenen çalışma koşulları içerisindeki yanıt yüzey metoduna uygun aşağıda verilen matematiksel eşitlik elde edilmiştir (**Denklem (3)**).

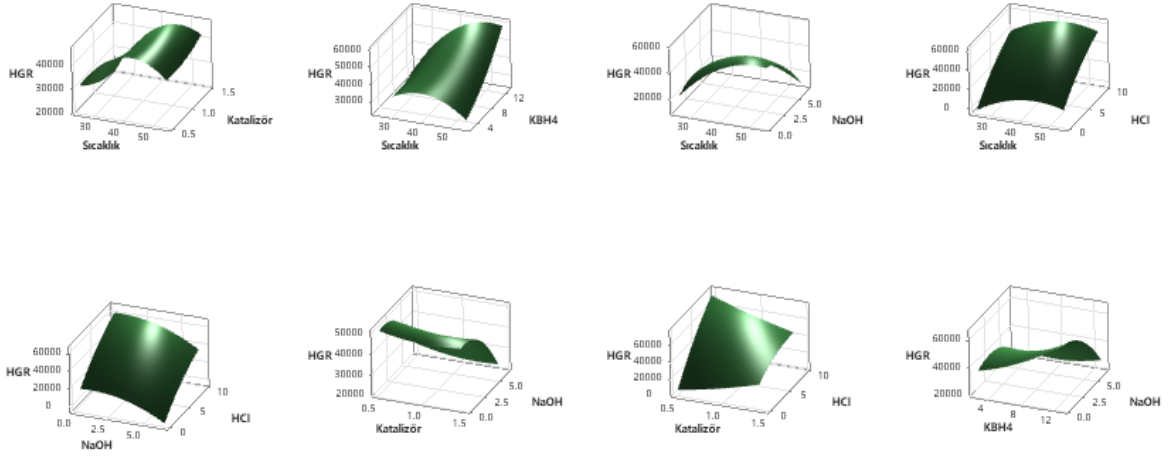
$$HGR = -84793 + 3759 SICAKLIK + 2169 KAT - 3701 KBH_4 + 11671 NaOH + 13176 HCl - 46.93 TEMP * TEMP - 5023 KAT * KAT + 110.1 KBH_4 * KBH_4 - 844.5 NaOH * NaOH - 205.2 HCl * HCl + 431 SICAKLIK * KAT + 106.35 SICAKLIK * KBH_4 - 208.9 SICAKLIK * NaOH - 3.84 SICAKLIK * HCl + 674 KAT * KBH_4 + 2182 CAT * NaOH - 6605 KAT * HCl - 443.2 KBH_4 * NaOH + 69.4 KBH_4 * HCl - 52.7 NaOH * HCl \quad (3)$$

Deneysel çalışma planı ve hesaplanan HGR değerleri **Tablo 1**'de verilmiştir. Bağımsız parametrelerinin HGR üzerindeki etkileşimleri **Tablo 2**'de verilmiştir.

Tablo 2. Varyans analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	8871836338	443591817	501.51	0.000
Linear	5	3239955976	647991195	732.59	0.000
SICAKLIK	1	440701567	440701567	498.24	0.000
KAT. MİKTARI	1	29384967	29384967	433.22	0.001
% KBH ₄	1	298378611	298378611	337.33	0.000
% NaOH	1	432922374	432922374	89.44	0.000
HCl MİKTARI	1	1881072944	1881072944	2126.66	0.000
Square	5	862034142	172406828	194.92	0.000
SICAKLIK*SICAKLIK	1	295164996	295164996	333.70	0.000
KAT*KAT	1	1586575	1586575	31.79	0.022
KBH ₄ *KBH ₄	1	16918037	16918037	19.13	0.003
NaOH*NaOH	1	86785562	86785562	98.12	0.000
HCl*HCl	1	35768320	35768320	40.44	0.000
2-Way Interaction	10	1358165802	135816580	153.55	0.000
SICAKLIK*KAT	1	16397548	16397548	18.54	0.004
SICAKLIK*KBH ₄	1	308782429	308782429	349.10	0.000
SICAKLIK*NaOH	1	260563937	260563937	294.58	0.000
SICAKLIK*HCl	1	3586017	3586017	4.05	0.084
KAT*KBH ₄	1	3012585	3012585	3.41	0.107
KAT*NaOH	1	6271744	6271744	7.09	0.032
KAT*HCl	1	156243921	156243921	176.64	0.000
KBH ₄ *NaOH	1	65912007	65912007	74.52	0.000
KBH ₄ *HCl	1	5360519	5360519	6.06	0.043
NaOH*HCl	1	656831	656831	0.74	0.417
Error	7	6191637	884520		
Lack-of-Fit	2	6191637	3095819	*	*
Pure Error	5	0	0		
Total	27	8878027975			

ANOVA analizinde modelin F değeri 501.51 olarak bulunmuştur. Bu durum yanıt için geliştirilen modelin önemli olduğunu göstermektedir. Geliştirilen modele ait korelasyon katsayısı (R²) %99.93 ve ayarlanmış korelasyon katsayısı (Adj-R²) %99.73 olarak bulunmuştur. Bu korelasyon katsayılarının değerlerinin 1'e yakın olduğu görülmektedir. Bu durum deneysel ve teorik verilerin birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca bağımsız parametrelerin yanıt üzerindeki etkinliğini gösteren bir diğer gösterge ise P değeridir.



Şekil 1. Bağımsız parametrelerin HGR değeri üzerine etkisinin üç boyutlu grafiği (Sabit tutulan değerler; 40°C, 0.95 g katalizör, %7.75 KBH₄, %3.5 NaOH ve 4.5 mL 0.5 M HCl)

P değeri 0.05'ten küçük olan parametrelerin yanıt üzerindeki etkisinin önemli olduğunu, büyük etkisinin çok olmadığını göstermektedir. F değerine göre her bir parametrelerin HGR'ye olan etkisi, sırasıyla, asit miktarı, reaksiyon sıcaklığı, katalizör miktarı, KBH₄ miktarı ve NaOH miktarı olarak bulunmuştur. P değerine göre değerlendirildiğinde ise katalizör ile KBH₄ ikili etkileşimi ve NaOH ile HCl ikili etkileşimi ifadelerinin **Denklem 3**'te verilen regresyon eşitliğinden çıkarılabileceği görülmektedir.

Yanıt yüzey metodolojisinden faydalanılarak hazırlanan deney tasarımına göre, seçilen değişkenlerin değişiminin HGR ile değişimlerini üç boyutlu olarak gösteren 3-boyutlu model eğrileri **Şekil 1**'de verilmiştir. Bu eğriler çizilirken iki parametrenin değişiminin HGR üzerine etkisi görülürken diğer parametreler sabit tutulmaktadır. **Şekil 1**'den de görüldüğü gibi HCl miktarı, sıcaklık, KBH₄ ve katalizör miktarı arttıkça HGR değeri de artmaktadır. NaOH miktarı arttıkça da HGR hızı da azalmaktadır [23].

NaOH konsantrasyonundaki artışın neden olduğu hidroksil iyonlarının, katalizör yüzeyine adsorpsiyonun gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu nedenle, fazla miktarda OH konsantrasyonu, hidroliz reaksiyonunu ve hidrojen üretim hızını olumsuz yönde etkilemektedir [24]. Hidroliz reaksiyonunda HGR miktarını etkileyen diğer bir durumda yan ürün olan KBO₂'nin katalizör yüzeyinde birikerek

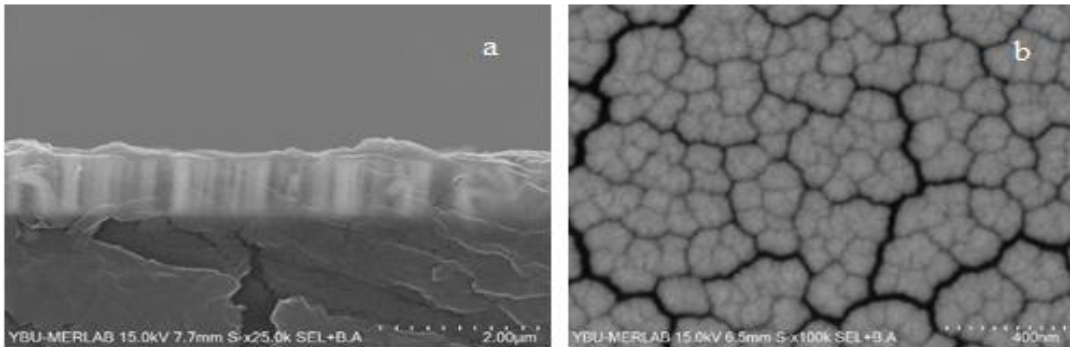
katalizör dektivasyonu ile birlikte PBH'nin kütle transfer hızı yavaşlatmasıdır. HCl burada pH'ı azaltarak reaksiyonu hızlandırmakla birlikte katalizör yüzeyini de temizlemektedir. PH değeri HGR üzerinde oldukça etkin olduğu görülmektedir.

Katalizör miktarı arttırıldığında reaksiyon süresi azalmakla dolayısıyla HGR değeri de artmaktadır. Reaksiyon süresince katalizörün aktif bölgelerinin tıkanması ve katalitik aktivitenin azalmasına neden olmaktadır [14]. Katalizörün miktarı bu yüzden önemlidir.

Şekil 1 ve **Tablo 2**'de de görüldüğü üzere ortam sıcaklığı reaksiyon kinetiği üzerine en etkin parametredir. Sıcaklığı artırarak daha kısa sürede daha hızlı hidrojen üretimini gerçekleştirmek mümkündür. Metal borhidrür hidroliz reaksiyonlarında ortamın sıcaklığındaki bir artışın hidrojen üretim sürecini hızlandıracağı bilgisi literatürde mevcuttur [9, 24].

3.3 Katalizörün karakterizasyonu

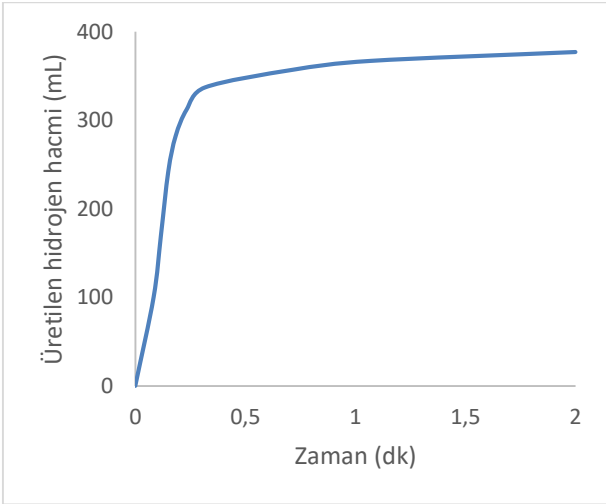
Hazırlanan ince film nikel katalizörün yapısı ve morfolojisini anlamak için FE-SEM'de bakılmış ve **Şekil 2**'de verilmiştir. Hazırlanan katalizörün kalınlığı 800 nm olup gözenekli kolon yapılı olarak lamın üzerine kaplandığı görülmektedir. Gözenekli yapı yüzey alanını artırdığı için katalizörün etkinliği de artmaktadır [25].



Şekil 2. Magnetron saçırma yöntemiyle hazırlanan nikel katalizörün SEM'deki kesit (a) ve yüzey (b) görüntüleri

3.4 Optimizasyon ve validasyon

Yanıt yüzey metodundan elde edilen modele göre yapılan deney deneyler doğrultusunda maksimum HGR değeri için önerilen optimum koşullar; 55°C, 0.6 g katalizör, kütlece %13 oranında KBH_4 , kütlece %0.6 oranında NaOH ve 9 mL 0.5 M HCl çözeltisinin ilave edildiği durumdur. Bu koşullarında yapılan deneyde ön görülen HGR değeri 108.6 L/dk. g olarak hesaplanmıştır. Yanıt yüzey metodolojisine göre yapılan deneysel sonuçlardan elde edilen regresyon modelinin %95 güven aralığı seçilmiştir. Seçilen güven aralığında alt güven limiti 85 L/ dk. g ve üst güven limiti 131 L/ dk. g'dir. Bu şartlar altında deney yürütüldüğünde HGR değeri 92.8 L/ dk. g olarak bulunmuştur. Elde edilen sonucun teorikle uyumlu olduğu ve %95 güven aralığı içerisinde olduğu görülmektedir. Yapılan validasyon da bu durumu doğrulamaktadır. Validasyon sonucunun bu kadar yüksek çıkmasının sebebi, reaksiyonun düşük pH'ta, yüksek sıcaklıkta, nano yapıli gözenekli katalizör kullanımı, hidrojen kaynağı olan PBH miktarının fazla olması ve düşük NaOH miktarının etkisinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3'te validasyon deneyinin üretilen hidrojen hacmine karşı zaman grafiği verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere reaksiyon oldukça hızlıdır. 30 saniyeden daha kısa bir sürede reaksiyonun büyük çoğunluğu tamamlanmıştır.



Şekil 3. Üretilen hidrojen hacmine karşı zaman grafiği (55°C, 0.6 g katalizör, %13 KBH_4 , %0.6 NaOH ve 9 ml 0.5 M HCl'dir.)

Yapılan deney sistemi küçük ölçekli olduğundan hidrojen üretiminin kontrolü daha kolaydır. Büyük ölçekli yapılacak benzer deneylerde özellikle sıcaklık ve yan ürün kontrolünü sağlamakta sıkıntılar olabileceği unutulmamalıdır. Ayrıca aynı deney koşulları 24°C'de gerçekleştirildiğinde ise HGR değeri 49.1 L/ dk. g olarak bulunmuştur. Hesaplanan HGR değerleri literatürle kıyaslandığında birçok çalışmaya göre oldukça heyecan vericidir. Yapılan KBH_4 katalitik hidroliz çalışmalarında benzer çalışma şartları ve HGR değerleri olan çalışma Kılinc ve Şahin'in yaptıkları çalışmadır. Katalizör olarak Co-Schiff Base kompleksi kullanılmıştır. En yüksek HGR değerine 10

mL besleme çözeltisi içinde %2 KBH_4 , %10 KOH, 15 mg katalizör ve 50 °C ortamında gerçekleşmiş ve 99.7 L/dk. g olarak hesaplanmıştır [15].

4 Sonuçlar

Yanıt yüzey metodunu kullanarak deney sistemi kolaylıkla modellenebilmekte, sistemin yanıtını etkileyen değişkenlerin eşzamanlı olarak bireysel ve ikili etkileşimleri incelenebilmektedir. Oluşturulan deneysel tasarım modeli az sayıda deneme yapılarak kısa zamanda en iyi şekilde tanımlamak mümkündür. Yapılan çalışmada KBH_4 çözeltisinin hidrolizi için magnetron saçtırma yöntemiyle hazırlanan ince film nikel katalizörü kullanılmıştır.

Deney sisteminde sıcaklık, katalizör miktarı, ağırlıkça % KBH_4 , HCl hacmi ve ağırlıkça % NaOH gibi parametrelerin HGR değerine etkisi yanıt yüzey metodu ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar merkezi kompozit dizaynı kullanılarak planlanmış ve parametrelerin etkinliği varyans analizi ile belirlenmiştir. Bu varyans analizi sonucunda hidrojen üretimi hızına etkisi çok olan parametreler sırasıyla, asit miktarı, ortam sıcaklığı, katalizör miktarı, KBH_4 oranı ve NaOH oranıdır.

Yanıt yüzey metodundan elde edilen regresyon model ile deneysel verilerin birbiriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Validasyon sonucunda, KBH_4 çözeltisinin hidrolizinde maksimum HGR değeri için optimum parametreler; ortam sıcaklığı 55 °C; %13 KBH_4 ; %0.6 NaOH; 9 mL 0.5 M HCl olarak belirlenmiştir. Maksimum hidrojen üretim hızı 92.8 L/dk. g olarak hesaplanmıştır. Son olarak, ince film nikel katalizörü - KBH_4 hidroliz deney sistemi yakıt hücresi uygulamaları için gerekli olan hidrojeni sağlayabilen potansiyel adaylardan birisi haline gelmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi (2148 No'lu Proje) tarafından desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] H. Ç. Kazıcı, M. S. İzgi and Ö. Şahin, A comprehensive study on the synthesis, characterization and mathematical modeling of nanostructured Co-based catalysts using different support materials for AB hydrolysis. Chemical Papers, 75, 2713-2725, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01514-0>.
- [2] J. Ren, N. M. Musyoka, H. W. Langmi, M. Mathe and S. Liao, Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: a critical review. International Journal of Hydrogen Energy, 42, 289-311, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.195>.
- [3] L. Ouyang, M. Liu, K. Chen, J. Liu, H. Wang and M. Zhu, Recent progress on hydrogen generation from the hydrolysis of light metals and hydrides. Journal of

- Alloys and Compounds, 164831, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164831>.
- [4] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and sustainable energy reviews*, 67, 597-611, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.
- [5] I. Dincer and C. Acar, Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11094-11111, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>.
- [6] I. Dincer, Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 1954-1971, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>.
- [7] M. Balat, Possible methods for hydrogen production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31, 39-50, 2008. <https://doi.org/10.1080/15567030701468068>.
- [8] Technical System Targets: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles 2022. https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/05/f34/fcto_myredd_table_onboard_h2_storage_systems_doe_targets_ldv_1.pdf, Accessed 20 August 2022.
- [9] M. S. Akkuş, H. B. Murathan, D. Ö. Özgür, G. Özkan and G. Özkan, New insights on the mechanism of vapour phase hydrolysis of sodium borohydride in a fed-batch reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 10734-10740, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.177>.
- [10] A. Garron, D. Świerczyński, S. Bennici and A. Auroux, New insights into the mechanism of H₂ generation through NaBH₄ hydrolysis on Co-based nanocatalysts studied by differential reaction calorimetry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 1185-1199, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.027>.
- [11] N. Rusman and M. Dahari, A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 12108-12126, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.244>.
- [12] I. Jain, P. Jain and A. Jain, Novel hydrogen storage materials: A review of lightweight complex hydrides. *Journal of Alloys and Compounds*, 503, 303-339, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.04.250>.
- [13] L. Damjanović, S. Bennici and A. Auroux, A direct measurement of the heat evolved during the sodium and potassium borohydride catalytic hydrolysis. *Journal of Power Sources*, 195, 3284-3292, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.105>.
- [14] D. Kilinc and O. Sahin, High volume hydrogen evolution from KBH₄ hydrolysis with palladium complex catalyst. *Renewable Energy*, 161, 257-264, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.035>.
- [15] D. Kılınç and Ö. Şahin, Metal-Schiff Base complex catalyst in KBH₄ hydrolysis reaction for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 18848-18857, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.229>.
- [16] P. J. Kelly and R. D. Arnell, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56, 159-172, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(99\)00189-X](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(99)00189-X).
- [17] L. Shaginyan, M. Mišina, S. Kadlec, L. Jastrabík, A. Mackova and V. Peřina, Mechanism of the film composition formation during magnetron sputtering of WTi. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 19, 2554-2566, 2001. <https://doi.org/10.1116/1.1392401>.
- [18] M. Salih Keskin, Ö. Şahin and S. Horoz, Efficiency of TiO₂-supported Ni-Mo-Ru-B catalyst for hydrogen production from potassium borohydride hydrolysis. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 1-7, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00755>.
- [19] C. Saka and A. Balbay, Fast and effective hydrogen production from ethanolsis and hydrolysis reactions of potassium borohydride using phosphoric acid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 19976-19983, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.048>.
- [20] O. Erhan, M. Aslan ve M. S. İzgi, Kobalt bazlı bimetalik nanokatalizörün potasyum borhidrür hidroliz tepkimesi üzerindeki katalitik etkisinin incelenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9, 200-212, 2021. <https://doi.org/10.36306/konjes.997368>.
- [21] D. Kilinc and O. Sahin, Ruthenium-Imine catalyzed KBH₄ hydrolysis as an efficient hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 20984-20994, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.236>.
- [22] Ö. Şahin, A. Bozkurt, M. Yayla, H. Ç. Kazıcı and M. S. İzgi, As a highly efficient reduced graphene oxide-supported ternary catalysts for the fast hydrogen release from NaBH₄. *Graphene Technology*, 5, 103-111, 2020. <https://doi.org/10.1007/s41127-020-00036-y>.
- [23] D. Xu, H. Wang, Q. Guo and S. Ji, Catalytic behavior of carbon supported Ni-B, Co-B and Co-Ni-B in hydrogen generation by hydrolysis of KBH₄. *Fuel Processing Technology*, 92, 1606-1610, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.04.006>.
- [24] E. Onat, Ö. Şahin, M. S. İzgi and S. Horoz, An efficient synergistic Co@ CQDs catalyst for hydrogen production from the hydrolysis of NH₃BH₃. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 27251-27259, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07094-9>.
- [25] M. Paladini, G. Arzac, V. Godinho, M. J. De Haro and A. Fernández, Supported Co catalysts prepared as thin films by magnetron sputtering for sodium borohydride and ammonia borane hydrolysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 158, 400-409, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.04.047>.





The current status of gold mining in Turkey: An overview

Türkiye’de altın madenciliğinin güncel durumu: Genel bir bakış

Adem Ersoy^{1,*} 

¹ Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Mining Engineering Department, 01250, Adana, Türkiye

Abstract

Gold has been treasured since ancient time for its beauty, purity, power, valuable asset and investment, accomplishment, and many more. However, gold also appeared in the last quarter of 20 th century as a basic metal due to its superior electrical conductivity, resistance to corrosion and required combinations of physical and chemical properties. Turkey has many gold deposits, which generally occurred in Late Mesozoic and Tertiary formations, and related to Mesozoic and Cenozoic volcano plutonic acts. However, the most economic porphyry, epithermal including both low and high sulphidation systems, volcanic associated massive sulphide gold deposits are abundantly found. Orogenic, placer and skarn host gold deposits are relatively less significant in terms of their abundance and reserve/resource sizes. Gold is embedded in Turkish life and plays a significant and innovative role in Turkey’s economy. Gold production has increased almost every year since 2001, rising from 1.4 tons to 45 tons in 2021. However, gold consumption does not meet gold production. Because Turkey is the fifth largest gold consumer in the world. The gold consumption is about 6 % of global demand. The review currently outlines a focus on geological and mining characteristics of gold deposits and features of gold such as its use, import, export and price.

Keywords: Gold deposits, Gold mining, Gold uses, Gold import, Gold export

1 Introduction

Gold is the oldest metal in the world. It was used in 5000 B.C. Legend and historical records reveal that metal mining in Turkey dates back to 8000 years. The first gold coins were made in Lydia (western Turkey) in about 700 B.C. [1]. Although Turkey has a long history of mining, modern geological exploration and discoveries of ore deposits have not been fully applied in site investigation until 1985. The Turkish Geological Survey (MTA), established in 1935, has made ore inventors, [2, 3], metallogenic maps of Turkey [4]. Mining law and regulations have been considerably changed and renewed in 1985. The regulations provide that successful mineral exploration and discoveries have been carried out by many global companies using modern exploration methods. Many discoveries of gold deposits have been made in recent years.

Öz

Altın ilk çağlardan beri onun güzelliği, saflığı, gücü, değerli servet olma, yatırım yapma ve daha birçok özelliği için biriktirilmiştir. Ancak, yirminci yüzyılın sonlarında süper elektriksel iletkenliği, korozyona karşı dayanıklılığı, istenen fiziksel ve kimyasal özellik birleşimleri nedeniyle ana metal olarak ortaya çıkmıştır. Türkiye, genellikle geç Mezozoik ve Tertiary formasyonlarda, Mezozoik ve Senozoik volkanik-plütonik aktivitelerle oluşmuş birçok altın yatağına sahiptir. Ancak, en ekonomik porfiri, düşük ve yüksek sülfür sistemlerini içeren epitermal, volkanik masif sülfür tipi birçok altın yatakları oldukça yaygın bulunmaktadır. Orojenik, plaser ve skarn türü altın yatakları rezerv/kaynak büyüklüğü ve sıklığı bakımından daha az önemlidir. Altın, Türk insanının yaşamına girmiş olup, Türkiye ekonomisinde önemli ve yenilikçi bir rol oynamaktadır. Altın üretimi 2001 yılından bu yana 1.4 tondan 2021 yılında 45 tona yükselişle hemen hemen her yıl artmıştır. Ancak, altın üretimi altın tüketimini karşılamamaktadır. Çünkü Türkiye, küresel altın tüketici talebinin %6’sını oluşturmaktadır olup, dünyanın en büyük dördüncü altın tüketicisidir. Bu derleme incelemesi, güncel olarak altın yataklarının jeolojik ve maden karakteristiklerine; altın kullanımı, ithalatı, ihracatı ve fiyatı gibi özelliklerine odaklanmayı özetlemektedir.

Anahtar kelimeler: Altın yatakları, Altın madenciliği, altın kullanımları, Altın ithalatı, Altın ihracatı

The geological framework of the Alpine-Himalayan segment results from the complex of two main lithospheric plates (Eurasia and Gondwana). At present time, the boundary between the plates extends irregularly from the Gibraltar arc to the Burmese ranges, passing through the western and eastern Mediterranean basins, Turkey, Iran, Pakistan and the 2000 km long Himalayan range [5]. Most of economic gold deposits have been formed at these belts of Alpine Orogenic segment. Turkey is in Alpine orogenic belt between Eurasian, Arabian and African plates. Turkey’s geology, is rather complex, has four main tectonic belts, includes Pontid, Anatolid, Taurid and Border Fold Belts. Most of metal deposits have been occurred in these tectonic belts. Turkey has a substantial number of gold deposits, which include porphyry, high and low sulphidation types of epithermal, volcanic associated massive sulphide, orogenic, placer and skarn hosted. Recent gold reserves/resources are estimated as 1500 tons in these deposits [6]. Recently,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aersoy@atu.edu.tr (A. Ersoy)

Geliş / Received: 08.04.2022 Kabul / Accepted: 04.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngmuh.1100437

explorations and discoveries for gold deposits have mostly focused on porphyry and epithermal of geologic systems.

Turkey is the fifth largest gold consumer in the world after India, USA, Saudi Arabia and China. Gold production of the country, officially started in 2001 with 1.4 tons of gold, gradually increased every year, was 45 tons in 2021. However, the gold production does not meet the consumption of gold. Turkey has annually imported an average of 157 tons gold every year in the last 25 years, spend 3.13 billion dollars only in 2021 (importing 55 tons of gold). This payment significantly affects foreign trade deficit. On the other hand, it is estimated that Turkish householders have accumulated 3500-4000 tons of gold “under-the-pillow”.

This overview fills a knowledge gap in the current status of gold mining in Turkey. There are many old dated review publications or available most of small and local reports that describe only single issue and provide few or no guidelines necessary focusing on practical applications of the gold mining research. This review addresses present time comprehension of Turkey’s gold deposits which include the available data, its geology and mining characteristics, and its use, import, export and price. The review may be used by a wide range of practitioners, geological and mining engineers, and others involved in gold mining.

2 Geology and types of gold deposits in Turkey

Geological frameworks (such as geologic environment, host rocks, mineralisation or metal association, alteration, age, genetic origin, grade and reserve or size characteristics of ore body, structure or tectonic activities and metamorphic effects provide classification of gold deposits that are most significant for designing exploration strategies, evaluating prospect and performing reserve or resource assessments of selected sites. Robert et al. [7] have classified sixteen globally recognised types of lode gold deposits that are based on the geological settings, host rocks, nature of mineralisation and geochemical signature. The comprehensive inventories of Turkey’s gold and silver fields were studied using main geological frameworks, mining characteristics by Çolak [8].

Distinguishing significant ore deposits are described according to geological framework, wall rock type, mineral assemblage and depth ranges. Turkey has many discovered and prospecting stages of gold deposits which can be classified into six groups. They comprise low sulphidation epithermal and high sulphidation epithermal types, intrusion related to porphyry gold, volcanic hosted massive sulphide (VMS) deposits, orogenic gold including Listwanite-associated and placer deposits. Characteristics of the gold deposits in Turkey are summarised in Table 1. Gold prospects in investment and development phase in Turkey are presented in Table 2.

2.1 Epithermal gold deposits

Turkish literatures use Lindgren [9] ore deposit classification which depends on depth and temperature-pressure relationship in the Earth crust as epithermal, mesothermal and hypothermal. Majority of epithermal gold deposits occur in transported zones with the temperature

range 180-280 °C, equivalent to depths about 100 m to 800-1500 m (Table 3) [10]. In high sulphidation epithermal deposits are closely associated with volcanic and magmatic centres and are hosted in extremely altered rocks. Low sulphidation epithermal deposits are associated with excessively altered mineralisation and especially more vein styles [11]. They are frequently more distal to volcanic centres. Open-space veins and stockwork ore are dominant, dissemination and replacement of ore are minor in low sulphidation system. However, dissemination and replacement of ore are common and stockwork ore is minor and veins subordinate, locally dominant in high sulphidation systems [12].

Epithermal gold deposits form at relatively low temperatures 150-300 °C and shallow depths near volcanic areas and in hydrothermal fields [13]. Mineralisation fluids in low sulphidation gold deposits are generally formed by deeply transporting aqueous solution containing absorbed acid magmatic gases. Most of Low sulphidation deposits occurring in low relief areas are generally distributed above a magmatic zone continuation to bedrock. High sulphidation gold deposits emerge by high sulphidation acidic and oxidised fluid near volcanoes.

The majority of the operated gold deposits, prospect, investment and development stage in the mineral deposit database of Turkey are epithermal about 50 % (Table 1 and 2). Epithermal operated gold deposits are distributed in two regions of Turkey, north-eastern (NE) Turkey and western (W) Turkey. There are both high and low sulphidation epithermal gold deposits in Turkey. However, low sulphidation gold deposits are more economic than high sulphidation system gold deposits in the regions. High sulphidation system is distributed mainly in the Çanakkale region, northwest (NW) Turkey. Ovacık, Efemçukuru, Çukuralan operated gold deposits (in İzmir region), Lapseki (Çanakkale) in W Turkey, Altntepe (Ordu) and Mastra (Gümüşhane) gold produce deposits in northern (N) Turkey, Himmetdede (Kayseri) operated gold deposits are typical examples of low sulphidation system. High sulphidation epithermal operated or the production of gold deposits of Turkey are represented by Ağı Dağı-Kirazlı (Çanakkale) in W Turkey, Çorak-Taç (Artvin) in NE Turkey and Öksüt (Kayseri) in E Turkey (Table 1).

The Ovacık, Efemçukuru, Çukuralan and Ağı Dağı gold deposits are associated with submarial volcanic rocks in W and NW Turkey. The Ovacık gold deposit located along the northern boundary of the ENE-trending Bergama graben, are hosted in andesite porphyry of Early Miocene [14]. The Efemçukuru deposit is hosted by rhyolite domes of Neogene and flysch facies rocks Late Cretaceous rocks to Paleogene age. The orebody is associated with faults control vein, stockworks, breccias and replacement mineralisation and also serve as local for rhyolitic intrusions. Mastra (Gümüşhane) and Altntepe (Ordu) gold deposits are associated with submarine to subaerial volcanic rocks, are hosted by andesite lava and tuffs of Miocene age, porphyry andesite and rhyolite domes of Upper Cretaceous age, respectively.

Table 1. Geological and mining characteristics of operated gold deposits in Turkey

State-Deposit Name	Company	Measured Resources Mt	Au Average Grade g/t	Contained Au ozx1000	Deposit Type	Main Host Rock	Age of Host Rock	Ore Body	Operation Processing	Production Start Year	References
Kışladağ-Uşak	Tüprağ	345	0.70	4352	porphyry	Multi-latite porphyry intrusions	Late Tertiary	stockworks, breccia	Open pit, heap leaching	2006	[17,18,19,20]
Çöpler-Erzincan	Anagold	72	1.30	6000	porphyry	Granodiorite, quartz monzonite, skarn limestone	Palaeocene Campanian	stockworks	Open pit, POX heap leaching	2010	[20,21,22,23]
Ovacık-İzmir	Koza	150	4.82	-	Epithermal LS	Andesite porphyry	Early Miocene	Veins with breccia	Underground, tank leaching	2001	[20,22,24,25]
Efemçukuru-İzmir	Tüprağ	255	6.90	651	Epithermal LS	Flysch, hornfels rhyolite intrusions	Late Cretaceous Paleogene	Veins, stockworks, breccia, replacements	Underground, flotation	2011	[20,22,26,27]
Himmetdede-Kayseri	Koza	30	0.70	1060	Epithermal LS	Gneiss marble, ignimbrite	Palaeozoic, Late Pliocene	Disseminations, veinlets	Open pit, heap leaching	2013	[20,22,28,29]
Kaymaz-Eskişehir	Koza	6	5.01	215	Orogenic Listwanite	Marine sediments, ophiolites	Upper Cretaceous	Disseminate, breccia	Open pit, tank leaching	2011	[20,22,28,30]
Mastra-Gümüşhane	Koza	-	2.55	-	Epithermal LS	Andesite porphyry, andesitic tuff	Eocene	Vein-stockworks, local breccia	Open pit, underground, tank leaching	2009	[20,22,31,32]
Çukuralan-İzmir	Koza	26	4.90	2000	Epithermal LS	Porphyrydyke, granodiorite, metamorphic complex	Permian	Stockworks, veins, replacement	Open pit, underground, tank leaching	2009	[20,22,33]
Bakırtepe-Sivas	Demir-export	3	1.30	150	Epithermal HS	Quartzite, schist	Upper Cretaceous-Palaeocene	Veins, disseminations	Open-pit, heap leaching	2015	[20,22,34,35]
Öksüt-Kayseri	Öksüt	25.8	1.35	1200	Epithermal HS	Andesitic volcanic complex	Miocene-Pliocene	Breccia, Veins	Open pit, heap leaching	2020	[20,22,36,37]
Lapseki-Çanakkale	Tümad	7.15	1.85	-	Epithermal LS	Andesite, schist	Lower Miocene	Veins, breccia, stockworks	Open pit, tank leaching	2018	[20,22,38]
İvrindi-Balıkesir	Tümad	45	0.67	-	Epithermal	Andesite porphyry	Miocene	Veins, stockworks	Open pit, heap leaching	2019	[20,22,39]
Sart-Manisa	Pomza	20 Mm ³	97mg/m ³	355	Placer	Conglomerates, crystalline rocks, schist	Miocene - Quaternary	Placer native gold	Open pit, gravity separation	2002	[20,22,40]
Bolkardağ-Niğde	Gümüştaş	0.5	8	-	Karstic	Marble, porphyry, volcanic	Permian-Trias, Palaeocene-Eocene	Placer (secondary), Replacement, veins	Underground, open pit, tank leaching	2012	[20,22,41,42]
Altntepe-Ordu (Fatsa)	Stratex	10	1.22	345	Epithermal	Volcano-sedimentary porphyry andesite rhyolite domes	Upper Cretaceous	Veins, stockworks, breccia, disseminations	Open pit, heap leaching	2015	[20,22,43]
Midi-Gümüşhane	Yıldızlar	-	7	-	Epithermal-Mesothermal	Volcano-sedimentary rocks, limestone	Liyas	Veins, Filling, replacement	Open pit, flotation	2012	[20,44]
Kaş-Kayseri	Demir Export	1	1.25	-	Epithermal	Limestone		Veins, filling	Open pit, heap leaching	2016	[20,22,35]
İnlice-Konya	Esan	12	2.94	-	Epithermal HS	Volcanic, basaltic andesite	Upper Miocene-Pliocene	Disseminations, fillings	Open pit, heap leaching	2015	[45,46,47]
Kızıltepe-Balıkesir	Zenit	1	2	-	Epithermal LH	Volcanic rocks, dasitic ignimbrite	Early Miocene	Vein	Open pit, tank leaching	2017	[48,49]

Table 2. Gold projects in investment and development phase in Turkey

State-Deposit Name	Company	Measured Resources Mt	Au Average Grade g/t	Contained Au ozx1000	Deposit Type	Main Host Rock	Age of Host Rock	Ore Body	Operation Processing	Current status	References
Çorak-Artvin	Akdeniz	23.80	1.30	1.58	Epithermal HS	Volcano-Clastic, flows	Upper Cretaceous-Eocene	Veins, stockworks, breccias	Open pit, gravity, flotation	Permit process	[50]
Aği Dağı-Çanakale	Biga-Alamos	12	0.76	8	Epithermal HS	Flow dome complex	Oligocene, Miocene	Disseminations, breccia	Open pit, heap leaching	Permit process	[51, 52]
Tac-Artvin	Akdeniz	25.70	0.80	-	Epithermal HS	Volcanic, volcano-sedimentary	Upper Cretaceous-Eocene	Veins, stockwork, breccias	Open pit, gravity, flotation	Permit process	[50]
Kirazlı-Çanakale	Alamos Gold	-	0.80	515	Epithermal HS	Andesite	Lower Miocene	Disseminations, breccia	Open pit	Permit process	[52]
Yeni Pazar-Yozgat	Aldridge Mineral	30	1.10	100	Poly metal VMS	Meta-sedimentary	Trias-Cretaceous	Disseminated, breccia	Open pit, tank leaching	Permit process	[53]
Hod-Artvin	Lidya	9.1	8.9	350	VMS	Dasitic volcanic rocks	Cretaceous	Breccia, veinlets	Tank leaching, testing	Permit process	[54, 55, 56]
Tavşanlı-Kütahya	Zenit	4.50	1.76	253	Orogenic Listwanite	Serpentines, metamorphic greywackes	Jurassic-Upper Cretaceous	Disseminations, pods, stockworks	Testing	Permit process	[57]

Table 3. Hydrothermal ore deposits associated with magmatic process HS: High sulphide, LS: Low sulphide [10].

Ore deposit type	Relation to magma	Temperature (°C) / depth (km)	Fluid	Associated metals	Active analogue
Porphyry	Adjacent or hosted intrusions	>600-300/2-5	Hypersaline and immiscible vapour	Cu±Mo±Au, Mo, W or Sn	Shallow magma bodies beneath stratovolcano
Skarn	Adjacent to intrusion in carbonate rock	400-600 / 1-5	Saline to moderate	Fe, Cu, Sn, W, Mo, Au, Ag, Pb-Zn	Shallow magma bodies beneath stratovolcano
Pluton-related veins	Fractures in and near intrusion	300-450 / Variable	Moderate to low salinity	Sn, W, Mo±Pb-Zn, Cu, Au	Shallow magma bodies beneath stratovolcano
Epithermal HS	Above parent intrusion	<300 / Near surface to >1.5	Moderate to low salinity	Au-Cu, Ag-Pb	High-temperature fumaroles and acidic springs near volcanic vent
Epithermal LS	Magmatic heat source	150-300 / Near surface to 1-2	Very low salinity, gas-rich	Au (Ag,Pb-Zn)	Geothermal systems with hot springs
Massive Sulphide	Near extrusive domes	<300 / on or near sea floor	Near seawater salinity, gas-rich	Zn-Pb-Ag (Cu or Au)	Back-arc seafloor vents, black smokers

Fluid is used to non-silicate, aqueous liquid and/or vapour. The salinities (Na, K chloride) of fluids in these deposits vary from hypersaline (>50 wt.%) to moderate (10-20 wt.%), low (<5 wt. %), very low (0.2-0.5 wt. %) salinity. HS: high sulphidation, LS: low sulphidation.

2.2 Porphyry gold deposits

Porphyry gold deposits are formed in volcanic-magmatic belts in both island and continental crust belts. The deposits are associated with pervasive hydrothermal alteration, porphyritic stocks and volcanic rocks consisting of calc alkaline to alkaline [15]. High fines gold is found in veins, stockworks and disseminations, generally in zones of hydrothermally altered silicate rocks [16].

Porphyry deposits are basically associated with granitoids of Late Cretaceous to Late Miocene age. The two district metallogenic settings are known as the Pontides and Anatolides in Turkey. There are many porphyry Cu-Au deposits and discoveries with significant mineralisation e.g. Gümüşhane and Artvin (NE Turkey). These are hosted by granodiorite porphyry of Middle to Late Eocene age, contains higher grade Au values (up to 15 ppm), with more widespread argillic alteration zone.

Anatolides comprise the two largest gold deposits, Kışladağ (Uşak) and Çöpler (Erzincan) in Turkey. Kışladağ was effectively described as a large tonnage of low-grade, Au deposit which is associated with multi-phase latite porphyry intrusions of late Tertiary age (most probably Miocene). The deposit is the first significant economic porphyry gold deposit in Turkey [17]. Kışladağ gold mineralisation has high Mo content [58].

Çöpler is the second largest gold deposit in Turkey. The deposit is generated in granodiorite, quartz monzonite and limestone. Mineralisation and alteration in Çöpler porphyry Cu-Au deposit present features of a typical porphyry system [21, 23]. Mineralisation is generally associated with overprinted argillic alteration.

2.3 Volcanic hosted massive sulphide (VHMS) gold deposits

Volcanic-hosted massive sulphide (VHMS) deposits or volcanogenic massive sulphide (VMS) deposits are associated with sulphide mineralisation, disseminated, replacement and stockwork ores and sulphide bearing veins that occurred below the sea floor above a mid-sea floor magma. The host rocks of VMS are submarine volcanic rocks. VMS mineralisation have polymetals which include many combinations of sulphides of Cu, Zn, Pb, Au and Ag. The permeability of rocks strongly affects gold occurrence. The hydrothermal solution transport to permeable crust, large VMS generate by excessive alteration and replacement of volcanic units. The typical settings of VMS deposits include ophiolitic sequences of mafic ocean crust, deformed and metamorphosed rock of Archaean and early Proterozoic greenstone belts, submarine volcanic successions and intrusions, marine sedimentary rocks with interbedded volcanic rocks. The host rocks of VMS gold deposits are exposed to strong deformational metamorphism.

VMS deposits in Turkey may be classified into two types, Kuroko type and Cyprus type. Gold is an accessory (Au-enriched orebodies) or gold is economic (Au-riched orebodies). The Hod, Cerattepe, Murgul (Artvin) and Çayeli (Rize) are typical examples of gold hosted in Kuroko-type VMS deposits which are mostly sub-marine volcanic rocks of late Cretaceous age.

Economic operated and prospect in Cyprus type deposits in Turkey are not known except for Ergani (Diyarbakır) Cu-Au deposit consisting of two orebodies. The deposit contains relatively high grade Au (mean 1.2g/t) [14]. The mineralisation is associated with mafic submarine volcanic rocks, mudstone and red-black limestone of Eocene age.

2.4 Orogenic gold deposits

Orogenic gold deposits of Turkey consist of mesothermal gold and Listwanite (quartz-carbonate alteration) hosted gold. Orogenic gold deposits are also known as mesothermal gold deposits. Vein and replacement gold mineralisation are a dominant type of orebody. The deposits occurred in orogenic belts and during the periods of regional metamorphism. They are associated with metamorphic and intrusive igneous host rocks. Mesothermal gold deposits are

affected by variable structural settings. Vein and replacement ore bodies are formed along fault zones.

The Menderes, Kırşehir, Bitlis and Istranca massifs contain Pre-Mesozoic crystalline metamorphic rocks and orogenic gold deposits and prospects in Turkey. Crystalline metamorphic rocks include mica schist, gneiss and marble, which are the host rocks for gold mineralisation in the Menderes massif. However, there is no economic mesothermal gold deposit in Turkey due to small scale, discontinuous veins and veinlets of mineralisation.

Tavşan (Kütahya) and Kaymaz (Eskişehir) gold deposits in western Turkey are the typical examples of Listwanite mineralisation. Listwanite gold ores form faults or sheared zones of ophiolitic ultramafic rocks, mostly serpentines (thrust and normal) and shear contacts control local high-fluid flow and associated with quartz-carbonate alteration. Kaymaz gold deposits are associated with marine sediments and ophiolite rocks. Fine grained gold ores have occurred with multiple phases of silification and brecciation, and the most gangue minerals are quartz, serpentine, ankerite and dolomite [30].

2.5 Placer gold deposits

Placer and paleoplacers in coarse grained sand and pebble sediment, unconsolidated alluvial gravels and conglomerates are the most common sources of gold. These are exploited due to easy mining excavation of loose, close surface sediments, gold extraction or processing with minimum investment. Gold of fluvial placers and paleoplacers are obtained from erosion of hard rocks. Very thin high grade veins are gold ore in the majority of fluvial placers. Gold placer fields have relatively high relief in most cases.

Alluvial, eluvial and beach placers are the most common types of placer deposits in Turkey. Sart (Manisa) is a typical example of economic and operated placer gold deposit in western Turkey. In the deposit, placer native gold occurs in both alluvium gravels and conglomerate of Miocene to Quaternary age. Gravity ore processing method is applied to produce gold by domestic company [40]. A heterogeneous distribution of gold content negatively affects performances and economics of hydraulic mining operation.

3 Gold processing

Gold processing competing techniques and their advantages and economics have become a major issue in the gold mining industry. The four main mineral processing methods are employed in the gold processing. Pressure oxidation method is rarely applied to increase recovering of gold treatment. Flotation, heap and tank leaching techniques are most frequently used for gold extraction process. The methods applied in modern leaching technologies in optimised operation and atmospheric conditions to develop production.

3.1 Flotation

In the gold-mining industry, flotation constitutes one of the most common methods due to its wide range of applicability. Following the introduction of collector types for selective separation of sulfide minerals in the 1930s, the

applicability of the recovery of gold from these sulfide or refractory ores made the flotation process to be evaluated on a wide scale [59]. As its well-known, flotation is a physico-chemical process that utilizes the wettability differences of minerals and separates the hydrophobic ones, either by their natural form or with the addition of suitable reagents (collectors, frothers, etc.) by floating them. Despite gold flotation has been widely used for a long time, the flotation characteristics of gold or gold minerals in sulphide ores have not been defined in detail in the literature. There are lack of fundamental literature studies on gold flotation. However, a great deal of many researches are related to on site specific gold ores. Overall finding of many literature studies indicates that the liberated gold ore under 150 µm in size can be floated in the presence of anionic collector types as xanthates and dithiophosphates [59, 60]. The studies showed that while almost 80 % flotation recovery can be obtained for liberated gold in the presence of potassium amyl xanthate, it can be only up to 50 % for the flotation of refractory gold ore samples. This result revealed that in addition to the chemical type and dosage, the presence and properties of other gangue ores should also be evaluated. Accordingly, in a more recent study, [61] it was found that while the flotation recovery of gold can be 60 % in the presence of clay, it can increase up to 80 % following the removal of clay. There are many parameters or factors such as particle size and shape, collector or reagent composition and type, combinations of collectors, frother type, pulp pH, surface characteristics of gold, gold mineralogy, Eh, flotation gases and impact oxidation, flotation kinetics, electrical double layer, natural metal and organic coatings on gold significantly affect recovering and developing of gold extraction process. Considering that knowledge in mind, it can be clearly suggested that, the flotation of gold is a very complex process that still needs further investigation. It is very important to create new conditions in order to increase the recovery in gold flotation due to the gradually decreasing liberation sizes. The details of gold flotation method may be found in the literature [59, 62].

3.2 Pressure oxidation

Pressure oxidation, commonly abbreviated as POX, has been used broadly for the pre-treatment of refractory gold ores over the past thirty years such as pyrite and marcasite at elevated temperature and pressure, being the first facility operated in 1985 [63, 64, 65].

This technology has been used successfully within the gold industry to treat whole ore and sulphide concentrates using both alkaline and acidic processes, while an alkaline route is typically used exclusively for whole ore only. The process is carried out in a pressure vessel, i.e., an autoclave [64, 65]. Whole-ore treatment is used when flotation gives poor gold recovery. There is important debate on which is better flotation, whether whole-ore or concentrate treatment. To put it more simply that the optimum process is site and ore specific conditions.

During pressure oxidation, sulphide minerals that hinder fine gold are oxidised which effectively liberates the encapsulated gold particles. This process is typically carried

out at elevated temperatures (180 to 240°C) with oxygen partial pressure (350 to 700 kPa) [66, 67].

Although the objective of the alkaline and acidic pressure oxidation is indistinguishable, the chemistry inside the autoclave is very different which leads to different gold recovery and residence time. Alkaline pressure oxidation commonly gives a lower gold recovery (up to 10%) due to the gold entrapment in the hematite, which is formed at the oxidising surface of the sulphide mineral. Additionally, residence time in alkaline POX is generally longer due to the difference in the chemistry inside the two processes. To the lower capital and operating costs. Despite of these disadvantages, alkaline POX is often preferred for its lower capital and operating cost due to a more conventional material of construction [65].

The pre-treatment method is significantly affected by thermodynamic and kinetic properties. The thermodynamic properties of chemical system determine the overall reaction driving force in the process. The kinetic properties base on a combination of physical, chemical, mass transport factors and appropriate plant design.

The pressure oxidation method is used to develop gold recovery in Çöpler (Erzincan) gold mine in Turkey. The details of the pressure oxidation pre-treatment technique can be found in the literature e.g. [64, 65].

3.3 Heap leaching

Heap leaching is low cost, traditional and adopted low grade ore used in industrial mining process to extract gold. The leaching method is used in 20-25 % world gold production. Advantages, disadvantages and factors affecting gold extracting efficiency of the technique is given in Table 4. The details on the topic can be found in the current published literature e.g. [68-71]. Here, the heap leaching method is simply summarised step by step.

Table 4. Heap leaching characteristics: advantages, disadvantages and factors affecting the process

Advantages	Disadvantages	Factors affecting the process
Widely used	Time consumption	Local conditions
Flexible	Water loss	Efficiency of crushing
Economic	Slow kinetics	Ore properties
Low grade on large scale	Acid mine drainage	Ore particle sizes
Simple and competitive	Accidental leakage of leach solution	Spray intensity of the cyanide solution
Less equipment		Cyanide solution concentration
Less environmental problems		Pile height
No use of a tailing disposal		Clay and muddy content
Strong adoptability		Leaching time
Low cost, yield quick return		Oxygen concentration
		Temperature

The mined ore is crushed into small particles generally between 30-50 mm using jaw or cone crusher. The crushed ore is separated as a stuck over an impermeable plastic or clay lined leach pad. The large piles are sprayed cyanide leaching solvent often using drip irrigation minimising evaporation, providing uniform distribution of the solution and undamaging the exposed ore. The precious metals will dissolve into the “pregnant” solution. Then, gold recovery is obtained through the dissolved precipitation using electro-winning and carbon adsorption processes. A simplified flow chart of a gold heap leach process is presented in Figure 1.

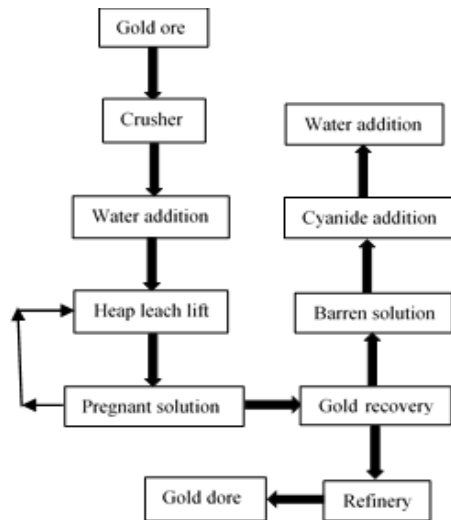


Figure 1. Schematic chart of heap leaching process

3.4 Tank leaching

Tank leaching methods have been largely used in precious metal mining to extract gold. In current times, the method is used by at least 60 % of world gold production. The mined ore is crushed and milled or grinded into fine particles. The methods are chemically operated in open tanks under the atmospheric conditions to recovery metal salts from the concentrated ore at an accelerated rate. This method is also known as “semi-closed” technique. Table 5 shows advantages, disadvantages and factors affecting the tank leaching process.

Table 5. Tank leaching characteristics: advantages, disadvantages and factors affecting the process

Advantages	Disadvantages	Factors affecting the process
Widely used	Not applicable low grade	Retention time of leaching system
High grade of ore	Complex process	Ore size
Less water used comparing with heap leaching	High cost	Appropriate amount of reagents
High extraction/efficiency	Cyanide risk for environment	Slurry density
High kinetics		Dissolved gas Number of tanks

Tank leaching processes (activated carbon adsorption of cyanides gold) can be divided into two types: carbon in pulp

and carbon in leach. Carbon in column is often used in gold extracting from heap leach solutions. Leaching reagents are added to the tanks to obtain leaching reaction. In continuous tank system, the sully overflows or pumps from tank to tank. Pregnant solution is then separated from the sully. Ultimate solution goes on to the next phase of gold recovery. Finally, electro-winning method is applied to the gold bearing solution to recover the gold from the leaching chemicals. The gold solution passes into a container cell. There are two terminals, positive and negative, in the cell. The negative terminal collects gold. Smelting involves melting the negative terminals in a furnace at 1150 °C. A chemical mixture known as “flux” is added to molten material, the gold separates from the metal. The liquid gold is transformed to moulds to achieve solid bars known as “Dore Bars”. These bars are sent to refineries for further gold processing.

4 Description and features of gold

Gold (Au), is a chemical transition metal, atomic number 79 and occurs naturally. In pure form, gold is a bright, slightly reddish lustrous yellow, dense, soft (2-3 Mohs Hardness), malleable, ductile, good conductor of heat and electricity, beautiful object, chemically stable (resistant to most acids), rare element and precious metal. It does not tarnish and corrode. Gold is universally accepted as standard and in exchange for goods and services because of its unique cost of labour, currency and national economy. Gold has been applied as the standard in most countries of the world since the first coinage used in Lydia between 643-630 BC. From 1870’s the World’s currencies have accepted the gold standard. Gold’s financial official role in the international monetary system ended in 1970’s. However, gold is continued as a high and significant valuable asset. For universal and international assets, the central banks of many developed/developing countries hold approximately 45 % of the whole world’s gold. Gold name comes from the old English word “geolo”, from the Latin name “aurum” (glowing down). Table 6 presents the basic characteristics of metal gold.

Table 6. The basic physical characteristics of gold

Physical property	Description
Chemical symbol	Au
Atomic number	79
Atomic Weight	197
Crystal system	Cubic
Colour	Yellow, silver white, minor orange red
Melting point	1064.43 °C (1948 °F)
Thermal expansion	14.2 x 10 ⁻⁶ /°C
Diaphaneity	Opaque
Seawater abundance	4 to 8 x 10 ⁻⁶ ppm
Hardness	2.5 to 3
Density	19.3 (when pure)
Magnetic sensitivity	Low
Resistivity	2.2 x 19 ⁻⁸
Ductility	High
Lustre	Metallic
Tensile strength	138 MPa
Earth presence	0.005 ppm
Volatility	Starts below melting point

5 Gold uses

Gold is completely recyclable. The unequalled combination of chemical and physical characteristics of gold provides its uses in many commercial areas such as industrial, medical, electrical applications and many more. Gold applications are summarised in Table 7.

The purity of gold is measured by fineness. A standard trade known as ‘carat’ was developed to designate fineness of gold. It is commercially available with a purity of 99.999 %. Gold of fineness 1000 is pure gold which is equivalent to 24 carat used by jewellers. Gold containing alloys of other metals or substances have lower value than pure gold. A 50 % gold alloy is equivalent to 12 carat. An alloy containing 75 % gold by weight is 18 carat. Generally, high carat jewellery is softer, resistant to tarnish and chemicals, whereas low carat jewellery is stronger and less resistant to tarnish especially when contact with perspiration.

Fineness is significant in geochemistry and sometimes evidence of a deposit type. Rather, fineness gold is typically extracted in larger grains at depth, high temperature and high pressure mesothermal deposit than epithermal deposit. However, high fineness gold may form in many rock types ranging from ultramafic through mafic and dioritic and gabbroic types, granites related to porphyries and volcanic rocks and high sulphidation epithermal deposits. Sillitoe [72] pointed out that porphyry gold deposits contain mainly fine grained gold which is less than 60 µm in size, it is frequently found as high fineness native metal.

Table 7. Gold applications

Application	The reason of use
Jewellery	The most malleable and ductile, very valuable asset, beautiful, rare and precious, tarnish resistance, unique density, tradition, cultural, natural trading medium, elite, power, scarcity
Financial: coinage, bullion banking	Long term high value, durable, portable, private, permanent, divisible, investments
Electronics	Electrical connector and conductor, chemically stable, and resistant, none-toxicity
Computers	Efficient, reliable conductor and connector
Medicine	Radioactive isotope, nonreactive in the medical instruments, highly reliable life support devices
Dentistry	Superior performance, aesthetic appeal, nonallergic, chemically inert, easy working
Aerospace	Dependable conductor and connector, lubricant, infrared radiation stabilise temperature, low shear strength
Awards and status symbols	Highest esteem and status, purity for religious objects, honouring
Glassmaking	Rich ruby colour, climate controlled buildings, cool in the summer, warm in the winter, protecting from solar radiation
Cuisine	Food additive, decorative ingredients

6 Production, import, export and price of gold

Gold production in Turkey firstly started officially in Ovacık (İzmir-Bergama) in 2001 with 1.4 tons. Turkey’s gold production has been presented for 21 years in Figure 2. With new mine operations the production of gold significantly increased to 45 tons in 2021. 427 tons gold has been produced between 2001-2021. However, the gold production does not meet the consumption of gold. Turkey is the fifth largest gold consumer in the world (US, India, Saudi Arabia, China and Turkey). The sectoral uses of gold in Turkey is given in Figure 3. The Figure indicates that most of the sectoral use of gold is related to the manufacture of jewellery at the present time. An increase in jewellery demand, an investment in gold decreases relatively. Because it has been treasured since ancient to current times for its beauty, power, esteem, and performance.

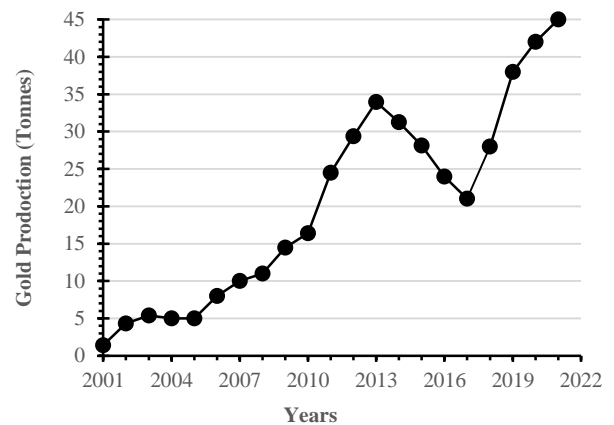


Figure 2. Turkey’s gold production [61]

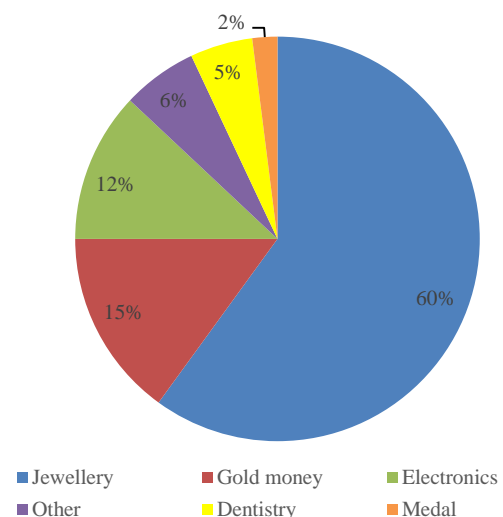


Figure 3. Sectoral use areas of gold in Turkey [62]

Gold mining operations/productions have been carried out by 52 % foreign international company capital and 48 % domestic company one. More than 6 billion dollars investments and providing 12000 person employment, tax paying equivalent 78 tons gold have been made from 2001

to 2021. Gold mining pays, 8 types of tax, 13.75 % state right due to increasing gold price, whereas other industries pay 4 types of tax. Turkey’s purpose is that if sustainability in gold mining is ensured, its gold demand will be met by the country’s own resources. Because necessary and required developments in gold sector chains is mostly completed. These are given as follows:

- ✓ High gold demand approximately 170 tons /year
- ✓ High gold potentials/resources about 6500 tons
- ✓ 45 tons gold production in 2021, estimated 50 tons/year for future use
- ✓ Four international accredited gold refiners
- ✓ A gold stock market
- ✓ Developed and strong Jewellery industry

Turkey is one of the world’s most important gold importers. In the last 26 years, an average of 167 tons /year, a total of 4352 tons gold has been imported. Turkey’s gold import between 1995-2021 years is shown in Figure 4. When the current price of gold is taken into account, 9.7 billion dollars are paid each year for gold import. The payments significantly affects foreign trade deficit. The demand from the country may continue to accelerate its production. The metal has a long and significant history in the nation and investors have tuned to gold to act as a hedge against inflation and declining paper currency values. Exploration incentives for gold mining should be regulated and bureaucratic processes could be reduced in state institutions. This will ensure to increase gold production.

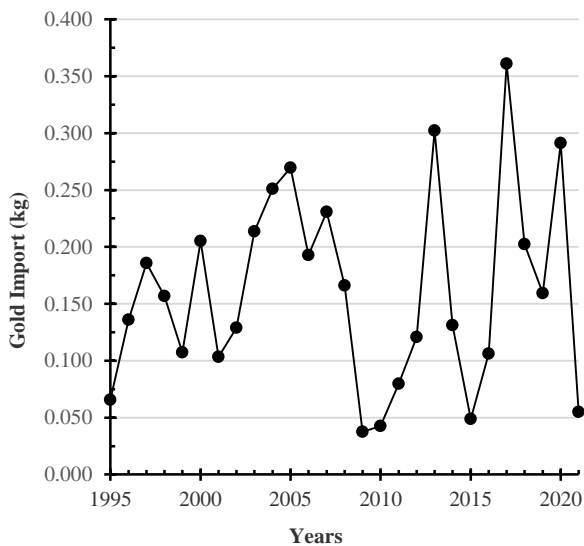


Figure 4. Turkey’s gold import [75]

Turkey gold is exported as jewellery. Its export and import are presented as monetary in Table 8. The jewellery export has been made in the last two decades. The trade provides 5 billion dollars in 2019. This can be interpreted as significant performance. Domestic demand for gold jewellery has become narrow due to jewellery containing high labour cost and various investments in Turkish economy. These narrowing leads foreign markets to face jewellery industry.

Table 8. Gold jewellery export and import of Turkey[73, 74]

Year	Export (x10 ⁶ US dollars)	Import (x10 ⁶ US dollars)
2000	384.2	55.4
2001	431.1	51.0
2002	567.5	67.8
2003	707.8	93.3
2004	931.9	135.2
2005	1.128	174.1
2006	1.097	235.3
2007	1.490	370.5
2008	1.585	430.8
2009	1.087	211.6
2010	1.444	282.6
2011	1.847	349.6
2012	2.562	420.3
2013	3.307	664.5
2014	4.244	611.4
2015	3.660	367.9
2016	3.676	369.6
2017	4.035	513.7
2018	4.308	806.2
2019	5.000	1.572

Knowledge of historical gold price may potentially affect its buying and selling potential [76]. Throughout history, the price of gold has been substantially influenced by many different factors such as central bank buying, inflation, geopolitics, monetary policy equity markets, pandemic reasons (e.g. recent Covid 19), war, international politics, bank interest and many more. Changes in the gold price are significantly driven by currency values. Because gold is dominated in dollars which can have an important impact on the gold performance. A strong dollar makes gold more expensive for international buyers. However, a weaker dollar makes gold relatively less expensive for foreign buyers. Money currencies in the past several years have exhibited an inclination to downgrade its value. Gold price could generally continue to increase over and most probably the future as well. Thus, gold has long been regarded a reliable store and safe reserve of wealth and value, the reputation is likely to continue the future. Gold prices in US dollars per troy ounce for 22 years (between 2002-2022) have been annually given in Figure 5. The Figure indicates that gold prices gradually increase and makes the highest peak value at last quarter time of 2011, nearly \$1900. Gold has ever since been moving lower and it has pulled back to \$1100 at 2016. There were fluctuating changes in its prices between 2016-2019 years, then its price continues to rise average \$2000 2020-2022 years most probably due to Covid 19 pandemic and recent Russian and Ukrainian war conditions.

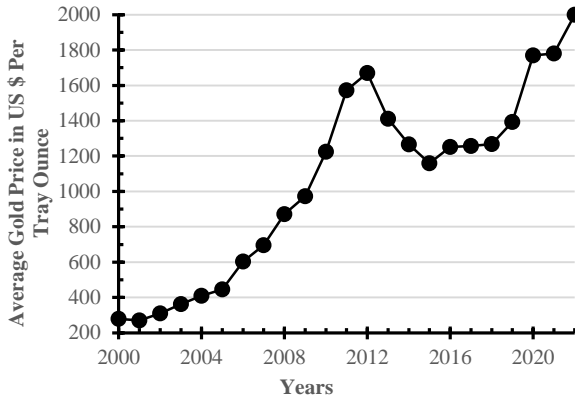


Figure 5. Annual average gold price from 2000-2022 [77]

7 Conclusions

Main conclusions from the study can be drawn as the follows:

Epithermal, porphyry gold, VMS, orogenic gold and placer gold are the most economic gold deposit types in Turkey. Generally geochemical exploration techniques have been applied to discover gold deposits of Turkey. However, past experiences have indicated that geochemical technique have not been successful in most cases. Thus, detailed geological considerations should focus on the first stages of exploration, typically prospect and testing evaluation. Ore forming system with genetic models, combining all the available data (e.g. geochemical, lithological, structural, alteration, mineralogical) need to be evaluated together in order to obtain a well understanding of geologic frame study. Although Turkey has a long history of metal mining and geology, the country started gold production in 2001. The gold production is generally made in west of Turkey. However, east and southeast Turkey has wilderness comparing to the west for gold prospecting and exploration. Turkey having active geological environment, high gold potential and resources, is attractive and favourable country for investment of gold mining.

Flotation, heap and tank leaching technologies have mostly been applied to extract or recover from gold ore. Heap leaching method is more economic than other methods, especially when applicable to low grade gold.

Gold has been used in many areas from ancient time such as investment asset, jewellery fabrication, purchasing of global central banks, technology, and industry.

Performance of gold price is driven by many factors such as real interest rates, economic uncertainty (e.g. market volatility linked to COVID), geopolitics (e.g. Russian invasion to Ukraine), global currency crises, bond bull market, commodity bull markets, trading tensions or a combination of few or all. Gold price likes especially elevated inflation, falling of real interest rates, market pullbacks, jewellery, and central bank demand. These variables increase the gold price.

Gold mining industry in Turkey is small compared to other gold producer countries in the world, however, the industry is growing rapidly. Turkey's gold production, started in 2001 with 1.4 tons, has gradually risen every year with 45 tons in 2021. On the other hand, Turkey's gold

consumption is 3.5 times much as its gold production. Turkey has paid approximately 6.5 billion dollars (importing annually average 150-160 tons gold) every year in the last 25 years. The payment significantly affects foreign trade balance deficit.

Gold fabrication makes significant contributions to Turkish economy. Turkey exported the products of jewellery fabrication for at least 5 billion dollars value last year. The value chain also supports 6.000 gold fabricators, 40.000 retail outlets and employs approximately 260.000 people.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 20%

References

- [1] W. J. Young, The fabulous gold of the Pactolus valley, Boston Museum Bulletin 70 (359), 5-15, 1972.
- [2] MTA, Ore deposit inventory of Turkey. MTA Publication, 179, 571 page (in Turkish), 1980.
- [3] MTA, Gold and silver inventory of Turkey. MTA Publication, 198, 46 page (in Turkish), 1993.
- [4] T. Engin, Y. Z. Özkan, F. Şener, F. and B. Toprak, Metallogenic map of Turkey. MTA publication, Ankara, 2000.
- [5] Tollon, F. Courjault-Rade, P. and Bache, J-J. A metallogenic marker of Tethyan geodynamic evolution. In: The Economic Gold Deposits of Southeast Asia, the Caaribes and Alpine-Himalayan Fold Belts. A.E.M Narin, B. Vrielynck, J. Dercourt (Editors), 393-416, Plenum Press, New York, 1995. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1558-0_13,
- [6] Türkiye altın üretmi, <https://altinmadencileri.org.tr/turkiye-altin-uretimi-2/>, Accessed 15 February 2022.
- [7] Robert, F. Poulsen, K.H. and Dube, B. Gold deposits and their geological classification. In: Proceedings of Exploration: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration, A.G. Gubins, (Editor), pp. 209-220, 1997.
- [8] Çolak, H.I. Türkiye altın-gümüş envanteri. Envanter Serisi-206, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 2017.
- [9] W. Lindgren, Mineral Deposits, 4 th Edition, McGraw Hill, New York, 1933.
- [10] J.W. Hedenquist, J.W. and J. B. Lowenstern, The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions, evidence from active geothermal systems and implications to zoning of ore deposition. Economic Geology, 80 (5), 1379-1406, 1994. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.5.1379>
- [11] J. W. Hedenquist, Recognition of magmatic contributions to active and extinct hydrothermal system. Japan Geological Survey Report, 279, 68-79, 1992.
- [12] N. C. White, and J.W. Hedenquist, Epithermal gold characteristics and exploration. SEG Newsletter, 2-5, 9-13, 1995.
- [13] B. R. Berger and P. Ejman, Conceptual models of precious metal deposits. In Cameron Volume on Unconventional Mineral Deposits, W. C. Shanks,

- (Editor), Society of Mining Engineers of AIME, 191-205, 1983.
- [14] Ö. Yiğit, Gold in Turkey-a missing link in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 28 (2), 147-179, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.04.003>
- [15] R.H. Sillitoe, Indonesian mineral deposits-introductory comment, comparisons and speculations. *Journal of Geochemical Exploration*, 50, 1-11, 1994. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90020-5)
- [16] E.H. Macdonald, *Handbook of gold exploration and evaluation*. Wood Head Publishing Limited, Cambridge, 2007.
- [17] Eldorado Gold, Kışladağ gold mine, Turkey, technical report. Final Report, (Unpublished), 2020.
- [18] Kışladağ gold mine, <https://www.eldoradogold.com/assets/operations-and-projects/europe/operations/kisladag-turkey/default.aspx>, Accessed 10 January 2022
- [19] Kışladağ altın madeni, <https://www.tuprag.com.tr/kisladag-altin-madeni/>, Accessed 10 January 2022
- [20] Türkiye altın madenleri, https://en.wikipedia.org/wiki/Ki%C5%9Flada%C4%9F_mine, Accessed 11 January 2022.
- [21] Çöpler-Erzincan altın madeni <http://www.anagold.com.tr/>, Accessed 11 January 2022.
- [22] Madencilik Türkiye, 2020, Ülkemizin işletilen ve geliştirme aşamasında olan altın projeleri. *Madencilik ve Yerbilimleri Dergisi*, 91, 72-76, 2020.
- [23] Çöpler gold mine, <https://www.lidyamadencilik.com/projects/copler-gold-mine>, Accessed 12 January 2022.
- [24] H. Yılmaz, Ovacık gold deposit: an example of quartz-adularia-type gold mineralisation in Turkey. *Economic Geology*, 97 (8), 1829-1839, 2002. <https://doi.org/10.2113/97.8.1829>
- [25] Ovacık altın madeni, <https://kozaaltin.com.tr/operasyonlar-ve-projeler/ovacik-altin-madeni/>, Accessed 15 January 2022.
- [26] Efemcukuru altın madeni, <https://www.tuprag.com.tr/efemcukuru-altin-madeni/>, Accessed 15 January 2022.
- [27] Eldorado Gold, Efemcukuru gold mine, Turkey, technical report. Final Report, (Unpublished), 2020.
- [28] T.İ. Turan, Kaymaz (Eskişehir) ve Himmetdede (Kayseri) altın yataklarının jeolojik özelliklerinin karşılaştırılması. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2018.
- [29] Himmetdede altın madeni, <https://www.kozaaltin.com.tr/operasyonlar-ve-projeler/himmetdede-altin-madeni/>, Accessed 20 January 2022.
- [30] Kaymaz altın madeni, <https://www.kozaaltin.com.tr/operasyonlar-ve-projeler/kaymaz-altin-madeni/>, Accessed 20 January 2022.
- [31] Mastra altın madeni, <https://kozaaltin.com.tr/operasyonlar-ve-projeler/mastra-altin-madeni/>, Accessed 20 January 2022.
- [32] A. Ersoy and T.Y. Yünsel, Hazine Mağara (Gümüşhane) polimetallik maden (Au, Ag, Cu, Pb, Zn) yatağının işletme tasarım ve üretim planlamasına yönelik rezerv ve tenor modelleme raporu. Çukurova Üniversitesi, Adana, (Unpublished Report), 2010.
- [33] Çukuralan altın madeni, <https://kozaaltin.com.tr/operasyonlar-ve-projeler/cukuralan-altin-madeni/>, Accessed 20 January 2022.
- [34] Ö. Dumanlılar, İ. Cihan, M. Ekmekçi, G. Kanaat, C. Aydoğan and O. Turunç, Bakırtepe (Sivas-Kangal) altın cevherleşmesinin oluşum ve zenginleşme evrelerinin kavramsal modeli. *Yerbilimleri*, 40 (2), 136-167, 2019. <https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.519195>
- [35] Bakırtepe altın madeni, <https://www.demirexport.com/En/Pages/ContentDetail.aspx?GMID=572>, Accessed 22 January 2022.
- [36] Öksüt altın madeni, <https://oksutmadencilik.com.tr/en/>, Accessed 22 January 2022.
- [37] A. Aluç, İ. Kuşcu, M. Cihan, D. C. Serçe and S. Bekarslan, Öksüt (Develi, Kayseri, Türkiye) yüksek sülfidasyon epitermal altın cevherleşmesinin jeolojisi-mineralojisi zamanlaması ve kökensel araştırılması. 70. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özetleri, 2017.
- [38] Lapseki altın madeni, <https://www.tumad.com.tr/en/lapseki>, Accessed 25 January 2022.
- [39] İvrindi altın madeni, <https://www.tumad.com.tr/ivrindi-altin-ve-gumus-madeni>, Accessed 25 January 2022.
- [40] Sart altın madeni, <https://www.pomzaexport.com/tr/>, Accessed 30 January 2022.
- [41] Bolcardağ altın madeni, <https://kurmelgroup.com/gumustas-madencilik/>, Accessed 30 January 2022.
- [42] N. Şişman and H. Şenocak, Bolcardağı yöresinin jeolojisi ve maden yatakları. Maden Tetkik Araştırma Enstitüsü, Ankara, (Unpublished Report), 1981.
- [43] Altıntepe altın madeni, <https://www.sandstormgold.com/our-royalties/altintepe/>, Accessed 5 February 2022.
- [44] Midi Altın madeni, <http://yildizlarssholding.com.tr/en/yildiz-bakir-madencilik>, Accessed 7 February 2022.
- [45] İnlice altın madeni, <https://www.esan.com.tr/tr/uretim/metalik-maden-tesislerimiz>, Accessed 10 February 2022.
- [46] Madencilik Türkiye, Esan İnlice de kapasite artışına gidiyor. *Madencilik ve Yerbilimleri Dergisi*, 2020.
- [47] M.H. Terzi, 2020, İnlice (Konya) epitermal altın yatağının Jeolojisi, jeokimyası ve kökensel incelenmesi. Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, (Unpublished), 2020.
- [48] Kızıltepe altın madeni, <http://www.zenitmadencilik.com/projeler/kiziltepe-altin-gumus-madeni-projesi>, Accessed 5 March 2022.
- [49] B. Uğurlu, Kızıltepe low – sulphidation epithermal deposit (Sındırgı, Balıkesir): An example for relay-ramp-hosted epithermal gold mineralisation in western Turkey. MSc Thesis, Middle East Technical University, Geological Engineering, (Unpublished), 2019.

- [50] SRK Consulting (Canada) Inc., Preliminary economic assessment on the Taç and Çorak Deposits, Yusufeli Property, Artvin Province, Turkey. Project number 2CMO26.00 (Unpublished), 2011.
- [51] Aği Dağı altın madeni, <https://miningdataonline.com/property/3102/Agi-Dagi-Project.aspx>, Accessed 20 February 2022.
- [52] Kirazlı altın madeni, <https://www.alamogold.com/operations/development-projects/turkish-development-projects/default.aspx>, Accessed 20 February 2022.
- [53] Yenipazar altın madeni, https://www.aldridge.com/tr/operations_yenipazar-project.html, Accessed 1 March 2022.
- [54] Artmin Madencilik and Sandstorm Gold Royalties, Hod Maden project, Feasibility study –Technical Report NI 43-101 (Unpublished), 2021.
- [55] Hod altın madeni, <https://www.lidyamadencilik.com/projeler/hod-maden>, Accessed 1 March 2022.
- [56] Taç-Çorak altın madeni, <https://www.sandstormgold.com/our-royalties/yusufeli/>, Accessed 5 March 2022
- [57] Tavşanlı altın madeni, <http://www.zenitmadencilik.com/projeler/kutahya-tavsanli-altin-gumus-madeni-projesi>, Accessed 13 February 2022.
- [58] R.H. Sillitoe, Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. In: S. Hageman, P.E. Grand Brown (Eds), Gold in 2000, Reviews in Economic geology, 13, 315-345, 2000. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.09>
- [59] R. Dunne, Flotation of gold and gold-bearing ores. In: Gold Ore Processing. M. D. Adams (Editor), 315-337, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00020-7>
- [60] A.J. Teague, J.S.J. Van Deventer and C.I. Swaminathan, A conceptual model for gold flotation. Minerals Engineering, 12, 1001-1019, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00087-4)
- [61] S. Liu, X. Chen, R. Lauten, Y. Peng and Q. Liu, Mitigating the negative effects of clay minerals on gold flotation by a lignosulfonate-based biopolymer, Minerals Engineering, 126, 9-15, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.021>
- [62] R. Dunne, Flotation of gold and gold-bearing ores. In: Advances in Gold Ore Processing, Developments in Mineral Processing 15. M.D. Adams (Editor), 2005, Elsevier, Amsterdam.
- [63] K.S. Fraser, R.H. Walton and J.A. Wells, Processing of refractory gold ores. Minerals Engineering, 4, (7), 1029-1041, 1991. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90081-6](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90081-6).
- [64] K.G. Thomas and M.S. Pearson, Pressure Oxidation Overview. In: Gold Ore Processing, Project Development, and Operations, M. Adams (Editor, 2nd Edit.), Elsevier, Great Britain, 341-358, 2016.
- [65] A.M. Ivana, Fundamentals of partial pressure oxidation of gold-bearing sulphide minerals, Ph.D. thesis, University of Queensland, School of Chemical Engineering, Australia, 2020.
- [66] V.G. Papangelakis and G.P. Demopoulos, Acid pressure oxidation of pyrite: reaction kinetics. Hydrometallurgy, 26, (3), 309-325, 1991. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(91\)90007-9](https://doi.org/10.1016/0304-386X(91)90007-9).
- [67] L. Rusanen, J. Aromaa, O. Forsen, 2013, Pressure oxidation of pyrite-arsenopyrite refractory gold concentrate. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 49 (1), 101-109., 2013 <https://doi.org/10.5277/ppmp130110>.
- [68] T. Thenepalli, R. Chilakala, L. Habte, L.Q. Tuan, C.S. Kim, A brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals. Sustainability, 11, 3347-3352, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11123347>
- [69] Y. Ghorbani, J.P. Franzidis, J. Petersen, Heap leaching technology-current state, innovations, and future directions: A review. Mineral Processing Extractive Metallurgy Review, 37 (2), 73-119, 2016. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
- [70] J. Petersen, Heap leaching as a key technology for recovery of values from low grade ores A brief overview. Hydrometallurgy 165, 206-212, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.001>
- [71] D.W. Kappes, Precious metal heap leach design and practise. In Mineral Processing Plant Design, Practise and Control, A.L. Mular, D.N. Haibe, D.J. Barrett, Eds.; Society for Mining Metallurgy and Exploration: Denver, 2, 1606-1630, 2002.
- [72] R.H. Sillitoe, Gold rich porphyry copper deposit: geological model and exploration implications, In Mineral Deposit Modelling, R.V. Kirkham, W.D., Sinclair, R.I. Thorpe and J.M. Duke, Eds, Geological Association Canada Special Paper 40, 465-478, 1993.
- [73] Değerli metaller, <https://www.tuik.gov.tr/>, Accessed 20 March 2022
- [74] Metal ticareti, <https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/M%C3%9CCEVHERA T%20SEKT%C3%96R%20RAPORU%202020.pdf>, Accessed 20 March 2022.
- [75] Altın ithalatı, https://borsaistanbul.com/dosyalar/kmtp/veriler/ith_au.pdf, Accessed 22 March 2022.
- [76] Altın talebi, <https://www.gold.org/goldhub/research/demand-and-supply>, Accessed 24 March 2022.
- [77] Metal fiyatları, <https://borsaistanbul.com/tr/sayfa/316/metal-fiyatlari>, Accessed 24 March 2022.





Soda ve MgO ile aktive edilmiş Kalecik bentonit örneğinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi

Investigation of some physical properties of Kalecik bentonite sample activated with soda and MgO

Turan Kılınc^{1,*}, Yakup Cebeci², Mehmet Sabri Çelik³

¹ Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Öz

Bentonitlerin endüstride kullanılabilmesi için bazı standartları (şişme, viskozite, filtrasyon kaybı değerleri gibi) sağlaması gerekmektedir. Bu özellikleri sağlayan ve herhangi bir işleme tabii tutulmadan kullanılan bentonit yatakları bulunmaktadır. Ancak, bunun yanında pek çok bentonit yatağı istenilen özellikleri taşımamaktadır. Bu çalışmada Kalecik bentonit örneğinin endüstriyel özelliklerini geliştirmek amacıyla soda ve MgO ile aktivasyon çalışmaları yapılmıştır. Bulgularda soda ile aktive edilen bentonit örneklerinin katyon değişim kapasitesi (KDK), şişme, viskozite, likit limit değerlerinde kısmi iyileşmeler (KDK 89.67 meq/100 g, şişme 16 ml, viskozite 8.5 cP, likit limit %201) olduğu görülmüştür. Filtrasyon kaybı değerinin (26,8 ml) ise başlangıçta değişmediği, bununla birlikte artan katkı oranlarında filtrasyon kaybının arttığı görülmüştür. MgO katkısı ile yapılan deneylerde de benzer bulgular (KDK 70.65 meq/100 g, şişme 15 ml, viskozite 8 cP, likit limit %211) elde edilmiştir. MgO katkısı kullanılan deneylerde filtrasyon kaybı değerlerinin ham örneğe göre daha fazla arttığı izlenmiştir. En düşük filtrasyon kaybının 29.2 ml olduğu görülmüştür. Fiziksel özelliklerdeki değişimler, aktivasyon sonucunda bentonit birim tabakalarındaki Na⁺ ve MgO⁺² iyonlarının artmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bentonit, Aktivasyon, Soda, MgO

1 Giriş

Bentonit; camsi, genellikle volkanik kül veya tüf malzemenin kimyasal alterasyon ya da devitrifikasyon sonunda oluşmuş, kristalin kil benzeri mineraller içeren bir kayaç olarak tanımlanmıştır [1]. Ayrıca, bentonit kayacının çoğunlukla montmorillonit minerali ve daha az sıklıkla beydellit minerali bileşiminde olduğu belirtilmiştir [2,3]. Bununla birlikte volkanik kül veya tüfün bozulması ile oluşmayan veya kökeni tam olarak bilinmeyen bentonit olarak tanımlanan killer de bulunmaktadır. Bentoniti başkını olarak oluşturan smektitler (montmorillonit) kristal yapısına göre; üç katlı (T.O.T) killer arasında yer almakta ve iki silika tetrahedral (T) tabaka ile merkezde oktahedral (O) bir tabakadan meydana gelmektedir [4,5]. Tetrahedral yapı üç tanesi temel (alt) düzlemde bir tanesi üst uç köşede, eşit

Abstract

Bentonites must meet some standards (such as swelling, viscosity, filtration loss values) in order to be used in industry. There are bentonite deposits that provide these properties and are used without any processing. However, many bentonite deposits do not have the desired properties. In this study, activation studies were carried out with soda and MgO in order to improve the industrial properties of Kalecik bentonite sample. In the findings, it was observed that the cation exchange capacity (KDK), swelling, viscosity, liquid limit values of the bentonite samples activated with soda were partially improved (KDK 89.67 meq/100 g, swelling 16 ml, viscosity 8.5 cP, liquid limit 201%). It was observed that the filtration loss value (26.8 ml) did not change at the beginning, however, it increased with increasing additive ratios. Similar findings (KDK 70.65 meq/100 g, swelling 15 ml, viscosity 8 cP, liquid limit 211) were obtained in experiments with MgO additive. In experiments using MgO additive, it was observed that the filtration loss values increased more than the raw sample. The lowest filtration loss was found to be 29.2 ml. Changes in physical properties were associated with the increase of Na⁺ and MgO⁺² ions in bentonite unit layers as a result of activation.

Keywords: Bentonite, Activation, Soda, MgO

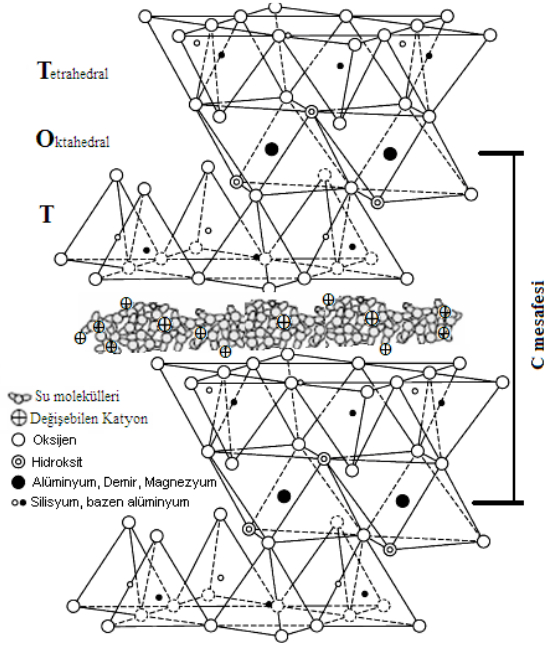
uzaklıkta olmak üzere dört oksijen veya hidroksil atomu ile merkezde bir silisyum atomuna sahiptir. Oktahedral tabaka merkezinde alüminyum, demir veya magnezyum atomlarından birinin, kendinden eşit uzaklıkta altı adet oksijen atomu veya hidroksil iyonu ile çevrelenmesiyle oluşmuştur [6,7]. Bentonitin kristal yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

Bentonit, sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, endüstride birçok sektörde kullanım alanına sahiptir [8,9]. Kullanım alanları arasında başlıca döküm ve sondaj sektörü olmak üzere, ilaç, seramik, kâğıt, lastik, inşaat, temizlik, gübre, yangın söndürücü ve boya gibi sektörler bulunmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tkilinc@cumhuriyet.edu.tr (T. Kılınc)

Geliş / Received: 11.04.2022 Kabul / Accepted: 06.09.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1101636



Şekil 1. Bentonit'in Kristal Yapısı [8]

Bentonit, birim katmanların arasında bulunan değişebilir katyonların türüne ve miktarına göre; Na-bentonit, Ca-bentonit ve ara (mix) tip bentonit olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [10]. Genel olarak aktivasyon işlemleri kalsiyum ve diğer alkali bentonitlerin kullanım alanlarını genişletmek, kalitesini yükseltmek amacıyla yapılmaktadır. Aktivasyon işleminde, soda (Na_2CO_3) veya hafif soda (NaHCO_3) kullanılarak iyon değiştirmek suretiyle şişme oranı yüksek, Na- bentonit üretilmektedir. Endüstride aktivasyon, ocaktan çıktığı haliyle bentonite toz ya da solüsyon halindeki sodayı karıştırarak gerçekleştirilmektedir.

Bentonitin özelliklerini geliştirmek amacıyla ve aktive etmek için Na_2CO_3 , NaOH , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, MgO , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ gibi katkı maddeleri ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır [11-16]. Literatürde, Na^+ içeriğinin reolojik özellikleri artırmada en önemli parametre olduğu, ayrıca daha iyi jel mukavemeti sağlamak için ise Mg^{+2} iyonlarının gerekliliği belirtilmiştir [17,18]. Hofmann ve Endell [19] tarafından önerilen aktivasyon işleminde, %35-40 nemlendirilen bentonit genellikle %1-5 soda ile aktive edilmiştir [20-22]. Bentonitlerin aktivasyonunda farklı araştırmacılar tarafından suda çözünen polimerler ve benzer bileşiklerin karışımları da kullanılarak araştırmalar yapılmıştır [23-28, 18].

Bu çalışma kapsamında, Kalecik bentonit örneğinin endüstride kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kullanım alanlarını geliştirmek için soda ve MgO ile aktive edilmiştir. Aktive edilmiş örneklerle, katyon değişim kapasitesi (KDK), şişme, viskozite, filtrasyon kaybı ve likit limit deneyleri yapılarak elde edilen bulgular, ham örneğe ait değerlerle birlikte değerlendirilmiştir.

2 Malzeme ve yöntem

2.1 Malzeme

Deneylerde, ticari ismi Kalecik olan ve Çankırı-Türkiye'de faaliyet gösteren bir bentonit firmasından alınan

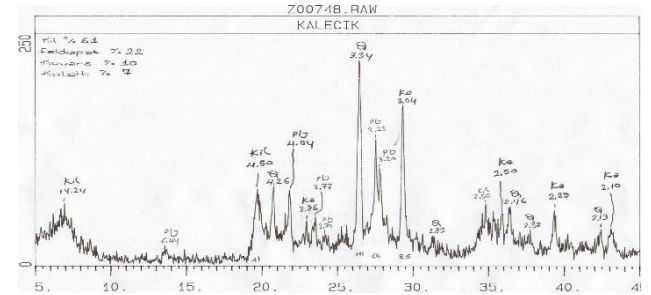
bentonit örneği kullanılmıştır. Tane iriliği $+10 \text{ cm} +0,19 \text{ mm}$ numuneden konileme-dörtleme yolu ile temsili numuneler alınmış ve ağızları bağlı poşet torbalar içerisinde muhafaza edilmiştir.

Kalecik bentonit örneğinin XRD analizi C.Ü. Müh. Fak. Jeoloji Müh. Böl. MİPJAL laboratuvarında, kimyasal analizi ise Yibitaş Lafarge (eski ismi ile) Çimento fabrikası kimyasal analiz laboratuvarında yapılmıştır. Bentonit örneğine ait kimyasal analiz değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Mineralojik analiz sonuçlarında montmorillonit %61, feldispat %22, kuvars %10 ve kalsit %7 oranında bulunmuştur (Şekil 2).

Tablo 1. Kalecik bentonitinin kimyasal analiz sonuçları

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	A.Z.
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
60.20	15.76	5.29	2.45	4.76	2.25	1.71	7.58

Kimyasal analizler sonunda elde edilen değerler bentonit örneğinin $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/(\text{CaO} + \text{MgO})=0,55$ ara tip (Na-Ca) bentonit olduğunu göstermiştir (Tablo 1). Bu oran $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/(\text{CaO} + \text{MgO})$ 1'e eşit veya 1'den büyükse Na bentonit, 1'den küçük veya $1/3$ 'e kadar ise Na-Ca bentonit (ara tip), $1/3$ 'den küçükse Ca bentonit olarak kabul edilmektedir [29].



Şekil 2. Kalecik bentonitinin XRD analiz sonuçları

2.2 Yöntem

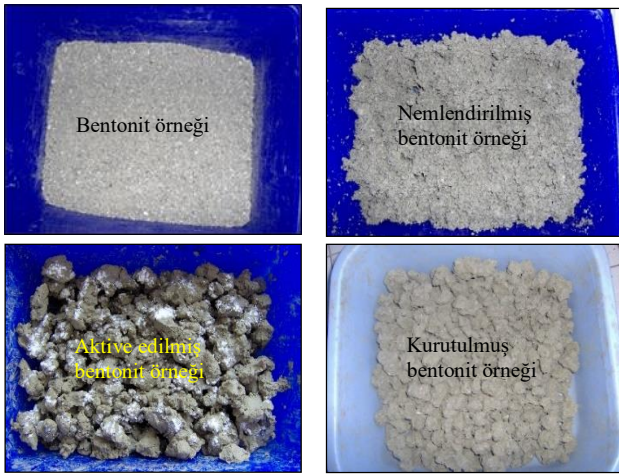
Deneylerde kullanılan bentonit örneklerine ait katyon değişim kapasitesi (KDK) değeri, ASTM 837 C standardına göre metilen mavisi testiyle belirlenmiştir. Şişme değerleri, 100 ml saf su içerisindeki kurutulmuş 2 gr toz haldeki bentonit hacmini ifade etmektedir (ASTM D 5890-95). Karışımın viskozitesi ve filtrasyon kaybı Fann marka cihazlar kullanılarak ölçülmüştür. Viskozite değerleri Amerikan Petrol Enstitüsü API (Amerikan Petrol Enstitüsü) standartlarına göre %6 bentonit içeren süspansiyonda ölçülmüştür. Likit limit değerleri TS 1900 standartları kullanılarak bulunmuştur. Kalecik ham bentonit örneğine ait fiziksel özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bentonitin bazı fiziksel özellikleri

KDK, meq / 100 g	59.78
Şişme İndeksi, ml	12.00
pH	9.75
FANN Viskozitesi (24 saat)	
300 dev/dk	4.00
600 dev/dk	8.00
Filtrasyon Kaybı, ml	26.80
Likit Limit, %	198

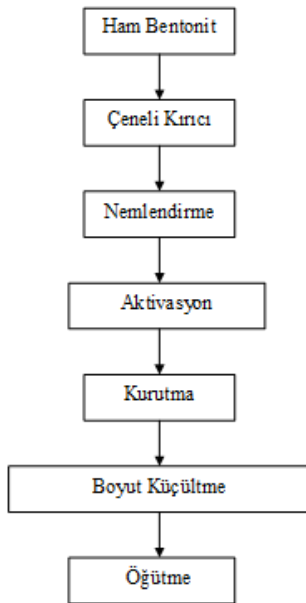
2.3 Bentonit aktivasyonu

Bu çalışmada, kuru aktivasyon yöntemi uygulanmıştır. Aktivasyon işlemlerinde soda (Na_2CO_3 , Merck, $M=105.99$ g/mol, %99.9 saflıkta) ve MgO (Merck, $M= 40.30$ g/mol, %98-100.5 saflıkta) kullanılmıştır. Kuru aktivasyonda ürünün ocaktan çıktığı nem durumu (~%40) esas alınmıştır. Ham bentonit örnekleri çeneli kırıcı yardımıyla +2 mm boyutuna kadar kırılmış, daha sonra nemlendirme yapılmıştır. Nemlendirme işlemi su püskürtülerek ve karıştırılarak yapılmıştır. Örnekler üzerine sırasıyla ağırlıkça (kuru esasta) %0.5, %1, %2, %3 oranında toz haldeki soda ve MgO serpiştirilerek elle karıştırma işlemi yapılmıştır. Aktivasyon işlemine ait aşamalar Şekil 3'de, aktivasyon akım şeması ise Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. Aktivasyon aşamaları

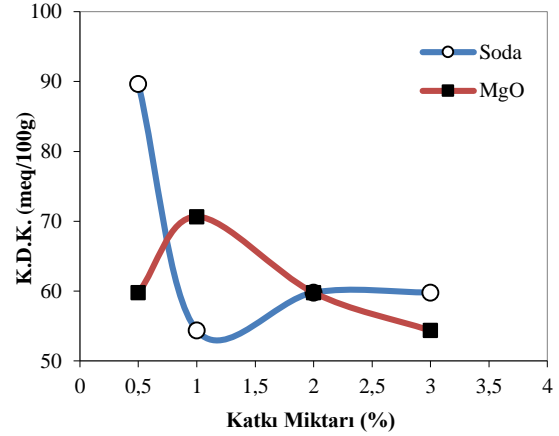
Aktive edilmiş bentonit örnekleri atmosfer koşullarında 15-20 gün bekletilerek nem oranı düşürüldükten sonra 60 °C'de etüvde kurutulmuştur. Kurutulan örnekler deneylerde kullanılmak üzere $-150 \mu\text{m}$ 'ye öğütülmüştür.



Şekil 4. Aktivasyon akım şeması

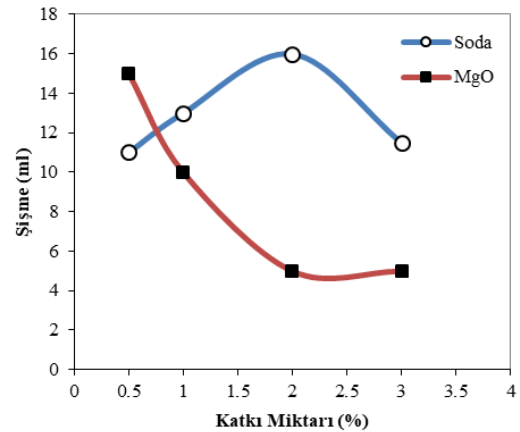
3 Bulgular ve tartışma

Aktive edilen örneklerin KDK değerleri Şekil 5'de verilmiştir. Soda ile aktivasyon sonucunda elde edilen bulgularda bentonit örneklerinin KDK değerlerinin artan katkı oranı ile azaldığı, %2 soda katkı oranından sonra değişmediği görülmüştür. En yüksek KDK değerinin %0.5 soda katkı oranında 89.67 meq/100 g olduğu, MgO ile aktivasyonunda ise KDK değerinin en yüksek, %1 katkı oranında 70.65 meq/100 g olarak elde edildiği belirlenmiştir. Artan MgO katkı oranlarında ise azaldığı görülmüştür.



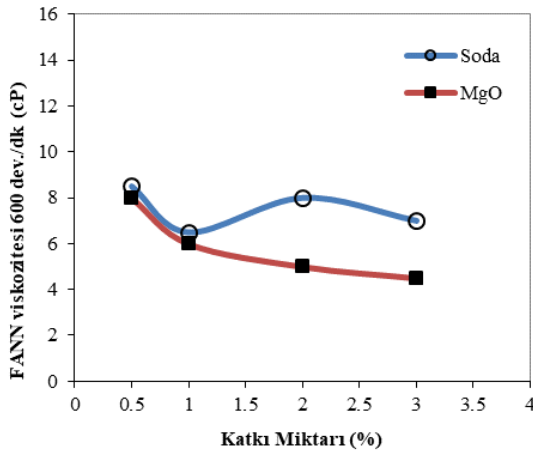
Şekil 5. Aktive edilmiş bentonit örneğinin KDK değerlerinin karşılaştırılması

Şişme değerlerinin değişimi Şekil 6'de verilmiştir. Genel olarak soda ile aktive edilmiş örneklerde şişme değerlerinde önce 16 ml'ye kadar bir artış sağlanmış, sonra 11,5 ml'ye kadar azalma görülmüştür. En yüksek şişme değeri %2 soda katkısında 16 ml olarak elde edilmiştir. MgO ile aktive edilmiş örneklerde artan katkı oranı ile şişme değeri 2.5-3.5 ml'ye kadar azalmıştır. En yüksek değer %0.5 katkı oranında 15 ml elde edilmiştir. Kalecik bentonitinin şişme değerlerinin bazı katkı oranlarında arttığı görülmüştür. Farklı bentonitlerle yapılan bazı aktivasyon çalışmalarında da şişme değerlerinin değişik katkı oranlarında artabileceği belirtilmiştir. [16,18,30].



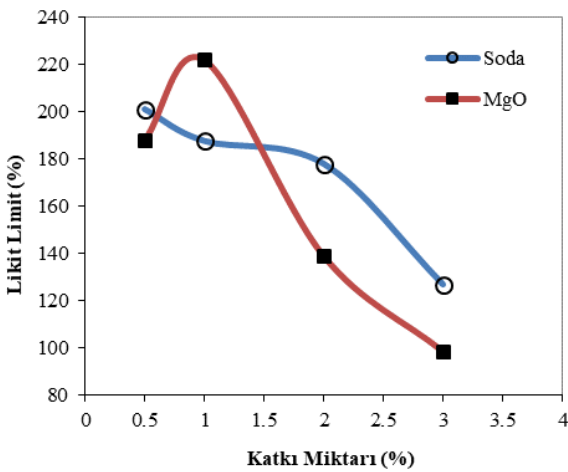
Şekil 6. Aktive edilmiş bentonit örneğinin şişme değerlerinin karşılaştırılması

Viskozite ölçümlerinden elde edilen bulgular Şekil 7’de verilmiştir. Soda ile aktive edilmiş örneklerde en yüksek viskozite değeri %0.5 soda katkı oranında 600 dev/dk’da 8,5 cP olarak elde edilmiştir. Katkı oranlarının artmasına rağmen viskozite değerlerinin değişmediği 6.5 cP ve 8.5 cP arasında olduğu görülmüştür. MgO ile aktive edilmiş örneklerde en yüksek değer, 600 dev/dk’da 8 cP bulunmuştur. Katkı oranı arttığında viskozite değerlerinin azaldığı izlenmiştir. Kütle oranı $(Na_2O + K_2O)/(CaO + MgO) = 0.57$ olan ara tip bir bentonit örneği ile yapılan benzer bir çalışmada, soda veya MgO ile ayrı ayrı aktive edilen numunelerin viskozitelerinde önemli bir değişiklik görülmediği belirtilmiştir [18].



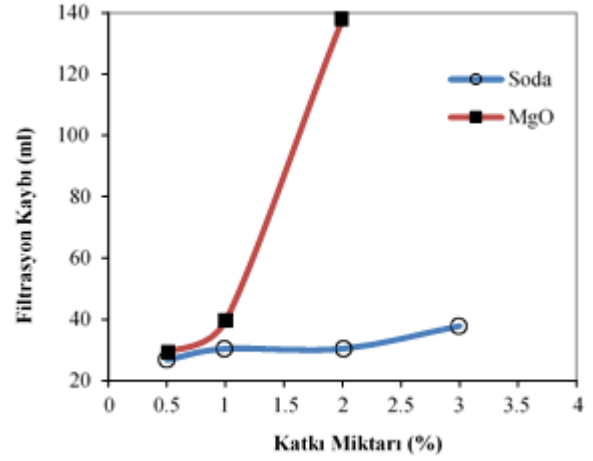
Şekil 7. Aktive edilmiş bentonit örneğinin 600 dev/dk viskozite değerlerinin karşılaştırılması

Likit limit değerlerinin katkı oranlarına göre değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Artan soda katkısıyla likit limit değerlerinde azalma görülmüştür. Soda ile aktive edilen örneklerde %0,5 katkı oranında en yüksek likit limit değeri elde edilmiştir (%201). Genel olarak MgO ile aktive edilen örneklerin likit limit değerleri artan katkı oranları ile azalmış ve ham örnekten daha düşük değerlere ulaşılmıştır. En yüksek likit limit değeri %1 MgO katkı oranında %222 olarak elde edilmiştir.



Şekil 8. Aktive edilmiş bentonit örneğinin likit limit değerlerinin karşılaştırılması

Filtrasyon kaybı değerlerinin katkı miktarına göre değişimi Şekil 9’de verilmiştir. Soda ile aktive edilen örneklerin filtrasyon kayıp değerleri ham örneğe yakın bulunmuştur. En az filtrasyon kaybı %0.5 soda katkı oranında (26.8 ml) elde edilmiştir. MgO ile aktive edilmiş örneklerde filtrasyon kayıpları ham örnekten çok daha fazla olmuştur. En az filtrasyon kaybı %0.5 MgO katkı oranında 29.2 ml olarak elde edilmiştir. Aktivasyonun filtrasyon kaybını olumsuz etkilediği, filtrasyon kaybı değerlerini artırdığı, benzer çalışmalarda da ortaya konmuştur [16,18].

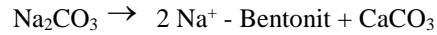
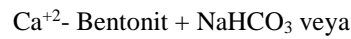


Şekil 9. Aktive edilmiş bentonit örneğinin filtrasyon kaybı değerlerinin karşılaştırılması

Endüstride bentonitlerin, viskozite ve şişme özelliklerinin yüksek, filtrasyon kaybının ise düşük değerlerde olması istenmektedir [31-33]. Genel olarak hem soda hem de MgO’ün düşük miktarlarda kullanıldığı aktivasyon ürünlerinde bentonitin bu fiziksel özelliklerinin geliştiği görülmüştür. Bentonit aktivasyonunun mekanizmalarının;

1. Genellikle iyon değişimi,
2. İyon adsorpsiyonu,
3. Parçacık-parçacık etkileşimleri (heterokoagülasyon)

şeklinde gerçekleşebileceği belirtilmiştir [18]. Örneğin iyon değiştirme yoluyla oluşan aktifleştirme reaksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.



Elde edilen bulgulardan görüldüğü gibi kation değişim kapasitesi (KDK), şişme, viskozite ve likit limit değerlerinde, bazı katkı oranlarında hem soda hem de MgO aktivasyonunda ham örnekten kısmen daha yüksek değerler elde edilmiştir. Düşük katkı oranlarında (%0,5) hem soda hem de MgO katkısında kdk değerlerinin artması bentonit tabakaları arasındaki değişebilir iyonların (Na^+ ve $MgO+2$) hareketliliğinden dolayı daha kolay yer değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Aktive edilen bentonitlerde Na^+ ve $MgO+2$ iyonlarının artması ile birim tabakalarının arasına daha fazla su moleküllerinin girmesiyle şişme değerlerinin arttığı

düşünülmektedir. Şişme değeri su moleküllerinin veya diğer polar iyonların birim tabakaların arasına girmesiyle, c eksenini yöündeki genişleme kapasitesidir (Şekil 1) [34,35].

Artan şişme nedeniyle, birim tabakalarının arasına daha çok su molekülünün girmesinden dolayı süspansiyon içerisindeki su miktarının azalarak ortamın viskozite ve likit limit değerlerinin arttığı düşünülmektedir. Artan aktivasyon katkılarında ise, hem soda hem de MgO'in çözünmeden kaldığı ve iyon değişiminin gerçekleşmediği, bu nedenle bentonitin fiziksel özelliklerinde iyileşmelerin olmadığı görülmüştür. Filtrasyon kaybı değerlerinde soda aktivasyonunda bir değişiklik olmazken MgO ile aktivasyonda daha yüksek değerler elde edilmiştir. Benzer şekilde, aktive olmadan ortamda kalan soda ve MgO nedeniyle bentonit tabakaları ortamda yeterince su molekülünü tutamadığından, filtrasyon kaybının arttığı ve bir iyileşmenin olmadığı belirlenmiştir.

4 Sonuçlar

Aktive edilmiş bentonit örneklerinin fiziksel özelliklerine ait değerlerde kısmen artışlar olduğu ortaya konmuştur. Ancak bu değer artışlarının düşük miktarlarda olduğu ve artan soda ve MgO katkılarında ise beklenen artışın olmadığı belirlenmiştir. Test edilen fiziksel özellik değerlerinin en çok kullanıldığı sondaj sektöründe API veya TS EN ISO 13500 standartları kullanılmaktadır. Bu standartlara göre viskozite en az 30 cP (600 dev/dk'da), filtrasyon kaybı en çok 15 ml ve şişme değeri en az 22 ml olmalıdır. [18,36]. Bulgular ham Kalecik bentonit örneğinin ve aktive edilmiş örneklerin bu standartların tamamını karşılayamadığını göstermiştir. Bu durum aktivasyon süresinin kısa olması ve karıştırma şekli gibi laboratuvar koşulları ile ilişkilendirilebilir. Daha sonra yapılacak aktivasyonda çalışmalarının daha uzun süre ve daha etkili bir karıştırma yöntemi ile yapılması önerilmektedir. Böylece daha iyi sonuçlar elde edilebileceği ve ilgili standartlara uygun olabileceği düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %3

Kaynaklar

- [1] C.S. Ross and E.V. Shannon, Minerals of bentonite and related clays and their physical properties, J. Am. Ceram. Sci. 9, 77-96, 1926. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1926.tb18305.x>
- [2] R.E Grim, Clay Mineralogy, 2nd edition. McGraw Hill, New York, 1968.
- [3] H.H Murray, Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays, Developments in Clay Science 2. Elsevier Publishing Company, 2007.
- [4] G.W. Brindley and G. Brown, Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification. Mineralogical Society, London, 1980.
- [5] M. Alastair, H. Andrew, P. Pascaline, E. Mark and W. Pete, Alkali activation behaviour of un-calcined

- montmorillonite and illite clay minerals. Applied Clay Science 166, 250–261, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.09.011>
- [6] R.E. Grim, Applied Clay Mineralogy. McGraw Hill, New York, Toronto, London, 1962.
- [7] S. Peker, E. Buyura, B.Yıldız, U. Köktürk, ve H. Yılmaz, Kil karışımlarının reolojik davranışlarında iyon değişiminin etkisi. 10. Ulusal Kil Sempozyumu. sayfa 18-26. Konya, 2001.
- [8] K. Çinku, F.Boylu, F. Duman ve M.S. Çelik, Bentonitlerin zenginleştirme ve soda ile aktivasyonunda sudaki iyon varlığı ve miktarının ürün özellikleri üzerindeki etkisi. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 1, 9-18, 2010.
- [9] S. Özgen, Düşük Kaliteli Bentonitlerin Knelson Konsantratör ile Zenginleştirilmesi. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 7(3), 1407-1416, 2020. <https://doi.org/10.31202/ecjse.750751>
- [10] J.A. Bain and D.J. Morgan, Laboratory separation of clays by hydrocycloning. Clay Minerals 18, 33–47, 1982.
- [11] F. Szanto, M. Gilde-Farkas, B. Varkonyi and J. Balazs, Binding of Na₂CO₃ by bentonite fractions. Acta Geol. Acad. Sci. Hung. 11(4), 409, 1967.
- [12] R.L. Bleifuss, Activation of non-swelling bentonite. Clay Minerals. 10(1), 1973. <https://doi.org/10.1180/claymin.1973.010.1.05>
- [13] G. Lagaly, M. Müller-Vonmoos, G. Kahr and R.Fahn, Vorgänge bei der Sodaaktivierung von Bentoniten am Beispiel eines Bentonits von Neuseeland. Keram. Z. 33, 278–283, 1981.
- [14] G.R. Alther, The role of bentonite in soil sealing applications. Bull. Assoc. Eng. Geol. 19(4), 401, 1982. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xix.4.401>
- [15] N. Yıldız, Y. Sarıkaya and A. Çalımlı, The effect of the electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na₂CO₃-activated Kütahya bentonite. Applied Clay Science 14, 319, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(99\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(99)00006-X)
- [16] F. Boylu, Modelling and optimisation of ageing characteristics of soda activated Na-bentonites. Appl. Clay Sci. 83(84), 300-307, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.024>
- [17] F. Lebedenko and D. Plee, Some consideration on the aging of Na₂CO₃ activated bentonites. Applied Clay Science 3, 1–10, 1988. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(88\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0169-1317(88)90002-6)
- [18] C. Karagüzel, T. Çetinel, F. Boylu, K. Çinku and M.S. Çelik, Activation of (Na, Ca)-bentonites with soda and MgO and their utilization as drilling mud. Applied Clay Science 48, 398–404, 2010. <https://doi.org/doi:10.1016/j.clay.2010.01.013>
- [19] U. Hofmann and K. Endell, British Patent 458240. 1936
- [20] S. Abend and G. Lagaly, Sol-gel transitions of sodium montmorillonite dispersions. Applied Clay Science 16, 201–227, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(99)00040-X)

- [21] F. Bergaya, B.K.G. Theng and G. Lagaly, Handbook of clay science. Conventional Applications, pp. 501–540. 2006
- [22] F. Boylu, Optimization of foundry sand characteristics of soda-activated calcium bentonite. Applied Clay Science 52, 104–108, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.02.005>
- [23] P.P. Scott and Jr. T. Okla, Low solids drilling fluid, US-Patent Office. US 3070543, 1962.
- [24] J.L. Lumus and T. Okla, Method of drilling with polymer-treated drilling fluid. US-Patent Office. US 3472325, 1969.
- [25] B.L. Swanson and B. Okla, Drilling fluids, US-Patent Office US 3525688, 1970.
- [26] Jr. J.E. Glass, Hec-bentonite compatible blends. US-Patent Office. US 4561985, 1985.
- [27] G.M. Bol, Bentonite quality and evaluation methods. Society of Petroleum Engineering Drilling Engineering 288–296, 1986. <https://doi.org/10.2118/13454-PA>
- [28] C.L. Burdick, Aqueous systems comprising an ionic polimer and a viscosity promoter, processes for their preparation, and uses thereof, US-Patent Office, US 6359040, 2002.
- [29] Y. Günay, S. Değirmenci, B. Şirin ve N. Akarlar, Türkiye'de döküm bentonitinin 2000'lerde iyileştirilmesi. Metalurji Dergisi 126, 13–19, 2001
- [30] A.L.V. Carmo, R.S. Angélic and S.P.A. Paz, Ageing characteristics related to cation exchange and interlayer spacing of some Brazilian bentonites. Heliyon Volume 7(2), 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06192>
- [31] M. A. Agha, R. E. Ferrell, G. F. Hart, M. S. A. El Ghar and A. Abdel-Motelib, Physical properties and Na-activation of Egyptian bentonitic clays for appraisal of industrial applications. Applied Clay Science 131, 74–83, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.016>
- [32] B. İpekoğlu, İ. Kurşun, Y. Bilge ve A. Barut, Türkiye bentonit potansiyeline genel bir bakış. II. Endüstriyel Hammaddeler sempozyumu, sayfa. 51–69, İzmir, 1997.
- [33] H.H. Murray, Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite, a general overview, Applied Clay Science 17, 207–221, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8)
- [34] B. Velde, Introduction to clay minerals-chemistry, orgins, uses and environmental significance. Chapman&Hall., 200 p, 1992.
- [35] H. Yalçın, Kil mineralojisi ve jeolojisi ders notları. Sivas, 2004.
- [36] İ. Acar, E. Doğan, F. Urhan, ve A.Ö. Ak, İki farklı polimerin sondaj çamuru özellikleri üzerine etkileri. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (20), 479-484. 2020. <https://doi.org/10.31590/ejosat.765132>





Türkiye madencilik sektöründe döngüsel ekonomi ve dijitalleşme uygulamaları

Circular economy and digitalization practices in the mining sector of Turkey

Mahmut Suat Delibalta^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Madencilik sektörü çalışma koşulları ve teknolojik ana işlemleri bakımından, diğer sanayi dallarından kısmen farklılıklar göstermektedir. Madencilik faaliyetleri sıklıkla zor/güç ortamlarda (yeraltı/yerüstü) ve kentsel yaşam alanlarından uzak bölgelerde gerçekleştirilmektedir. Sektörde yaşanan pek çok olumsuzluklara rağmen, maden dış ticaretinin ülkemiz ekonomisine katkısı (Madencilik/GSYH = %0.82~1.17) on yıllardır yaklaşık aynı seviyededir. Türkiye madencilik sektörü katma değer oranında bir artış sağlamak için, işletme faaliyetlerinin yasal ve teknolojik olarak yeniden tasarlanması gerekmektedir. Maden işletmelerinin günümüz rekabetçi piyasa koşullarında tutunması; ancak çalışma verimliliği yüksek, iş güvenliği ve işletme sermayesinin güçlü olması ile mümkündür. Bu yaklaşım; ekolojik ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir olan “döngüsel ekonomi” modelini ön plana çıkarmaktadır. Doğal kaynakları korumak ve bizlere sunduğu avantajlardan yararlanmak için, üretilen hammaddeleri daha efektif kullanmamız gerekmektedir. Ancak bu, mal ve hizmetleri üretme ve doğal kaynakları tüketme alışkanlıklarımızı değiştirmemize bağlıdır. Bu maksatla yapılan araştırmada, ülkemiz madencilik sektöründe döngüsel ekonomi ve dijitalleşme uygulamaları farklı bakış açısıyla irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Madencilik, Endüstri 4.0, Atıklar, Döngüsel ekonomi, Sürdürülebilirlik

1 Giriş

Günümüz teknoloji ve iş dünyası, dijitalleşme temelinde dördüncü sanayi devrimini ya da daha genel bir deyimle Endüstri 4.0 dönemini yaşamaktadır. Özellikle tüketim alışkanlıklarında büyük değişimlere neden olan bu süreç; üretim proseslerinde de köklü değişikliklere yol açmakta ve tüm ekonomik faaliyet alanlarını etkilemektedir [1, 2]. Pek çok sektör değişim veya dönüşüme uğramakta, yenilikçi üretim metotları geleneksel yapıları temelden sarsmaktadır (Şekil 1). Bu değişimin etkilediği iş kollarından biri de madencilik sektörüdür.

Madencilik; çalışma koşulları ve teknolojik ana işlemleri bakımından, diğer sanayi dallarından kısmen farklılıklar göstermektedir. Madencilik faaliyetleri sıklıkla zor/güç ortamlarda (yeraltı/yerüstü) ve kentsel yaşam alanlarından uzak bölgelerde gerçekleştirilmektedir. Maden yataklarının oluşumu esnasında yaşanan jeolojik tektonizma ve alterasyonlar nedeniyle, sektör oldukça dinamik bir yapıya

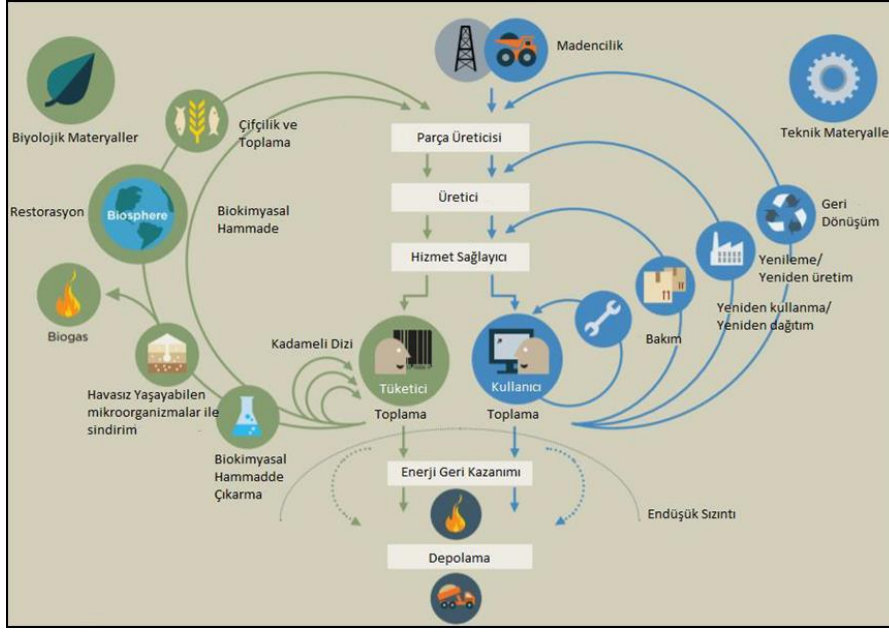
Abstract

The mining sector differs partially from other branches of industry in terms of working conditions and technological main operations. Mining activities are often carried out in difficult environments (underground/surface) and in areas remote from urban habitats. Despite the many negatives experienced in the sector, the contribution of mining foreign trade to the economy of our country (Mining / GDP = 0.82~1.17%) has remained at approximately the same level for decades. In order to achieve an increase in the efficiency ratio of the Turkish mining sector, business activities need to be legally and technologically redesigned. It is possible for mining enterprises to hold on to today's competitive market conditions only with high working efficiency, occupational safety and strong working capital. This approach highlights the “circular economy” model, which is more ecologically and economically sustainable. In order to protect natural resources and exploit the advantages it offers us, we need to use the raw materials produced more effectively. But this is possible only if we change our habits of producing goods and services and consuming natural resources. In the research conducted for this purpose, the concepts of circular economy and digitalization in the mining sector of our country have been examined from different perspectives.

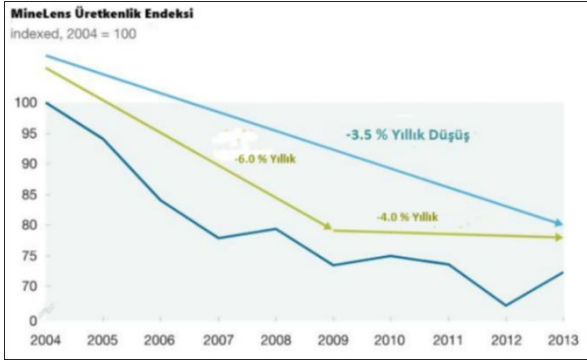
Keywords: Mining, Industry 4.0, Waste, Circular economy, Sustainability.

sahiptir. Ayrıca; işçi ve malzemeleri çalışma panolarına ulaştırmak için, büyük bir emek ve sermaye gerektirmektedir. Maden makinalarına yüzey ve kayalar tarafından aktarılan gerilme ve basınçlar, kısmen beklenmedik iş kazası veya arızalara neden olabilmektedir. Öyle ki, dünyanın en zor ve tehlikeli mesleği olarak tanımlanan madencilik ile ilgili hafızalarımıza kazınmış pek çok acı hatıralar bulunmaktadır. Örneğin; ülkemizde 2014 yılı Manisa-Soma yeraltı kömür işletmesinde meydana gelen 301 işçinin hayatını kaybettiği iş kazası, bunlardan sadece bir tanesidir.

Özellikle madencilik sektörü son yıllarda küresel ölçekte artan maliyetler nedeniyle finansal baskı altına girmekte, kısa vadede değişen emtia fiyatları işletmelerin nakit akışını bozmakta veya sınırlandırmaktadır. Bunun sonucu, madencilik faaliyetleri üretkenlik endeksi 10 yıl öncesine göre %28 oranda daha az verimlilik göstermektedir (Şekil 2).



Şekil 1. Madencilik ve dögüsel ekonomik yaklaşım [3]



Şekil 2. Küresel madencilik sektöründe verimlilik değişimi [2]

Sektörde yaşanan tüm bu olumsuzluklara rağmen, maden dış ticaretinin ülkemiz ekonomisine katkısı (Madencilik/GSYH = %0.82~1.17) on yıllardır yaklaşık aynı düzeyde kalmaktadır [4]. Türkiye madencilik sektörü katma değer oranında bir artış sağlamak için, işletme faaliyetlerinin yasal ve teknolojik olarak yeniden tasarlanması gerekmektedir [5, 6]. Yapılacak yeniliklerin başında; Endüstri 4.0'ın iş hayatına sunduğu dijitalleşme, dögüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik kavramları gelmektedir. Böylece, sektör olarak hem üretimde yüksek verimlilik/katma değer hem de kabul edilebilir iş sağlığı ve güvenliği düzeyi sağlanmış olacaktır.

Geçmiş uygarlık tarihi kadar eski olan madencilik sektörünü, “yenilik/inovasyon” kavramı ile bir arada düşünmek ilk etapta güç gelebilir. Ancak; doğal kaynakların aranması, üretim ve zenginleştirme süreçleri, aslında her zaman değişim ve dönüşümün en aktif olduğu alanlar olmuştur. Bu maksatla yapılan araştırmada; ülkemiz madencilik sektöründe dögüsel ekonomi ve dijitalleşme uygulamaları detaylı olarak irdelenmektedir.

2 Materyal ve metot

Türkiye madencilik sektöründe önemli bir yer tutan sürdürülebilirlik, dijitalleşme, dögüsel ekonomi, sosyal ruhsat ve yeşil ekonomi kavramları, gerek teorik gerekse uygulamalı çalışmalarından elde edilen istatistiksel veriler ile analiz edilmektedir.

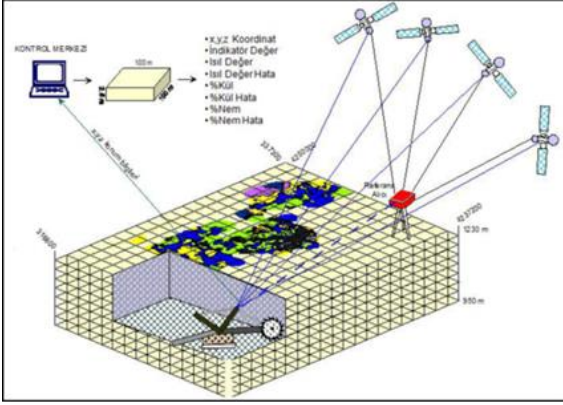
3 Bulgular ve tartışma

Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de klasik madencilik faaliyetleri önemli ölçüde değişmekte ve yenilikçi modeller uygulamaya konulmaktadır. Dünya çevre ve kalkınma komisyonu (Brundtland Commission) 1987 yılında yayımladığı ortak geleceğimiz raporunda, “sürdürülebilir kalkınma” modelini geniş kitlelere duyurmuştur. Komisyon bu kavramı “bugünün ihtiyaçlarını, gelecek kuşakların da kendi ihtiyaçlarını temin edebilme imkânlarından ödün vermeksizin karşılamak” olarak tanımlamaktadır. Kısaca sürdürülebilirlik; üretim, çevre, sosyal sorumluluk ve etkin yönetim anlayışlarının eşgüdümünü gerektirmektedir [7, 8]. Buna göre, sürdürülebilir kalkınmada bütünsel ve aynı düzeyde etkili dört prensip bulunmaktadır. Bunlar; ekonomik katkı, toplumsal uzlaş, çevre duyarlı ve objektif yönetimidir. Ancak tüm bunlar, yenilikçi yaklaşımların ilgili sektörde hep birlikte uygulanması ile mümkün olacaktır.

3.1 Madencilik sektöründe dijital dönüşüm

Doğal kaynakların ülke ekonomisine daha yüksek katma değer yaratmasını sağlamak kolay bir görev değildir. Madencilik ve üretim faaliyetleri çok tehlikeli iş kolu olup, doğal çevreye doğrudan veya dolaylı etkileri olmaktadır. Teknolojik gelişmelerin temel hedefi; insan ve çevreyi tüm olumsuz ve tehlikeli çalışma koşullarından uzak tutmak, karmaşık üretim süreçlerini bütüncül yaklaşımla çözmektir. Madencilikte mekanize kazı ve otomasyon sayesinde

tahkimat, nakliyat, döküm ve diğer pek çok teknik aktivite seri bir biçimde gerçekleştirilmektedir. Teknolojik gelişmeler bu kapsamda değerlendirildiğinde; madencilik sektörü çalışma koşullarında da köklü değişimler gözlenmektedir (Şekil 3). Yönetimsel karar verme süreçleri ve bilgi akışı hızlanmakta, madencilik faaliyetleri daha merkezi ve operasyonel bir yapıya kavuşmaktadır.

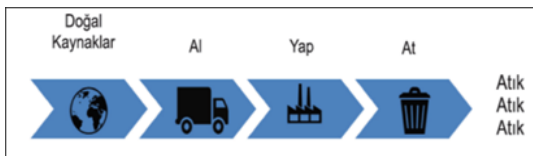


Şekil 3. Linyit açık işletmesinde coğrafi bilgi sistemi uygulaması [9]

Madencilik sektörüne katkı sağlayacağı düşünülen dijital teknolojiler, dört ana kategoride (sanayi, tüketici, toplum ve çevre) ele alınmaktadır. Dijitalleşmenin 2016-2025 yıllarını kapsayan dönem için "risk edilen değer analizi" yöntemine göre, toplam mali katkının 425 milyar dolardan fazla olacağı hesaplanmaktadır. Sanayiye toplam katkının 320 milyar dolar (\$) olması beklenmektedir. Bunun 190 milyar doları maden, 130 milyar doları ise metal sektörüne yansımaktadır. Baca gazı emisyonunda 610 milyon ton düşüş, iş güvenliği alanındaki önlemler ile yaklaşık 1.000 kişi kurtarılacak ve 44.000 yaralanma önlenebilecektir. Buna karşın, 330.000 iş gücü/istihdam kaybı yaşanacaktır. Ayrıca; madencilik sektörüne yapılan bu tür uygulama ve yatırımların yakın gelecekte artarak devam edeceği beklenmektedir [10, 11]. Ancak; işletme faaliyet zincirindeki tüm alanlara birlikte entegre edilmesi halinde dijitalleşme, sektöre önemli katkılar sağlayabilecektir.

3.2 Döngüsel ekonomi ve atık yönetimi

Gelişmiş ve Avrupa Birliği (AB) üyesi devletlerin çok önem verdiği döngüsel ekonomi (circular economy), son yıllarda ülkemizde de gündem olmaya başlamıştır [12, 13]. Doğal kaynakların bol, erişilebilir ve atık bertarafının ucuz olduğu "al, yap ve kullan-at" yaklaşımını "doğrusal ekonomi" modelinde aşırı miktarda atık üretilmektedir (Şekil 4). Bununla birlikte; her geçen gün olumsuz çevresel etkiler ve küresel iklim değişikliği yaşanmakta, doğal kaynaklar hızla tüketilmekte, enerji ve yakıt ihtiyaçları artmaktadır.



Şekil 4. Doğrusal ekonomi modeli [14]

Doğal kaynakların tükenebilir olması, sağlıklı bir çevre ve atıkların azaltılması ihtiyacı, daha sürdürülebilir olan "döngüsel ekonomi" yaklaşımını ön plana çıkarmaktadır. Bu modelde "üretim - tüketim - atık yönetimi - geri dönüşüm" adımları bulunmaktadır (Şekil 5). Bu sistemde; hammadde girdilerin ve ürün çıktılarının döngüde uzun süre kalması, oluşan atıkların minimum düzeyde tutulması istenmektedir [15, 16, 17]. Burada hedef, sistemde oluşan atıkları azaltmak ve sistemin verimli bir biçimde çalışmasını sağlamaktır.



Şekil 5. Döngüsel ekonomi modeli [18]

Söz konusu model; doğal kaynakların daha kontrollü tüketimini ve atıkların ikincil hammadde olarak değerlendirilmesini sağlamakta, ayrıca teknolojik gelişmeler ile piyasaya rekabet avantajı getirmektedir. Ayrıca; yeni iş modelleri, yüksek katma değer ve istihdam olanakları yaratmaktadır. Tüketicilere ekonomik ve kaliteli ürünler sunulmasını teşvik etmektedir. Kısaca; doğal kaynakların daha verimli, çevre uyumlu kullanılması ve geri kazanımı, ulusal kalkınmaya ekolojik ve ekonomik önemli faydalar sağlamaktadır.

AB Komisyonu raporlarına göre; atıkların bertarafı, ekotasarım, yeniden kullanım sayesinde üye devletlerdeki firmalara 600 milyar avro (€) ya da yıllık cirolarının %8'i oranında net kazanç ve sera gazı salınımlarında %2-4 azalma sağlayacağı hesaplanmaktadır. Üretim ve geri kazanım sektörlerinde; hurda halindeki cep telefonlarının pratik demontajı sağlanırsa, yeni ürün eldesinde kullanılan hammadde ile ilgili maliyetlerin yarı yarıya azalması beklenmektedir [19]. Eğer elektrik/elektronik kaynaklı atıkların %95'i toplanabilirse, cihaz üretim maliyetlerinden yılda 1 milyar € tasarruf sağlanabileceği öngörülmektedir.

Aynı düşünceyle ülkemiz maden işletmeleri ve çimento sanayii, özellikle atıklardan enerji ve farklı geri kazanım teknikleri ile mevcut potansiyellerini daha yükseklerle çıkarmayı planlamaktadır [14]. Öyle ki;

- Türkiye'de senelik 28 milyon ton belediye atığından 7 milyon ton ek yakıt üretimi,
- Çimento sanayii yaklaşık 7 milyon ton evsel atığı enerji kaynağı olarak kullanabilir,
- Böylece 3 milyon ton daha az kömür ithalatı ile fosil kaynaklı emisyonunda yıllık 1,7 milyon ton CO₂ azalma (%7 azaltım),

- Düzenli depolama tesislerinde açığa çıkacak metan gazının önlenmesi,
- Çöp stok sahası alanlarının azaltılması ve rehabilitasyonu mümkün olacaktır.

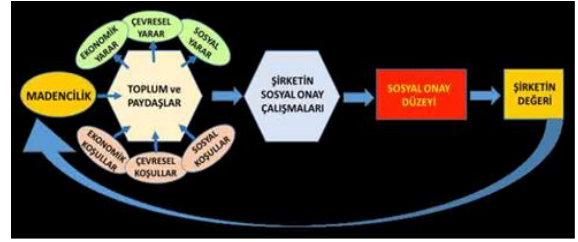
Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2018-2020 yılı verilerine göre, ülkemiz maden işletmelerinde oluşan atık türleri ve geri kazanım faaliyetleri değişim miktarları **Tablo 1**'de verilmiştir. Bu veriler yıl bazında analiz edildiğinde; toplam tehlikeli atık miktarlarında yaklaşık iki katı artış, tesis bünyesinde geri kazanılan miktarlarda yarı yarıya bir azalış gözlenmektedir. Buna karşın; endüstriyel katı atık olarak maden ve mermer atıklarının mikronize kalsit ve daha birçok farklı değerlendirme alternatifleri bulunmaktadır [20, 21, 22]. Tüm bu veriler, maden işletme atıklarının yeniden değerlendirilmesi hususunda çok daha fazla araştırma-geliştirme (Ar-Ge) çalışmalarını yapılmasını gerektirmektedir

3.3 Sosyal ruhsat ve yeşil ekonomi

Çevreyi korumak ve bizlere sunduğu imkânlardan sürekli yararlanmak için, doğal kaynakları daha efektif kullanmamız gerekmektedir. Bunu sağlamak ise; mal ve hizmetleri üretme, hammaddeleri tüketme alışkanlıklarımızı değiştirmemiz ile mümkündür. Kısaca, çevre uyumlu bir ekonomiye geçmemiz gerekmektedir. 'Yeşil ekonomi' teriminin birden çok tanımı bulunmakla birlikte kısaca; "tüm üretim ve tüketim süreçlerinde, toplum refahı ve çevre sağlığı düşünülerek yapılan bir ekonomik faaliyet" anlamına gelmektedir. Diğer bir ifadeyle; doğal kaynakları verimli kullanıp toplum refahını artırırken, üzerinde yaşadığımız doğanın da korunduğu bir ekonomik modele "yeşil ekonomi" denmektedir. Maden işletmelerinin oluşturduğu

çevresel etkiler ile açığa çıkan ekonomik faydanın paylaşılması hususunda, madenciler ve yöre halkı arasında yaşanan anlaşmazlık ve çatışmalar yaklaşık son 50 yılda giderek artmıştır. İnsan sağlığı, temiz çevre ve kültürel varlıkların geleceğinden endişe eden vatandaş ile çatışarak, etkin ve verimli bir madencilik faaliyeti sürdürmek artık mümkün değildir.

Yaşanan bu tür sorunları çözmek amacıyla, maden işletmeleri ile sivil toplum kuruluşları arasında karşılıklı uzlaşa sağlayan bir sosyal onay mutabakatı yürürlüğe konulmuştur (**Şekil 6**).



Şekil 6. Madencilik, sivil toplum ve sosyal onay etkileşimi [7]

Söz konusu yasal düzenlemeler, arzulanan hedeflere ulaşmak için öncü girişimleri tanımlamaktadır. 'Kaynakları Verimli Kullanan Avrupa' öncü girişimi, AB'nin bu alandaki politikasında merkezi rol oynamaktadır. Bu maksatla, bir dizi kanun paketleri ve direktifler geniş halk kitlelerince kabul edilmektedir [17, 24]. Burada amaç, daha az miktarda atık üreten ya da daha az girdiyle daha fazla katma değer yaratan üretim sistemlerini hayata geçirmektir.

Tablo 1. Maden işletmeleri atık ve geri kazanım göstergeleri (yıl/ton) [23]

Atık türleri	2018	2020
Toplam atık miktarı	812 098 193	896 448 878
Toplam tehlikeli atık miktarı	11 176 581	26 044 730
Tehlikeli mineral atık miktarı	11 164 125	26 036 285
Toplam tehlikesiz atık miktarı	800 921 612	870 404 147
Tehlikesiz mineral atık miktarı	800 373 504	870 371 313
Dekapaj malzemesi/pasa miktarı	794 711 164	868 867 003
<i>Bertaraf ve geri kazanım yöntemlerine göre atık miktarı</i>		
Tesis bünyesinde geri kazanılan	43	19
Satılan/lisanslı tesislere gönderilen	5 973 124	2 790 812
Maden sahalarının doğaya yeniden kazandırılması amacıyla kullanılan	14 462 144	16 999 913
Yakma tesisine gönderilen	1 329	1 010
Ocak içi dökümü	212 388 465	236 753 668
Pasa sahası/atık barajı/düzenli depolama sahasına gönderilen	578 186 115	639 212 221
Boş araziye atılan	381 118	433 612
Diğer ⁽¹⁾	705 855	257 623

⁽¹⁾ Belediyenin gösterdiği alanda depolama, işyerinde belirli bir yerde geçici depolama, belediye çöplüğünde depolama vb. içermektedir.

4 Sonuçlar

Madencilik sektöründe faaliyet gösteren firmaların günümüz rekabetçi piyasa koşullarında tutunması, ancak çalışma verimliliği yüksek, iş güvenliği ve işletme sermayesinin güçlü olması ile mümkündür. Bu yaklaşım; ekolojik ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir olan “döngüsel ekonomi” modelini ön plana çıkarmaktadır. Doğal kaynakları korumak ve bizlere sunduğu avantajlardan yararlanmak için, üretilen hammaddeleri daha efektif kullanmamız gerekmektedir. Ancak bu, mal ve hizmetleri üretme ve doğal kaynakları tüketme alışkanlıklarımızı değiştirmemiz ile mümkündür.

Küresel ölçekteki maden şirketleri (ortalama 120 firma) ile yapılan araştırmada; sektörün gelecekte kendini nasıl konumlandığı anket sonuçlarına göre, katılımcıların %55’i “akıllı madencilik” verimliliği artıracak en önemli çözüm önerileri arasında görmektedir (Tablo 2). Katkı oranı %54 ile filo, delme-patlatma ve tesis optimizasyon programlarının verimliliği artıracak temel faktörler olacağını, katılımcıların %44’ü çalışan sayısında azalma ve şirket varlıklarından gelir sağlamanın hala geçerliliğini koruyacağını düşünmektedir. Ayrıca; bu yenilikçi düzenlemelerin çok yakın zamanda (1~2 yıl) sektöre önemli kazanımlar sağlayacağı, fakat bunların katkı düzeyleri hakkında (%5-10, %10-20, %20<) farklı görüşler paylaşılmaktadır.

Tablo 2. Madencilik sektöründe verimliliği artıracak yenilikçi çözümler [10]

Yenilikçi çözümler	Katkı oranı (%)
IT-OT Entegrasyonu/ Data-led karar verme/ Akıllı madencilik	55
Filo/ Delme-patlatma/ Tesis optimizasyon programları/projeleri	54
İşgücünde azalma / Şirket varlıklarını getirisini artırma (sweating assets)	44
Uzaktan/ Tele uzaktan kontrol sistemi uygulamaları	32
Mekanizasyonda artış	16
Yarı-otonom/ Otonom ekipman kullanımı	6.8

Madencilik sektöründe yenilikçi modelleri aktive etmek için, tüm paydaşlara önemli görevler düşmektedir. Özellikle kamu, maden işletmeleri ve sivil toplum kuruluşları arasında sağlıklı/yapıcı bir diyalog oluşturulması gerekmektedir. Bununla birlikte, devlet teknolojik gelişmeleri teşvik edecek uygun ekosistem yaratmalı, maden işletmeleri ise yenilikçi modelleri uygulamalı ve gerekli yatırımları (finansman, işgücü, altyapı vb.) yapmalı, toplum da maden işletmelerine güvenmeli ve işbirliğine açık olmalıdır. Kısaca; maden işletmelerinin hedefinde ekonomik kazanç ile birlikte daha verimli, çevreci ve de sürdürülebilir faaliyetlerin yürütülmesi esas öncelik olmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazar, kişi ve kurumlarla herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %20

Kaynaklar

- [1] N. Tamzok, Madencilik endüstrisinde 100 yenilik (I), Enerji Günlüğü, s 3, Ankara, 2017.
- [2] I. Telatar, Dijital dönüşüm ve madencilik sektörü, <https://www.endustri40.com/haberler/>, İstanbul, s 7, 2018 (Erişim Tarihi: 28.09.2018).
- [3] H. Önder, Sürdürülebilir kalkınma anlayışında yeni bir kavram: Döngüsel ekonomi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 57.Sayı, Temmuz 2018.
- [4] MTA, Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü, bilgi merkezi, Türkiye’de madencilik, madencilik dış ticareti, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-dis-ticaret> (Erişim Tarihi: 21.03.2022).
- [5] TMD, Türkiye Madencilik Derneği (TMD), maden endüstrisinin geleceği, yeni teknolojiler ve sektör trendleri semineri, 01 Haziran, İstanbul, s 2, 2016.
- [6] H.S. Başaran, Türkiye’nin madenleri dijitale geçiyor, Dünya Gazetesi, Haberler, Tekno Trend, <https://www.dunya.com>, İstanbul, s 3, 2016, (Erişim Tarihi: 22.01.2019).
- [7] A.V. Oygür, Çağdaş madencilik faaliyetlerinde sosyal onay, Türkiye Madencilik Derneği (TMD), Sektörden Haberler Bülteni, Özel Sayı 69, İstanbul, 66-82, 2018.
- [8] M.S. Delibalta, Türkiye ve dünya madencilik sektörü gelişim sürecinde yeni paradigmlar, Türkiye 26.Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi-IMCET2019, sayfa 130-138, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, 16-19 Nisan, Antalya/ Türkiye, 2019.
- [9] B.A. Mert, A. Dağ ve A.C. Özdemir, “GPS/CBS Tabanlı üretim takip programının geliştirilmesi ve madencilikte kullanımı: Afşin-Elbistan linyitleri Kışlaköy açık işletmesi örneği”, Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, sayfa 381-392, 14-17 Nisan, Antalya/ Türkiye, 2015.
- [10] N. Karapınar, Madencilik endüstrisinde inovasyon, Madencilik Türkiye Dergisi, 15 Ocak, Ankara, 98-104, 2018.
- [11] M.A. Dereli, M. Yalçın ve S. Erdoğan, Madencilik faaliyetlerinde CBS kullanımı, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 2, No: 3, 28-34, 2010.
- [12] E.S. Veral ve H. Yiğitbaşıoğlu, Avrupa Birliği atık politikasında atık yönetiminden kaynak yönetimi yaklaşımına geçiş yönelimleri ve döngüsel ekonomi modeli, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi 6 (1), 1-19, 2018.
- [13] M.S. Delibalta ve F. Çiner, Madencilik sektöründe atık yönetimi ve Avrupa Birliği çevre mevzuatı ilişkisi analizi, 1st International Conference on Environment, Technology and Management (ICETEM), pp 640-650, 27-29 June, Nigde/Turkey, 2019.
- [14] TÇMB, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Türk çimento sektörünün döngüsel ekonomideki rolü, <http://www.tcma.org.tr/>, Ankara, s 6, 2017. (Erişim Tarihi: 22.01.2019)



- [15] F. Karaosmanoğlu, Döngüsel ekonomi atık yönetimsiz var olamaz, Röportajlar, EKOIQ Dergisi, <http://ekoIQ.com/>, İstanbul, 2015. (Erişim Tarihi: 22.01.2019)
- [16] V. Rao, Circular reasoning, research triangle energy consortium, illuminating national energy priorities, 17 May, <https://rtec-rtp.org/>, Duke University, Durham, NC 27708 USA, 2016.
- [17] KFT, Keirtsu Forum Türkiye (KFT), Döngüsel ekonomi, döngüsel fikirler, <http://keiretsuforum.com.tr/>, Maslak-İstanbul, 2016. (Erişim Tarihi: 22.01.2019)
- [18] Ş. Balbay, A. Sarıhan ve E. Avşar, Dünya’da ve Türkiye’de “döngüsel ekonomi / endüstriyel sürdürülebilirlik” yaklaşımı, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 27, Kasım, 557-569. 2021.
- [19] ÇEVKO, Çevre Koruma ve Ambalaj Atıklarını Değerlendirme Vakfı (ÇEVKO), Döngüsel Ekonomi Kongresi, <http://cevkokongre.com/>, Kadıköy- İstanbul, s 2, 2017.
- [20] F. Çiner, N. Doğan-Sağlamtimur, ve M.S. Delibalta, Endüstriyel katı atık olarak mermer atıklarının çevresel etkileri ve değerlendirme alternatifleri, Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar, Muğla Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları-6, ISBN: 978-605-4839-14-8, 19 Ocak, Muğla, 93-127, 2018.
- [21] V. Deniz, Mermer atıklarının mikronize kalsit olarak değerlendirilme potansiyeli, Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar, Muğla Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları-6, ISBN: 978-605-4839-14-8, 19 Ocak, Muğla, 153-204, 2018.
- [22] M. Uçurum, Ü. Atıcı, Ö.Y. Toraman ve S. Çayırılı, Kalsit madenciliği triyaj artığının agrega olarak ve kireç üretiminde değerlendirilmesi, V. Madencilik ve Çevre Sempozyumu, sayfa 382-388, 26-27 Kasım, Antalya, 2015.
- [23] TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Atık İstatistikleri 2020, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>, (Erişim Tarihi: 22.03.2022)
- [24] AÇA, Avrupa Çevre Ajansı (AÇA), Ekonomi: kaynak verimli, yeşil ve döngüsel, İşaretler- Değişen bir iklimde yaşamak, www.eea.europa.eu, Copenhagen-Danimarka, p 12, 2014.





Predicting compressive strength using the texture coefficient with soft computing techniques for rocks

Kayalar için yapay zekâ hesaplama teknikleri ile doku katsayısını kullanarak basınç dayanımını tahmin etme

Ramazan Çomaklı^{1,*} , Ümit Atıcı² 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir University, Mining Engineering Department, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

Rock strength plays one of the most dominant roles for mining, geology, and civil engineering in terms of planning, excavation, and safety. Compressive strength (f_c), which is the most used strength type, requires time, cost, and standard size specimens are needed to find it in the laboratory. In this study, Regression Analysis (RA), Neural Networks (NNs), Gene-Expression Programming (GEP), and Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS) were used for predicting using both textural and mechanical properties which are detected with a dimensionless sample or directly in the field. For this purpose, a data set consists of 136 data value (46 magmatic, 77 sedimentary and 13 metamorphic rocks) was used, and three different feature sets were constructed. The comparison of the estimated results with each other was performed by training, testing, and checking of these models. The comparisons and results of the statistical analyses indicate that soft computing techniques represent significantly effective methods to calculate f_c even in situations when input and output values are not related to each other, and it is possible to create statistically suitable and valid mathematical models by everyone using GEP.

Keywords: Texture coefficient, Rock compressive strength, Adaptive network-based fuzzy inference system, Neural networks, Gene-expression programming.

1 Introduction

Knowing the strength of rock masses plays the most important role in mining, geological, drilling and tunneling engineering. Planning, design, and cost analysis for businesses require the dominance of these features. Uniaxial compressive strength (f_c) takes first place among the most significant characteristics of rocks to predict their behaviors, and its importance has been mentioned by many researchers. The International Society for Rock Mechanics ISRM, [1] and the American Society for Testing and Materials [2] are the main standards for the methodology of laboratory testing to determine the f_c . However, these tests are time-consuming and costly. Therefore, many researchers studied to develop new models to predict f_c , based on the other

Öz

Kaya dayanımı, planlama, kazı ve güvenlik açısından madencilik, jeoloji ve inşaat mühendisliği için en baskın rollerden birini oynar. En çok kullanılan dayanım türü olan basınç dayanımını (f_c), laboratuvar şartlarında bulmak için zaman, maliyet ve standart boyutlu numunelere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, kayaların şekilsiz numuneler üzerinde veya araziden elde edilen hem doku katsayıları hem de basınç dayanım değerleri regresyon analizi (RA), Sinir Ağları (NN'ler), Gen- ekspresyonu Programlama (GEP) ve Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Sistemi (ANFIS) kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu amaçla 136 veriden oluşan bir veri seti (46 magmatik, 77 tortul ve 13 metamorfik kayaç) kullanılmış ve üç farklı özellik seti oluşturulmuştur. Tahmin edilen sonuçların birbirleri ile karşılaştırılması bu modellerin eğitimi, test edilmesi ve kontrol edilmesi ile yapılmıştır. İstatistiksel analizlerin karşılaştırmaları ve sonuçları, yapay zekâ hesaplama tekniklerinin, girdi ve çıktı değerlerinin birbiriyle ilişkili olmadığı durumlarda bile f_c 'yi hesaplamak için önemli ölçüde etkili olduğunu ve istatistiksel olarak uygun ve geçerli matematiksel modeller oluşturmanın GEP kullanan herkes tarafından yapılmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Doku katsayısı, Kaya basınç dayanımı, Adaptif ağ tabanlı bulanık mantık sistemi, Sinir ağları, Gen ekspresyonu programlama.

physico-mechanical characteristics of rocks that can be obtained with easier test methods [3, 4, 5, 6].

There are many different parameters that influencing the mechanical properties of rocks. Textural properties, such as the ratio of total grain area to matrix area, the type of cement in the matrix, the degree of cementation, and mineral composition, are all effective parameters on rock strength. There have been several different studies that investigated the effect of textural characteristics on the mechanical properties of rocks since the 1970s, and it has been determined that the mechanical properties of rocks are closely related to their texture [7-13].

Through the statistical gauge, Howarth and Rowlands [14] carried out the development of a texture coefficient (TC), which sums up the main textural parameters of rock and indicates it as a single dimensionless factor. One of the

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: rcomakli@ohu.edu.tr (R. Çomaklı)

Geliş / Received: 06.08.2022 Kabul / Accepted: 14.09.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1158645

benefits of TC is to utilize thin sections instead of thick, uniform samples and easily comprehend the influence of textural parameters in the mechanical properties of rock. Ersoy and Waller, [15] investigated this influence in drilling performance regarding the strength of limestone, sandstone, and siltstone and the possible relation of these strengths with the texture coefficient of those rocks. The exploration of the link between TC and the quality of the rock was carried out by estimating the uniaxial compression strength of tuff, limestone, and basaltic andesite [16]. A strong relation between TC and f_c was found for quartzite of the Himalayas by Gupta and Sharma [16]. Ozturk et al. [17] and Ozcelik et al. [18] examined the association between TC and various parameters in marble. Similarly, Atıcı and Comaklı [19] evaluated the physical and mechanical characteristics of plutonic rocks based on TC. However, these studies were based mostly on only one rock type and statistical investigation of data sets.

An invariable-multivariable regression analysis (RA), both linear and non-linear has been used to perform statistical analyses. RA aims at simultaneously determining two or more independent variables explaining alterations in the dependent variable. The benefits of RA are that it does not require software, creates straightforward regression constants, and evaluates the importance level of different input parameters. For a better RA, a robust link between independent and dependent variables is needed, but this is not always feasible. The major deficit of classical modeling methods is that these methods are not human-interpretable models. To deal with these restrictions and challenges, apart from RA, a few alternate soft computing techniques have been developed to give human-like decisions in diverse fields of engineering. Gaining knowledge both empirically and theoretically is among the key features of soft computing. Genetic programming (GP), neural networks, and fuzzy logic are commonly utilized for numerous applications in various engineering fields. Gokceoglu et al. [20] and Singh et al. [21] both carried out researches by utilizing NN and FL to estimate the elastic behavior of rocks, particularly elastic constants. The saturation percentage of soil was assessed by Aali et al. [22] by multiple regression and ANN. Ozbek et al. [6] used GP to estimate the f_c based on the natural unit weight and water absorption of rocks by taking into account the weight and effective porosity values. The researchers found out that soft computing techniques are a good and flexible option for determining uncertainties in rock characteristics.

Although there have been many previous studies on the prediction of f_c in the literature, these studies have mostly been obtained by using the mechanical properties of the rocks and it is often necessary to use samples with certain and large dimensions. Since only the mechanical characteristics of the rock were used, a separate model was produced for each rock type. The rock types are determined by using the petrographic properties of the rocks. For example, the degree of crystallization of magmatic rocks, shapes, and dimensions of the rock-forming minerals, and matrix features are determinants in the classification of magmatic rock. Likewise, the presence and severity of

foliation in metamorphic rocks are some of the criteria considered in the classification of these rocks. These properties are used in the calculation of texture coefficients. This study, unlike previous studies, aims to develop a single model which can be valid for each rock group by including the mechanical and textural characteristics of rocks in terms of evaluating the compressive strength of the rocks.

The focus in this study is the prediction of f_c using both mechanical and textural properties which don't require uniformly shaped and relatively large samples. For this purpose, RA, ANN, ANFIS, and GEP were used for the prediction of the f_c values for diverse rock types. In the sets of the models' Texture Coefficient, Density (ρ), Schmidt hardness (SH), and Ultrasonic P wave velocity (V_p) were included as input variables while the Compression strength (f_c) values were utilized as outputs.

2 Texture coefficient

It is possible to estimate the mechanical parameters such as f_c , Brazilian tensile strength (BTS), and so on based on the textural properties of rocks. Therefore, Howarth and Rowlands, [14] carried out the development of TC, which defines the textural properties of rocks. It is known that rock texture plays a role in physical strength against the breaking of the rock under the effect of load. While pressure influences those rocks, causing them to break into pieces, a zone of high stress is generated. As those rocks will be held pressed under strength, strength forces will surpass the rock strength, and the material will crack. Cracks initiation and propagation take place at the surface, and laterally under the material. In the last stage, the breaking of the rock occurs by the arrival of a major fissure at the surface [23].

One of the main methods to evaluate the correlation between geomechanical and textural properties of rocks is to use the TC. Degree of grain packing (AW), grain circularity (FF_0), elongation (N_0 , N_1 , AR_1), and Orientation (AF_1) are four components in computing the rock texture. The results can be derived from the formula presented below;

$$TC = AW \left[\left(\frac{N_0}{N_0+N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_1}{N_0+N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right) \right] \quad [1]$$

Here, AW is the grain packing weighting, N_0 is the number of grains with aspect ratio less than 2.0, and N_1 is the number of grains with AR greater than 2.0. Structure Fig.s (FF_0) are the math average of the structural component for non-elongated grains. Perspective proportion (AR_1) is the mean for lengthened grains' angle proportions. AF_1 is used to quantify those introductions to lengthened grains, as time AW is that grain pressing weighting by Howarth and Rowlands [14].

3 Regression analysis

Regression analysis is utilized for modeling the association between a response variable and one or more predictor variables, and it is expressed in a mathematical model. This association can be linear or non-linear. In case response and a predictor variable are one, this is simple regression. On the other hand, in the case of more than one

independent variable, it is called multivariable regression (MVR). For defining at the same time more independent variables justifying alterations in the dependent variables, MVR can be applied. The observed case in a regression model represents a dependent variable, while the observation affecting the case represents a dependent variable and the event affecting the observation represents an independent variable. Regarding the fitted regression model, it is possible to estimate the dependent variable value for any value of the independent variable.

In this study, 136 data sets were utilized in the estimation of f_c based on the textural coefficient and physical properties such as ρ , SH, and ultrasonic pulse velocity (V_p). The rock blocks consist of sedimentary, magmatic, and metamorphic rock. The relationship between f_c , TC, ρ and f_c , SH, V_p is presented in Fig. 1 a,b, respectively, three-dimensionally, and the physico-mechanical properties of rocks are given in Table 1.

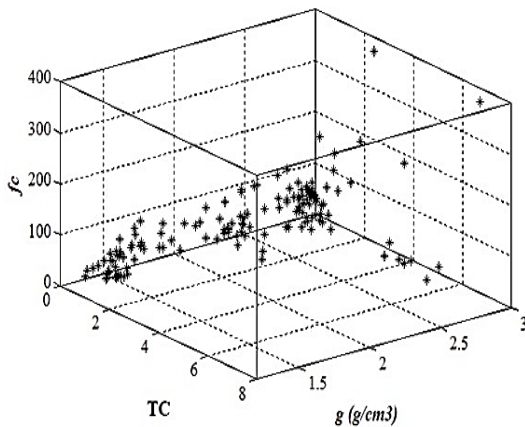


Fig. 1 a The relationship between f_c and TC, ρ .

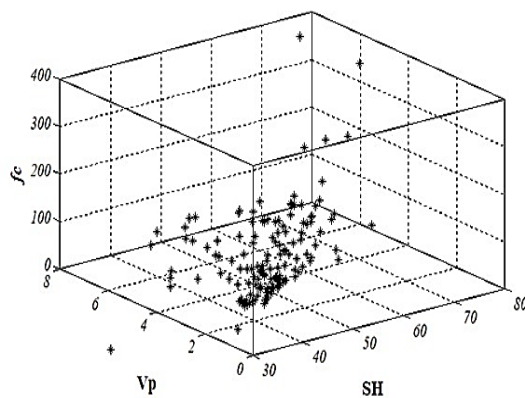


Fig. 1 b The relationship between f_c and V_p , SH.

Table 1 Physical and mechanical properties of rocks used in experiments.

	Min	Max	Mean	Standard deviation
f_c (MPa)	9.80	375.20	72.29	49.20
TC	0.11	6.76	1.39	1.18
ρ (g/cm ³)	1.36	2.99	2.24	0.49
SH	34.00	75.00	50.31	7.40
V_p (km/s.)	1.48	7.44	3.64	1.18

A reliable correlation is needed between dependent and independent variables for better regression analyses. A simple nonlinear and multivariate linear regression analysis has been conducted for the purpose of performing the statistical analyses. As an initial phase of the research, simple regression analyses were carried out. As seen from Table 2, the correlation values (R) of all models are very low, and the standard errors of the estimates are high. This is because the correlation between the f_c of the rocks and T.C. is low. Howarth and Rowlands [14], Azzoni et al. [24], and Alber and Kahraman [25] found a high correlation in the rocks they studied, unlike Ersoy and Waller [15] because they investigated a single rock type. However, even for different rocks of the same species, different properties can be mentioned.

Table 2 Models developed using simple regression.

Functional form	Model	Correlation Coeff. (r)	Std. Error of the Estimate
Linear	$f_c = 55.06 + 12.38TC$	0.297	47.148
Logarithmic	$f_c = 71.85 + 25.17\ln(TC)$	0.425	44.703
Inverse	$f_c = 87.63 - (10.83/TC)$	0.319	46.802
Quadric	$f_c = 16.39 + 62.29TC - 9.27(TC)^2$	0.551	41.363
Cubic	$f_c = 15.5 + 64.39TC - 10.34TC^2 - 0.12TC^3$	0.551	41.512
Compound	$f_c = 45.62 * (1.20^{TC})$	0.319	0.639
Power	$f_c = 58.37 * TC^{0.36}$	0.445	0.604
S	$\ln(f_c) = 4.28 - (0.159/TC)$	0.321	0.638
Growth	$\ln(f_c) = 3.82 + 0.18^{(TC)}$	0.319	0.639

In the next step of the analysis, a set of various regression analyses was built. Regression models were developed by using the default method of entering data in the Statistical Package for Social Science software (SPSS). In MRA, the variable selection process is used in which all variables in a block are entered in one step. The statistical analysis was performed at a confidence interval of 95% based on F and t-test values. As a brief explanation of the regression models, the statistical parameters were calculated at a confidence level of 95% since the level in question is usually utilized in statistical analyses. (Table 3). On account of studying the significance level of the variables in the model, a t-test was utilized with a 95% confidence interval. For these models, the t-test showed that the models were not valid, and standardization of the data did not change the results.

4 Artificial neural network

The Nerve Network (NN) exemplifies an artificial intelligence implementation that, nowadays, has been used in a broad spectrum for modeling human activities in various scientific and engineering projects [26]. Neural networks are based on a principle that a system of basic processing elements, biologically similar to the human brain, but in a simplified manner and extremely co-dependent, can absorb the nature of abstruse bonds between independent and dependent variables, which forms the basis of ANNs. NN represents a set of highly parallel structures which may be utilized for solving complex problems through the alliance of significantly interrelated but basic computing elements (or artificial neurons) [26, 27].

Table 3 Statistical summaries for the models of fc (at the confidence level of 95%).

Independent variable	Coefficient	t Value	Sig.	Coefficient			Model Error	F	
				R	R ²	Adj. R ²		Value	Sig.
Constant	-219.16	-12.66	0.000						
TC	-2.21	-4.49	0.62						
ρ	12.69	1.85	0.07	0.85	0.72	0.71	26.50	85.97	0.00
SH	5.00	13.73	0.00						
V_p	4.07	0.89	0.38						

As seen in Fig. 2, ANN is a processing system that contains an inlet layer, an outlet layer, and one or more concealed layers interconnected by neurons, all of which are distributed in parallel. Through the function of transfer, a processing element created by a single neuron constitutes an outlet signal by taking one or more outlets. A reference to each link is a weighting that states the influence of a set of inputs or other process elements in the previous layer on current process elements. In the first stage, coincidental values are used for bias and weighting. The subsequent stage is to fix them with the outcomes of training work.

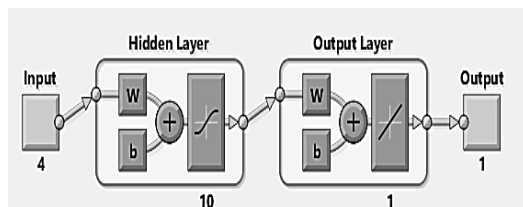


Fig. 2 Typical architecture of a multilayer perceptron neural network.

A neural network consists of two or three phases that are generally training, testing, and checking. An adjustment of the network is performed per the acquired errors, and processing of the sample data, inputs, and intended outputs, is carried out to optimize the output of the network and therefore minimize deviation. Checking is utilized for measuring the generalization of the network and for stopping training at the moment when generalization stops improving. Testing does not influence training, which therefore ensures an independent measure of the network performance in the course of and after training.

4.1 Structure and parameters of the artificial neural network model

In this study, an ANN model was developed to predict fc . TC, ρ , SH and V_p were utilized as input parameters of the ANN model. Herein, 106 data were utilized for the training of the models, 15 data were utilized for testing, and 15 data were used for the checking of the models. In three different stages of the modeling, training, testing, and control, the same datum was used to compare the findings from the RA, ANN, ANFIS, and GEP models.

The ANN toolbox in MATLAB was utilized for performing the required calculations. In a two-layer feed-forward network that was trained using the Levenberg–Marquardt method, a back-propagation training approach was applied. In case if a reasonable fit is not generated and

the coefficients are not adequately constrained by the trust-region algorithm, it is necessary to employ the Levenberg–Marquardt algorithm. The back-propagation algorithm, which is one of the most widely used multilayer perception algorithms, is a gradient descent technique that reduces the error for a specific training pattern in which the weighting is always altered by a little amount, to a minimum [28]. In the current investigation, the hidden layer used a nonlinear hyperbolic tangent sigmoid transfer function, while the output layer used a linear transfer function. The momentum rate and learning rate were calculated, and the model was trained using many iterations.

The size of the hidden layer is a challenge that must be solved, and the amount and quality of training samples influence it to some extent. In the hidden layer, there is no principle for selecting the number of neurons. An ANN must have a sufficient number of neurons to accurately model the problem of interest. However, to generalize the network, the number of neurons in the ANN model should be as low as possible. In earlier studies, the number of neurons has been linked to the number of input and output variables, as well as the number of training patterns [29, 30]. Nevertheless, it is not possible to generalize the rules in question [31]. According to some experts, the highest limit for the number of neurons must be more than twice the number of input points. However, the network’s generalization is not guaranteed by the above-mentioned rule. The number of neurons in the hidden layer was determined to be 10 in all three models by training a few networks with different quantities of hidden neurons and comparing the predicted results to the intended output. Table 4 contains information on the connection weightings and biases for the model.

5 Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

The ANFIS, which combines ANN and Fuzzy Logic (FL) techniques, is arguably the most widely used hybrid technique in engineering applications. ANFIS was developed by Jang [32] for use when the usage of the traditional approaches fails or is too complex. The ANFIS aims to find a model that will perform the correct simulation of the inputs with the outputs, and spending a lot of effort on system modeling is not required in the ANN during the development of a mathematical model describing the prediction of physical characteristics of the unknown system accurately over an operational range [33]. Since FL is established based on the fuzzy IF-THEN rules, there is no need for the details of the mathematical model.

Table 4 Optimized parameters (weighting and bias) of the neural network models.

Input		Layer 1				Layer 2		Output	
xoffset	gain	Bias	Weight			Bias	Weight	xoffset	gain
0.114	0.301	2,527	-1.968	0.431	0.903	1.102	0.419		
0.487	0.799	-1,750	2.165	-0.0116	-1.290	2.223	0.584		
7.401	0.030	-1,951	1.598	-1.290	-1.417	-0.653	0.150		
1.179	0.320	0.760	-1.628	-0.223	-0.197	0.040	0.804		
		0.008	-0.503	0.490	0.089	-2.817	-0.170	9.8	0.0055
		-0.524	-0.063	-0.684	3.865	0.562	0.710		
		1.075	1.451	-0.145	1.503	-2.417	-0.517		
		-0.944	-1.219	-0.646	0.940	1.923	-1.123		
		3.271	0.765	1.610	-3.756	-2.143	-1.775		
		2.729	0.433	0.490	-2.525	0.753	0.998		

Furthermore, nonlinearities and uncertainties in systems that are not possible to describe using accurate mathematical models can be sufficiently expressed by FL. Any nonlinear function can be approximated by FL over a compact set [33, 34].

By utilizing the available input/output data set, the toolbox function ANFIS performs the construction of a Fuzzy Inference System (FIS), of which membership function parameters are adjusted by employing a backpropagation algorithm alone or its combination with a least squares type of method. Two certain approaches have been constantly used; The Mamdani and Takagi–Sugeno (TS) models [5, 35]. Linear and constant behavior of output membership functions in the Sugeno model differentiates it greatly from the Mamdani model. Therefore, for more compact and efficient representation it is suitable for employing adaptive techniques in the construction of fuzzy models such as the Sugeno model. These above-mentioned adaptive techniques can also be utilized for customizing the membership functions in such a way that the data are modeled by the fuzzy system in the best way. The mechanism of reasoning for the Sugeno model in question is presented in Fig. 3.

Furthermore, by employing the given data set, the neural training process adaptively develops fuzzy rules and membership functions. Therefore, two methods, such as grid partitioning and subtractive clustering, are used in ANFIS [36].

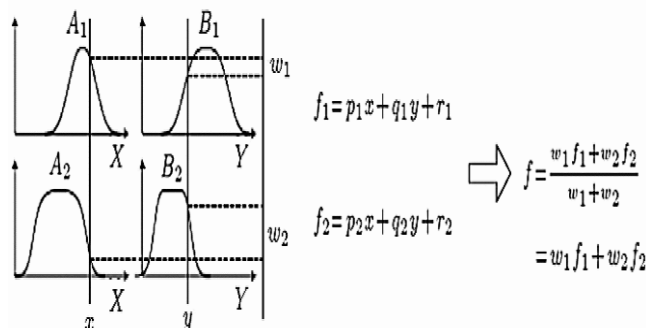


Fig. 3 The reasoning method of the Sugeno model.

The first-order Sugeno-type fuzzy inference system is named after the linear function, while the zero-order Sugeno-type fuzzy inference system is named after the constant function. To keep things simple, we'll assume there are two

inputs (x, y) and one output (f), as well as a governing rule based on the two if-then rules of the Takagi and Sugeno types in the ANFIS:

Rule1: If $x=A_1$ and $y=B_1$, then $f_{1(x,y)}=p_1x+q_1y+r_1$.

Rule2: If $x=A_2$ and $y=B_2$, then $f_{2(x,y)}=p_2x+q_2y+r_2$.

Where x (or y) denotes the input node i , $p, q,$ and r denote the training-derived consequence parameters, and A and B denote the labels of the fuzzy set providing an appropriate membership function.

The parameters related to the membership functions vary during the process of learning. A gradient vector calculates the parameters in question, or their adjustment, easier. The above-mentioned gradient vector ensures that the fuzzy inference system models the input and output data for a given set of parameters as well as possible. When acquiring the gradient vector, it is possible to apply any of a few optimization routines for adjusting the parameters to decrease some error measures. The difference between the real and predicted results multiplied by the square of the difference generally determines the magnitude of the error in question. Back-propagation or a least-squares estimation with back-propagation and back-propagation for estimating the parameters of the membership function is utilized in the ANFIS. The back-propagation learning algorithm or the hybrid learning algorithm that is well represented by Demuth and Beale Mark, [37] was utilized to update the membership function. In Fig. 4, the basic structure for an ANFIS model is illustrated. As is seen from the Fig., the ANFIS model has five layers in which mathematical calculations are made.

The four essential components of the ANFIS are fuzzification, fuzzy rule basis, fuzzy inference engine, and defuzzification. Furthermore, it is possible to add input and output data. Based on the improvement in one or more membership functions, each item of data in the input is transformed to different levels of membership by fuzzification. The fuzzy rule base has rules containing every potential fuzzy association between input and output data. The above-mentioned rules are presented in the IF-THEN format. All the fuzzy rules in the fuzzy rule base are considered by the fuzzy inference engine, and it learns how a set input can be transformed to the relevant outputs. The resulting fuzzy output data is converted into a number by defuzzification from the fuzzy inference engine [37, 38].

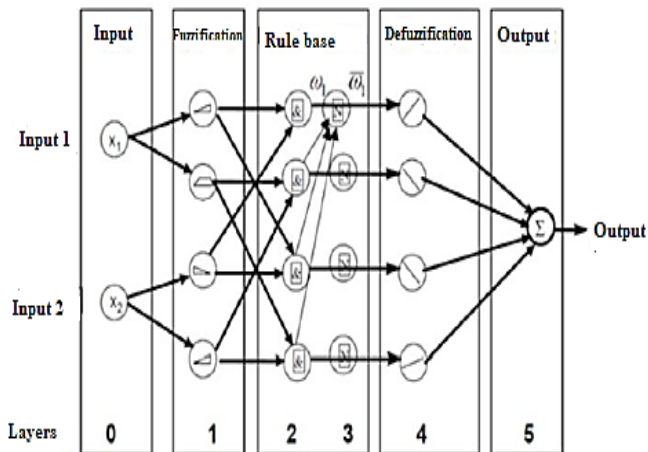


Fig. 4 The architecture of a two-input ANFIS network

5.1 ANFIS Model structure and parameters

Fuzzy modeling represents a system recognition task consisting of two main parts called structure definition and parameter estimation. A particular ANFIS type and applicable input data must be selected for the priority of the structure identification. Laterally, the quantity and kind of membership functions and fuzzy rules, as well as their antecedents and consequences are determined [39].

For predicting fc by using the textural and physical properties of rocks, the particular datasets were utilized to develop the ANFIS model, and other analysis methods were utilized in these models as well. The developed ANFIS model structure for the evaluation of fc is presented in Fig. 5. In this model, gaussian membership relations were utilized together with the Sugeno fuzzy inference models. Input variables plotted as membership function in training are presented in Fig. 6. To train the ANFIS models, 100 epochs are used and the prevention of overfitting is carried out by using the Minimum validation error as a criterion for halting. The ANFIS parameters in this model are summarized in Table 5.

Table 5 Properties of the generated ANFIS models.

	ANFIS Model
Type	sugeno
Number of fuzzy rules	81
NumInputs	4
Number of Input MFs	3 3 3 3
MF Type	Gaussmf
NumOutputs	1
Output	Lineat
Optim. Method	Backpropa
AndMethod	min
OrMethod	max
DefuzzMethod	wtaver

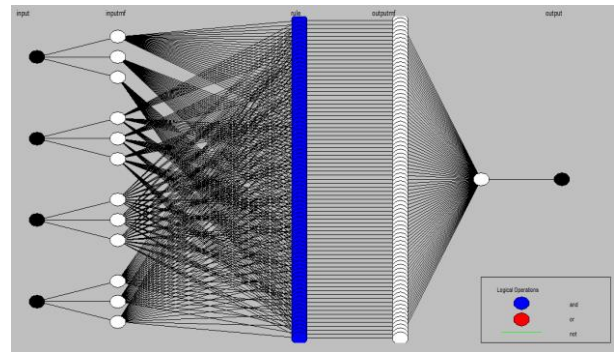


Fig. 5 The structure of the constructed ANFIS model for the prediction of fc used for TC, ρ , SH and V_p .

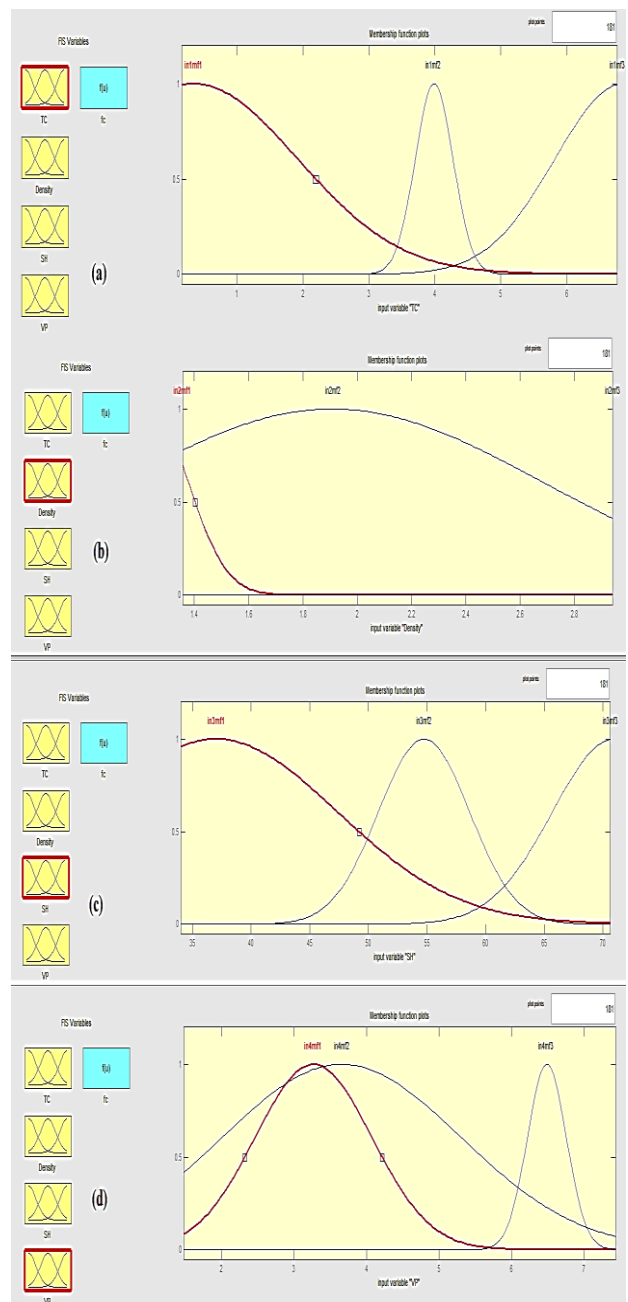


Fig. 6 Membership function plot for input (a) Texture Coefficient (TC); (b) ρ ; (c) SH; (d) V_p .

The ANFIS toolbox (anfisedit) in the MATLAB program was utilized for the required calculations. As a result, 81 rules were obtained for fc as follows;

IF(TC is TCmfi) and (ρ is pmfi) and (SH is SHmfi) and (V_p is V_p mfi) THEN (fc is fc mfi) ($i=1,2,\dots,81$)

The surface graph of two input variables that were used to predict the fc is presented in Fig. 7 and Fig. 8. Fig. 7 illustrates that, when ρ increased, fc increasing to 1.8, and at higher ρ the fc increased slowly, and fc increased rapidly while TC decreased rapidly from 4 to 2.

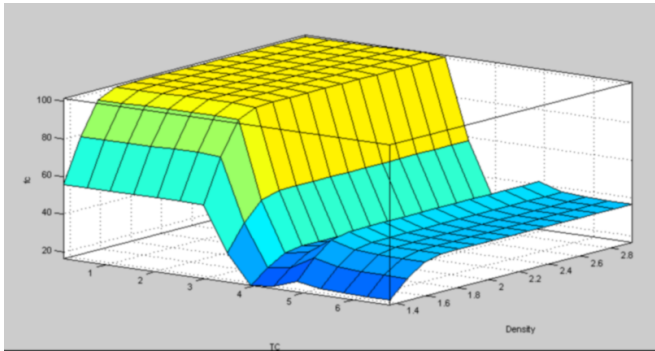


Fig. 7 Surface graph demonstrating the association of fc with TC and ρ .

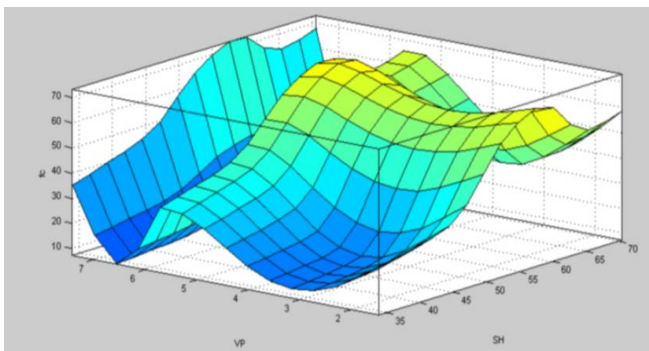


Fig. 8 Surface graph demonstrating the association of fc with V_p and SH.

6 Gene-expression programming (GEP)

The major disadvantage of the ANN and ANFIS methods is that they cannot provide mathematical prediction equations. The recommendation of the GP and GEP (a variant of GP) constitutes overcoming this issue. Gene-Expression Programming (GEP) cultivated by Ferreira [12] represents novel progressive artificial intelligence. This algorithm's fixed-length basic linear chromosomes are similar to the chromosomes used in genetic algorithms (GA), and the branched structures of varied sizes and shapes are akin to genetic programming's parse trees (GP). Its assessment system of any kind of information is similar to the biological assessment, and it represents a computer program the coding of which is performed in fixed-length linear chromosomes. The construction of a mathematical function, specified as a polygenetic chromosome, is done by utilizing the available data in the approach in the issue. Even though GEP largely does symbolic regression using the majority of GA and GP's genetic operators, GA, GP, and

GEP all have their own set of differences. GA adopts any mathematical expression as fixed-length symbolic chromosomes (strings); these strings are also represented as nonlinear tree entities of various sizes and shapes (parse). However, in GEP, they are encoded as fixed-length simple strings that are consequently expressed as expression trees of various sizes and shapes [36, 40, 42].

The use of GEP approaches revealed a higher degree of nonlinearity between empirical and predicted values, as well as high sensitivity and low error. Because GEP combines the advantages of genetic algorithms (GA) and genetic programming (GP), it has proven to be an excellent modeling method for dealing with complex real-life situations and the complex relationships between the parameters that affect them. Fig. 9 depicts such a gene, its expression tree (ET), and its algebraic expression. Ferreira is a good resource for more information [36, 40-42].

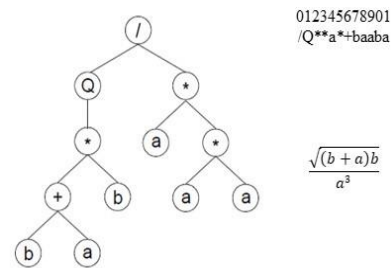


Fig. 9 A general illustration of the GEP expression tree and mathematical equation

6.1 GEP Model structure and parameters

To estimate fc using GEP, the model was constructed like ANN, and similar data were used in training, testing, and checking processes. The GeneXproTools software package was used to generate the GEP structure and choose the best prediction model and four main arithmetic operations (+, -, *, /) and many primary mathematical functions (3Rt, Avg, Inv, X2, X5, Min, Max, Not, Exp, Tanh, Ln) were used, and as the fitness function, the RMSE parameter was chosen. The fitness of the output models is significantly affected by the setting parameter values in the GEP. They contain the number of genes, the chromosome number, the ratio of genetic operators, and the head size of the gene. GEP models typically utilized a single gene and two lengths of heads to choose the chromosomal tree, and then increased the number of genes and heads one by one, throughout each run, during testing and training performance of each model.

Following a series of experiments, the models with the greatest outcomes had three numbers of genes and head lengths of 7, 7, and 8, respectively. As a result of the inclusion for the GEP Model, the sub-ETs (genes) were connected.

Finally, as a set of genetic operators, a mix of transposition, mutation, and crossover was utilized. Table 6 lists the parameters utilized in the training model. The best individual generation for fc prediction was discovered to be Chromosome 30. The accurate formulation obtained from the constructed models for fc is given by;

$$f_c = \left[\sqrt[3]{[(212.204 - 3SH)x(DxSH)x(-0.289)x[D - SH + 48.112]x[\ln(SH)]]} + \left[\left(\frac{1}{D-TC} \right) + [\ln(TC) - (TC + SH - 111.547)]x \right] + [V_p + [TCx(D - [D + 2(V_p + D)])] \right] + [V_p + [TCx(D - 2.385)^5]x77.48] \right] \quad [4]$$

Table 6 GEP parameters used in the developed model.

Parameter definition	GEP Model
Fitness function	RMSE
Number of chromosomes	30
Gene number	3
Inversion rate	0.00546
Mutation rate	0.00138
Gene recombination rate	0.00277
Gene transposition rate	0.00277
One-point recombination rate	0.00277
Two-point recombination rate	0.00277
Literals	21
Number of generations	2906680
Arithmetic operators	+ - x /
Mathematical function	3Rt, Mul3, Sub4, Ln, Add4, Inv, X ⁵
Tail Size	25
Head size	8
Gene Size	58
Linking function	Addition

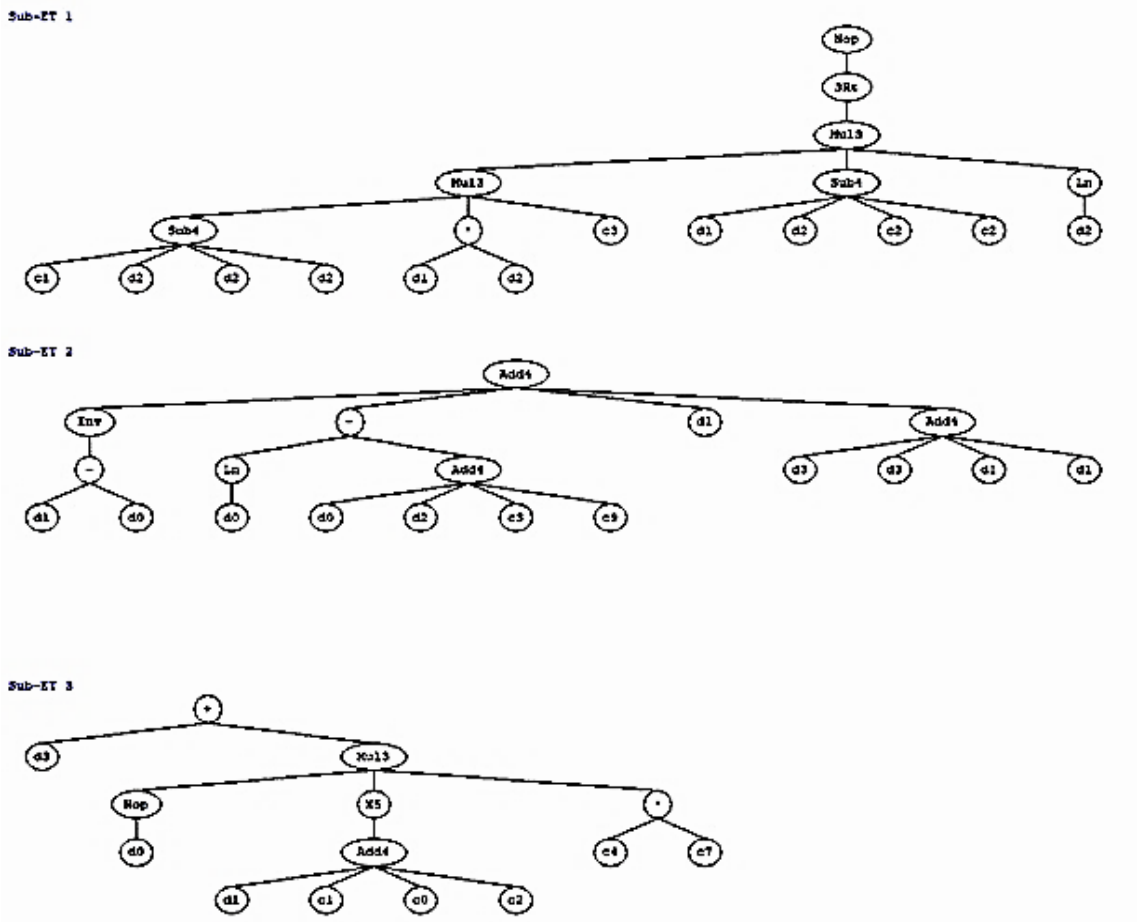


Fig. 10 Expression tree for GEP Model.

The formulation of the GEP model is shown in the expression tree in Fig. 10, where d_0 , d_1 , d_2 , and d_3 refer to TC, ρ , SH and V_p , respectively. Table 7 presents the constants used in the formulation.

Table 7 Constants in the GEP model.

Constant	S-ET1	S-ET2	S-ET3
C_0	-8.32	-4.90	5.64
C_1	212.20	-6.68	-8.30
C_2	-24.06	-8.74	0.28
C_3	-0.29	-9.26	4.02
C_4	7.59	-2.49	7.39
C_5	5.22	-7.31	10.49
C_6	9.86	0.55	9.57
C_7	-1.38	-5.18	10.49
C_8	5.35	0.90	-5.75
C_9	-8.56	-102.29	9.89

7 Result and discussion

The f_c of the rock was determined by RA and soft computing techniques, which are ANN, ANFIS, and GEP, by using the textural and physicochemical characteristics of the rock. The subdivision of the database into three sets, being training, testing, and checking, was performed. To control the predictive capacity performance of the empirical models established in this work, the correlation coefficient (R) and root mean square (RMS) error indices were computed. Table 8 shows the statistical success of all of the generated models.

Experimental studies and training, testing, and checking results that were developed by RA, ANN, ANFIS, and GEP are presented in Fig. 11-13. According to the statistical parameter, methods for soft computing (ANN, ANFIS, and GEP) give acceptable compliance considering the statistical assessment criteria contrary to RA. Because ANN, ANFIS, and GEP do not require preliminary knowledge of the functional associations between the variables, the approach in question has been employed for solving inverse problems. Predicting f_c by using the textural and physical properties of rocks is a very intractable and complex problem. The best outcomes concerning the R and RMSE values were provided by ANFIS (R: 0.95, RMSE: 10.94) from training. The above-mentioned values were found as 0.98 and 6.97 from testing and as 0.97 and 9.53 from checking. However, the other methods gave very close results, and the R and RMSE statistical values from training were found as 0.94 and 12.05 in ANN, and as 0.93 and 12.95 in GEP. Table 8 also shows the statistical values of f_c calculated as R and RMSE as a result of training, testing, and control in this model. The suggested ANN, ANFIS, and GEP models are appropriate and forecast the f_c values considerably near to the experimental values, as shown by all statistical values in Table 8. The calculated values had very small, noticeable deviations.

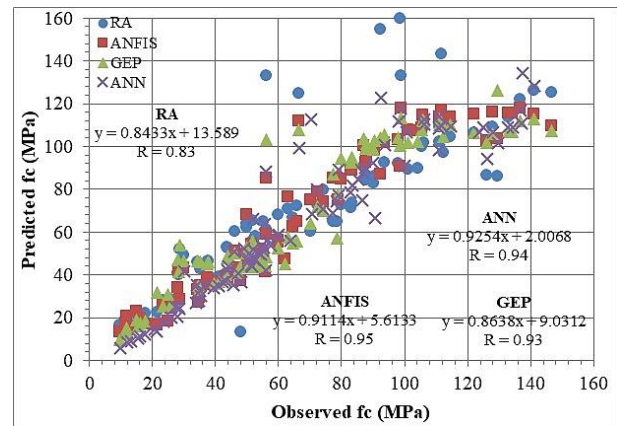


Fig. 11 Comparison between the experimental f_c and the training outcomes.

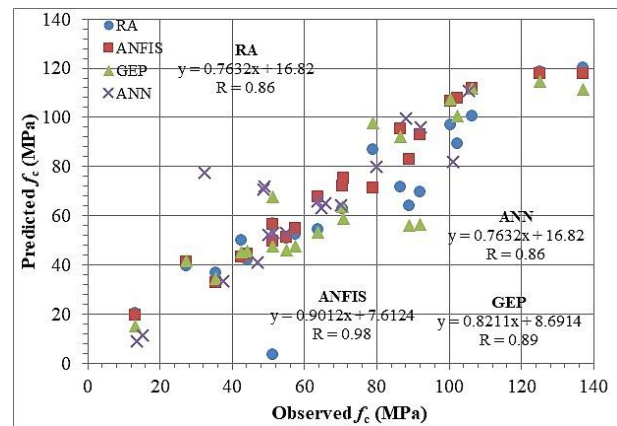


Fig. 12 Comparison between the experimental f_c and the testing outcomes.

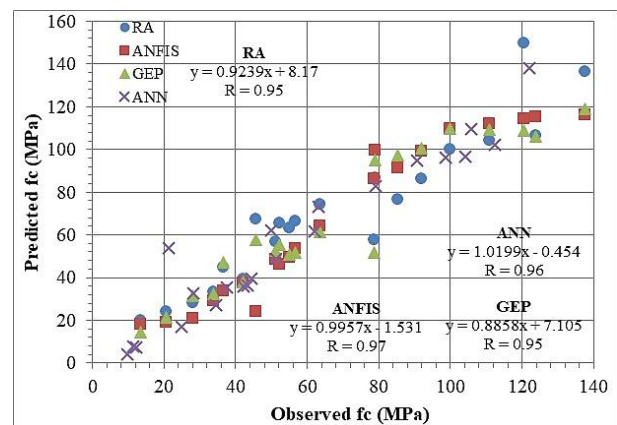


Fig. 13 Comparison between the experimental f_c and the checking outcomes.

Table 8 The models' performance statistics.

Models	Training		Testing		Checking	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
RA	0.83	22.98	0.86	15.03	0.95	11.78
ANN	0.94	12.05	0.86	9.81	0.96	15.79
ANFIS	0.95	10.94	0.98	6.97	0.97	9.53
GEP	0.93	12.95	0.89	14.76	0.95	10.81

8 Conclusion

In this work, four soft computing approaches, RA, ANN, ANFIS, and GEP, were used to estimate f_c values using the textural and physical-mechanical characteristics of rocks. These methods are simple to apply and do not require a reference sample to be determined in the laboratory or field. The following was concluded from this study:

The created model exhibited successful performance for all the soft computing techniques used, except for RA, and the best results were found with ANFIS (R: 0.95, RMSE: 10.95 for training, R: 0.98, RMSE: 6.97 for testing, and R: 0.97, RMSE: 9.53 for checking). In addition to this, other methods gave very close results (ANN: R:0.94, RMSE:12.05 for training, R:0.86, RMSE: 9.81 for testing, and R:0.96, RMSE: 15.79 for checking; GEP: R:0.93, RMSE:12.95 for training, R:0.89, RMSE: 14.76 for testing, and R:0.95, RMSE: 10.81 for checking), and RA found them partially suitable (R:0.83, RMSE:22.98 for training, R:0.86, RMSE: 15.03 for testing, and R:0.95, RMSE: 11.78 for checking).

These results show that soft computing techniques, which are ANN, ANFIS, and GEP, are quite suitable and practicable methods for solving inverse and complex problems, such as predicting f_c for rock materials.

The formulations obtained by GEP could be used easily by everybody, who is not knowledgeable about GEP.

Declaration of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity rate (iThenticate): 18%.

References

- [1] ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006, In: R. Ulusay and J. A. Hudson (Eds.), Ankara, Turkey, 2007.
- [2] ASTM, Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. Soil and Rock, Building Stones: Annual Book of ASTM Standards 4.08. Philadelphia, Pennsylvania, ASTM, 1984.
- [3] A. Asadi, Application of Artificial Neural Networks in Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Rocks using Well Logs and Drilling Data. In *Procedia Engineering*, 191, 279-286, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.182>
- [4] C. Zang and H. Huang, Prediction of rock mechanical parameters and rock mass classification by percussive drilling surveying in a rock tunnel, ISRM SINOROCK, Shanghai, China, June 2013. <http://doi.org/10.1201/b14917-28>
- [5] H. Fattahi, Applying soft computing methods to predict the uniaxial compressive strength of rocks from schmidt hammer rebound values. *Computational Geosciences*, 21, (4), 665–681, 2017. <http://doi.org/10.1007/s10596-017-9642-3>
- [6] A. Özbek, M. Unsal, and A. Dikec, Estimating uniaxial compressive strength of rocks using genetic expression programming. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(4), 325–329, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.05.006>
- [7] U. Åkesson, J. Lindqvist, M. Göransson, and J. Stigh, Relationship between texture and mechanical properties of granites, Central Sweden, by use of image-analysing techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(4), 277–284, 2001. <http://doi.org/10.1007/s100640100105>
- [8] K. Gunsallus and F. H. Kulhawy, A comparative evaluation of rock strength measures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 21(5), 233-248, 1984. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(84\)92680-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(84)92680-9)
- [9] R. Merriam, H. H. Rieke, and Y. C. Kim, Tensile strength related to mineralogy and texture of some granitic rocks. *Engineering Geology*, 4(2), 155–160, 1970. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(70\)90010-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(70)90010-4)
- [10] T. F. Onodera and H. M. Asoka Kumara, Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bulletin of Association Engineering Geology*, 22, 173-177, 1980. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.03.009>
- [11] R. Přikryl, Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology*, 87(3–4), 149–162, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.05.011>
- [12] A. Tuğrul and I. H. Zarif, Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51(4), 303–317, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00071-4)
- [13] R. Ulusay, K. Türeli and M. H. Ider, Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology*, 38(1–2), 135–157, 1994. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90029-9)
- [14] D. F. Howarth and J. C. Rowlands, Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20(1), 57–85, 1987.
- [15] A. Ersoy and M. D. Waller, Textural characterisation of rocks. *Engineering Geology*, 39(3–4), 123–136, 1995. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00005-Z](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00005-Z)
- [16] V. Gupta, and R. Sharma, Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya. *Engineering Geology*, 135–136, 1–9, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.006>
- [17] C. A. Ozturk, E. Nasuf and S. Kahraman, Estimation of rock strength from quantitative assessment of rock texture. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(6), 471–480, 2014.
- [18] Y. Ozcelik, F. Bayram and N. E. Yasitli, Prediction of engineering properties of rocks from microscopic data. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10), 3651–3668, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0625-3>

- [19] U. Atıcı and R. Comaklı, Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(1), 63–69, 2019. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8>
- [20] C. Gokceoglu, E. Yesilnacar, H. Sonmez and A. Kayabasi, A neuro-fuzzy model for modulus of deformation of jointed rock masses. *Computers and Geotechnics*, 31(5), 375–383, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.05.001>
- [21] R. Singh, A. Kainthola and T. N. Singh, Estimation of elastic constant of rocks using an ANFIS approach. *Applied Soft Computing Journal*, 12(1), 40–45, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.09.010>
- [22] K. Aali, M. Parsinejad and B. Rahmani, Estimation of Saturation Percentage of Soil Using Multiple Regression, ANN, and ANFIS Techniques. *Computer and Information Science*, 2(3), 127–136, 2009. <https://doi.org/10.5539/cis.v2n3p127>
- [23] B. Tiriyaki and A. C. Dikmen, Effects of rock properties on specific cutting energy in linear cutting of sandstones by picks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0062-7>
- [24] A. Azzoni, F. Bailo, E. Rondena and A. Zaninetti, Assessment of texture coefficient for different rock types and correlation with uniaxial compressive strength and rock weathering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29(1), 39–46, 1996.
- [25] M. Alber and S. Kahraman, Predicting the uniaxial compressive strength and elastic modulus of a fault breccia from texture coefficient. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(1), 117–127, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00603-008-0167-x>
- [26] U. Atıcı, Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9609–9618, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.156>
- [27] M. Sarıdemir, İ.B. Topçu, F. Özcan, and M. H. Severcan, Prediction of long-term effects of GGBFS on compressive strength of concrete by artificial neural networks and fuzzy logic. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1279–1286, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.021>
- [28] A. Öztaş, M. Pala, E. Özbay, E. Kanca, N. Çağlar and M. A. Bhatti, Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network. *Construction and Building Materials*, 20(9), 769–775, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.054>
- [29] J. L. Rogers, Simulating Structural Analysis with Neural Network. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 8(2), 252–265, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(1994\)8:2\(252\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(1994)8:2(252))
- [30] K. Swingler, Applying neural networks a practical guide. London: Academic Press, New York, 1996.
- [31] M. M. Alshihri, A. M. Azmy and M. S. El-Bisy, Neural networks for predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2214–2219, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.003>
- [32] J. S. R. Jang, ANFIS: Adaptive-Neuro-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3), 665–685, 1993. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- [33] H. F. Ho, Y. K. Wong, A. B. Rad, and W. L. Lo, State observer based indirect adaptive fuzzy tracking control. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(7), 646–663, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2005.02.003>
- [34] C. X. Wong and K. Worden, Generalised NARX shunting neural network modelling of friction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(1), 553–572, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.08.029>
- [35] T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions On*, SMC-15(1), 116–132, 1985. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1450-4.50045-6>
- [36] C. Kayadelen, O. Günaydin, M. Fener, A. Demir, A. Özvan, Modeling of the angle of shearing resistance of soils using soft computing systems. *Expert Systems with Applications*, 36(9), 11814–11826, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.04.008>
- [37] H. Demuth and M. Beale, *Neural Network Toolbox For Use with MATLAB - User Guide*. The MathWorks, 2002.
- [38] S. Akkurt, G. Tayfur and S. Can, Fuzzy logic model for the prediction of cement compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1429–1433, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.020>
- [39] İ. B. Topçu and M. Sarıdemir, Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic. *Computational Materials Science*, 41(3), 305–311, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.04.009>
- [40] A. Cevik, A new formulation for longitudinally stiffened webs subjected to patch loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 1328–1340, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.12.004>
- [41] C. Ferreira, *Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems*. *Complex Systems*, 13(2), 1–22, 2001. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0102027>
- [42] D. G. Muñoz, Discovering unknown equations that describe large data sets using genetic programming techniques. Master Thesis, Linköpings Universitet, Linköping, Sweden, 2005.





Çatlaklı ankastre sandviç kirişlerin serbest titreşim analizi Free vibration analysis of cracked cantilever sandwich beams

Yusuf Cunedioğlu^{1,*} , Burak Devocioğlu² 

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

Öz

Bu çalışmada bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan kompozit sandviç kirişlerin serbest titreşimi incelenmiştir. Çatlaklı ve çatlaksız halde sandviç kirişin doğal frekanslarının doğrulanması analitik ve ANSYS yazılım programı ile sağlandıktan sonra daha hızlı çözüm elde etmek adına analizler ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada U ve V çatlak yapısının doğal frekans değerleri üzerindeki etkisi farklı çatlak konumlarında, farklı çatlak derinliklerinde ve farklı çatlak genişlikleri için incelenmiştir. Çalışmada 3 ve 5 tabakalı sandviç kirişler incelenmiştir. İncelenen bu parametrelerin kirişin doğal frekans değerlerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çatlak, Serbest titreşim, Kompozit sandviç kiriş, ANSYS

1 Giriş

Kompozit malzemeler günümüzde otomotiv, savunma sanayi, havacılık ve inşaat sektörü başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Böyle bir malzemenin yapılmasının amacı bileşenlerin tek başına iken mevcut olmayan bazı özelliklerinin ilave edilen malzeme ile kazandırılmasıdır. Bu yüzden farklı tip malzeme kombinasyonları deneyerek oluşturulan kompozit yapılar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Kullanım ve çevre şartlarının etkisiyle sandviç kompozit kirişlerde zamanla çatlak hasarları oluşmaktadır. Oluşan bu çatlak hasarları kiriş yapısının dinamik karakteristiklerini etkilemektedir. Yapının rezonans durumuyla karşılaşmaması açısından olası çatlak durumunun dinamik davranışının belirlenmesi önem kazanmaktadır. Literatürde kompozit sandviç kirişlerin serbest titreşimi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları şöyledir; Negru ve vd. [1] çalışmalarında izotropik malzemeli ankastre sandviç kirişlerin serbest titreşimlerini incelemişlerdir. Çalışmada U çatlak etkisinin farklı çatlak derinliklerinde kirişin doğal frekans değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tam vd. [2] açık kenar çatlakları içeren fonksiyonel olarak derecelendirilmiş grafen nanoplatelet takviyeli kompozit (FG-GPLRC) kirişlerin serbest titreşim ve burkulmasını incelemişlerdir. Çatlak içeren kompozit kirişlerde alt ve üst yüzeylere grafen nanoplatelet malzemesinin daha fazla ilave edilmesinin doğal frekans değerleri üzerinde önemli etkisi olduğunu doğrulamışlardır. Cunedioğlu ve Shabani [3] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş çatlak içeren çok

Abstract

In this study, the free vibration of composite sandwich beams, one end of which is fixed and the other end is free, was investigated. The verification of the natural frequencies of the sandwich beam with and without cracks was provided with analytical and ANSYS software. The analyses were carried out with the ANSYS program in order to obtain a faster solution. In the study, the effect of U and V crack structures on natural frequency values was investigated for different crack locations, crack depths, and different crack widths. In the study, 3-layer and 5-layer sandwich beams were examined. It has been observed that these investigated parameters significantly affect the natural frequency values of the beam.

Keywords: Crack, Free vibration, Composite sandwich beam, ANSYS

katmanlı sandviç kirişlerin serbest titreşimini geliştirdikleri bir MATLAB kodu ile lineer elastik kırılma mekaniği teorisi kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarını ANSYS yazılımı ile desteklemişlerdir. Shahdin vd. [4] farklı malzeme kombinasyonları ile oluşturulan kompozit sandviç kirişlerin serbest titreşimini deneysel olarak incelemişlerdir. Shabani ve Cunedioğlu [5] fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin oluşturulan değişken kesitli ve çatlak içeren simetrik kirişin serbest titreşim durumunu incelemişlerdir. Samborski vd. [6] çalışmalarında kirişlerin üzerindeki hasar etkisinin, kirişlerin dinamik davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışmayı değişik sınır şartları altında kirişlerin titreşimlerini simüle etmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Deneysel bulgular ile sayısal sonuçları karşılaştırarak doğrulama yapmışlardır. Gillich vd. [7] sandviç yapıdaki kirişler üzerinde oluşan çatlakların davranışlarını incelemişlerdir. Erdurcan ve Cunedioğlu [8] çatlak içeren fonksiyonel derecelendirilmiş bir malzeme ile kaplanmış alüminyum kirişin serbest titreşim analizlerini incelemişlerdir. Daş ve Yılmaz [9] çalışmalarında çatlaklı dairesel eğri kompozit kirişlerin düzlem içi titreşimlerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Rayleigh-Ritz metodu ile çatlakların farklı konum ve derinlikleri için incelemeler yapmışlardır. Meshram ve Pawar [10] alüminyum kiriş üzerindeki belirli konum için çatlak yapısını incelemişlerdir. Çatlak konumu, çatlak derinliğinin doğal frekans değerleri arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Analizleri ANSYS yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Toygar vd. [11] kompozit kirişlerde ara yüzeyde oluşan çatlakların burkulma yükü ve serbest

titreşim üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma deneysel ve sonlu elemanlar metodunu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Turan ve Kahya [12] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizlerini Navier tipi çözüm yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Aslan vd. [13] birinci mertbe kayma deformasyon teorisine dayalı doğru eksenli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimini incelemişlerdir. Aslan vd. [14] çift yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılan doğru eksenli kirişlerin serbest titreşimlerini frekans uzayında incelemişlerdir. Katı ve Gökdağ [15] uç kütle eklentili kirişlerin serbest titreşimini Multi-Step Diferansiyel Transform Metodu kullanarak incelemişlerdir. Sayman vd. [16] tek tip çatlak yapısının sandviç kirişler üzerindeki delemantasyon etkisini deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Akbaş [17] çatlaklı fiber takviyeli kompozit kirişlerin basma kuvveti altında burkulmasını incelemiştir. Shabani ve Cunedioğlu [18] iki çatlaklı fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişlerin serbest titreşim durumunu incelemişlerdir.

Bu çalışmada ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle doğal frekans değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan kompozit sandviç kirişler ele alınmıştır. Literatürde genellikle homojen izotropik bir malzemeden yapılmış tek bir çatlak tipinin (U) farklı çatlak konumları ve farklı çatlak derinlikleri için analizler yapılmıştır. Ayrıca sandviç yapıda U çatlak yapısına ait nümerik analizlerde mevcuttur. Bu çalışmanın literatürden farkı ise farklı çatlak tiplerinin (U ve V) sandviç kirişler üzerindeki serbest titreşim etkisinin analitik ve nümerik olarak incelenmesi ve karşılaştırılmasıdır. Çalışmada iki farklı kiriş tasarımı (3 ve 5 tabakalı) için U ve V çatlak tipinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada farklı çatlak konumu, farklı çatlak derinliği ve farklı çatlak genişliklerinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Çatlaksız ve çatlaklı halde homojen izotrop bir kirişin serbest titreşim teorisi

Elastik homojen izotrop bir kirişin serbest titreşim durumunu kontrol eden diferansiyel ifade aşağıdaki denklemle belirtilmiştir [19].

$$EI \frac{a^4 y}{ax^4} + m \frac{a^2 y}{at^2} = 0 \quad (1)$$

Burada E elastisite modülünü, m kirişin kütleini ve I dikdörtgen kesitli kirişin atalet momentini ifade etmektedir. Denklem (1)'in çözümü değişkenlerin ayrılması metodu ile bulunabilir. Bu denklem için önerilen çözüm fonksiyonu aşağıdaki denklem ile verilmektedir [19].

$$y(x, t) = Y(x)f(t) \quad (2)$$

Denklem (2), Denklem (1)'in içine yerleştirilip, gerekli matematiksel işlemler ve ankastre kiriş sınır koşulları

uygulandıktan sonra çatlaksız halde doğal frekans ifadesi rad/s cinsinden aşağıdaki denklem ile verilmektedir [19].

$$\omega_n = (\lambda_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} = (\lambda_n)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^2}} \quad (3)$$

Çatlaklı halde doğal frekans ifadesi aşağıdaki denklem ile verilmektedir [19].

$$\omega_{nc} = (\lambda_n)^2 \sqrt{\frac{EI_1}{\rho AL^2}} \quad (4)$$

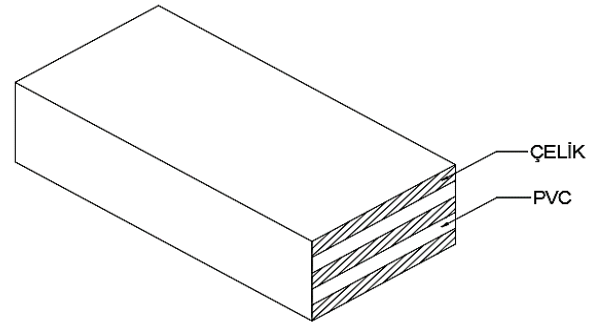
Burada I_1 çatlaklı kirişin atalet momentini, ρ kiriş yoğunluğunu, A kiriş kesit alanını ve L kiriş boyunu ifade etmektedir. $\lambda_n L$ 'nin ilk dört mod için değerleri aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir [19].

Tablo 1. $\lambda_n L$ 'nin ilk dört mod değerleri

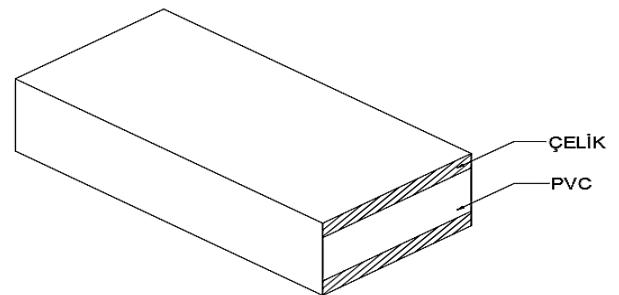
Index	$\lambda_n L$
n=1	1,8751
n=2	4,69409
n=3	7,85476
n=4	10,9955

2.2 Kompozit kirişin modellenmesi

Kompozit kirişler genellikle farklı mekanik özelliklere sahip birçok tabakanın birleştirilmesi ile oluşturulur. Bu çalışmada 5 ve 3 tabakalı kompozit kirişler ele alınmıştır. Ele alınan kirişlerin malzeme kombinasyonları Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. 5 tabakalı kompozit kiriş



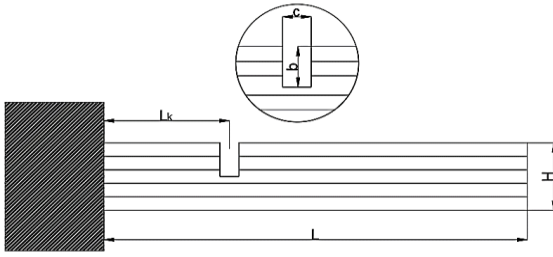
Şekil 2. 3 tabakalı kompozit kiriş

Şekil 1'de verilen 5 tabakalı kompozit kirişin orta tabakasındaki çelik malzemeyi polyvinly chloride (pvc)

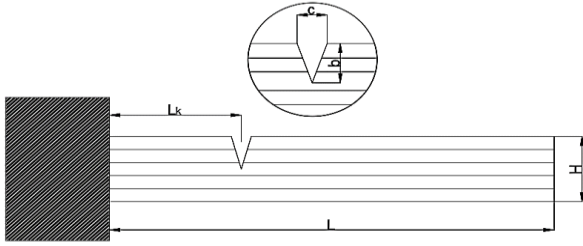
yaparak Şekil 2’de verilen 3 tabakalı kompozit kiriş elde edilmiştir. Burada Şekil 1’de belirtilen 5 tabakalı kompozit kirişin tabaka kalınlıkları eşit olup her biri 1 milimetre (mm) olmakla beraber Şekil 2’de belirtilen 3 tabakalı kompozit kirişin çekirdek kısmı 3 mm’dir.

2.3 Kompozit kiriş üzerinde çatlak modellenmesi

Çalışmada Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilen U ve V çatlak yapısı oluşturulan ankastre sandviç bir kiriş ele alınmıştır. Kiriş üzerindeki çatlak yapısının, çatlak derinliğinin, çatlak konumunun ve çatlak genişliğinin doğal frekans değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3. 5 tabakalı kompozit kiriş U çatlak yapısı



Şekil 4. 5 tabakalı kompozit kiriş V çatlak yapısı

2.4 Kompozit kiriş modelin doğrulanması

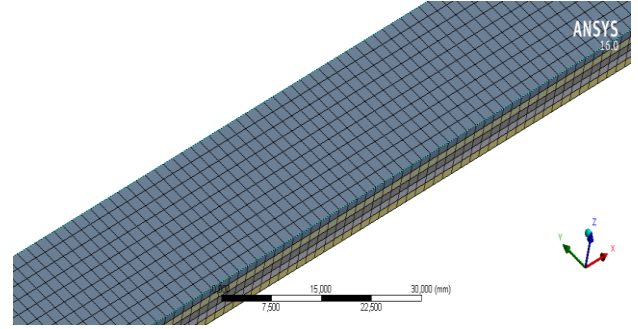
Bu çalışmada Şekil 3’te gösterilen 5 tabakalı ankastre kompozit sandviç kirişin doğal frekans değerlerinin doğrulanması için literatürde yer alan bir örnek ele alınmıştır. Kirişe ait geometrik ve malzeme özellikleri çelik için; $E_{çelik}=2,06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, $\rho_{çelik}=7850 \text{ kg/m}^3$, $\nu_{çelik}=0,29$, pvc için; $E_{pvc}=2,41 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\rho_{pvc}=1300 \text{ kg/m}^3$, $\nu_{pvc}=0,3825$. Kirişe ait uzunluk $L=1000 \text{ mm}$, çatlak konumu $L_k=274 \text{ mm}$, kalınlık $H=5 \text{ mm}$, kirişin genişliği $W=20 \text{ mm}$, çatlak derinliği $b=0,4 \text{ mm}$ olarak alınmıştır [1]. Doğrulama çalışması analitik ve ANSYS paket programıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. 5 tabakalı ankastre sandviç kirişin çatlaklı ve çatlaksız halde ilk dört doğal frekans değerleri

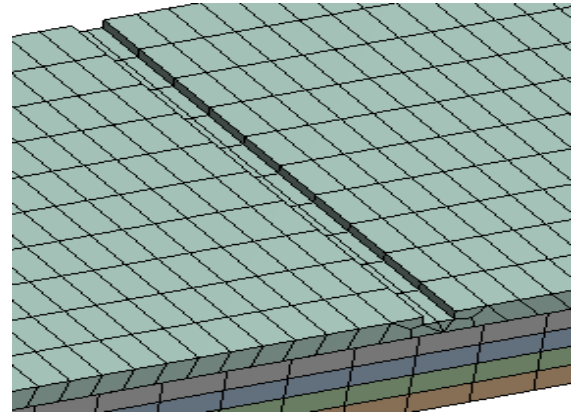
Çatlaksız		Çatlaklı	
Analitik (Hz)	ANSYS (Hz)	Analitik (Hz)	ANSYS (Hz)
4.518	4.518	4.516	4.514
28.314	28.225	28.307	28.223
79.282	78.62	79.262	78.556
155.36	152.92	155.32	152.83

Tablo 2’den görüleceği üzere analitik çözüm ile ANSYS 16.0 nümerik çözümünün uyum içerisinde olduğu görülmüştür. ANSYS sonuçlarının elde edilmesinde mesh

eleman boyutu 2 mm alınmıştır. Eleman tipi çatlaksız kiriş için quadratic yapıda olurken, çatlaklı kirişte quadratic/triangular olarak seçilmiştir. Çatlaksız kiriş için düğüm sayısı 187765 ve eleman sayısı 25000 olarak alınmıştır. Çatlaklı kiriş için ise bu değerler düğüm sayısı 225512 ve eleman sayısı 30050’dir. Çatlaklı haldeki kirişin düğüm sayısının ve eleman sayısının daha fazla olmasının nedeni ANSYS programının çatlaklı bölgeyi algılayarak daha hassas mesh yapısı oluşturmasıdır. Ankastre sandviç kirişe ait çatlaksız ve çatlaklı halde mesh yapısı Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 5. 5 tabakalı çatlaksız kompozit kirişin mesh görünümü



Şekil 6. 5 tabakalı U çatlaklı kompozit kirişin mesh görünümü

5 tabakalı kompozit kirişin U çatlak yapısına dair yakınsama çalışması Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. 5 tabakalı kompozit kirişin U çatlak yapısı için yakınsama tablosu

Mesh Boyutu (mm)	1.Doğal Frekans Hertz (Hz)	2.Doğal Frekans (Hz)	3.Doğal Frekans (Hz)
5	4.5149	28.223	78.56
4	4.5147	28.223	78.55
3	4.5147	28.223	78.56
2	4.5143	28.223	78.55
1,75	4.5143	28.223	78.55

Tablo 3’ten görüleceği üzere mesh boyutu küçüldükçe doğal frekans değerlerinin düştüğü ve mesh boyutunun 2 mm’den sonra sonuçlarda bir değişim göstermediğinden yakınsamanın 2 mm’de gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sandviç kirişin U çatlak tipinde belirtilen parametreler için

analizler gerçekleştirilerek elde edilen doğal frekans değerleri literatürle kıyaslanarak sonuçlar Tablo 4-8'de verilmiştir.

Tablo 4. 5 tabakalı kompozit kirişin 0,4 mm ve 0,6 mm çatlak derinliklerine göre doğal frekans değerleri

Mod i	$f_{i=0.4}$ Hertz (Hz) ^[1]	$f_{i=0.4}$ (Hz) Bu çalışma	$f_{i=0.6}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=0.6}$ (Hz) Bu çalışma
1	4.5035	4.5143	4.4975	4.5086
2	28.1562	28.223	28.152	28.219
3	78.3794	78.556	78.282	78.464
4	152.493	152.83	152.35	152.7
5	249.857	250.387	249.85	250.35
6	368.838	369.53	368.53	369.23
7	508.234	509.11	507.49	508.43
8	657.463	668.26	666.90	668.03
9	843.387	844.53	843.29	844.41
10	1034.58	1035.7	1033.4	1034.6

f_i : (i) değerine karşılık gelen frekans değeri

Tablo 5. 5 tabakalı kompozit kirişin 0,8 mm ve 1 mm çatlak derinliklerine göre doğal frekans değerleri

Mod i	$f_{i=0.8}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=0.8}$ (Hz) Bu çalışma	$f_{i=1}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=1}$ (Hz) Bu çalışma
1	4.487	4.5001	4.3908	4.4017
2	28.145	25.213	28.073	28.133
3	78.108	78.322	76.537	76.687
4	152.12	152.52	150.09	150.48
5	249.86	250.38	249.85	250.37
6	368	368.77	363.27	363.6
7	506.22	507.41	495.98	497
8	666.41	667.69	662.63	664.29
9	843.12	844.25	841.72	842.21
10	1031.3	1032.9	1013.9	1014.3

Tablo 6. 5 tabakalı kompozit kirişin 1,4 mm ve 2 mm çatlak derinliklerine göre doğal frekans değerleri

Mod i	$f_{i=1.4}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=1.4}$ (Hz) Bu çalışma	$f_{i=2}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=2}$ (Hz) Bu çalışma
1	4.3611	4.3716	4.3475	4.3588
2	28.050	28.109	28.040	28.099
3	76.074	76.212	75.868	76.014
4	149.51	149.93	149.27	149.7
5	249.84	250.38	249.83	250.37
6	361.89	362.15	361.28	361.53
7	493.31	494.37	492.18	493.3
8	661.67	663.47	661.26	663.09
9	841.28	841.72	841.05	841.39
10	1009.2	1009.5	1007.1	1007.4

Tablo 7. 5 tabakalı kompozit kirişin 2,2 mm ve 2,4 mm çatlak derinliklerine göre doğal frekans değerleri

Mod i	$f_{i=2.2}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=2.2}$ (Hz) Bu çalışma	$f_{i=2.4}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=2.4}$ (Hz) Bu çalışma
1	4.3374	4.3488	4.3155	4.3258
2	28.033	28.092	28.018	28.074
3	75.719	75.865	75.394	75.521
4	149.09	149.53	148.71	149.14
5	249.83	250.37	249.83	250.37
6	360.84	361.07	359.88	360.01
7	491.37	492.51	489.64	490.74
8	660.97	662.85	660.37	662.29
9	840.92	841.24	840.64	840.83
10	1005.5	1005.8	1002.1	1002.2

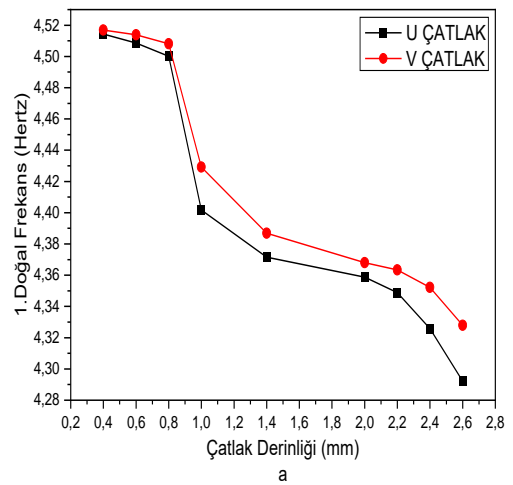
Tablo 8. 5 tabakalı kompozit kirişin 2,6 mm çatlak derinliklerine göre doğal frekans değerleri

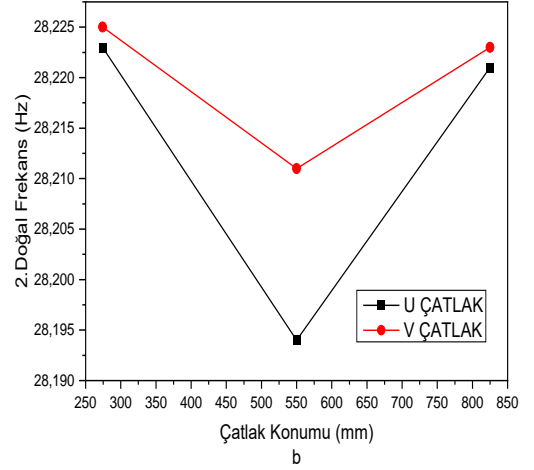
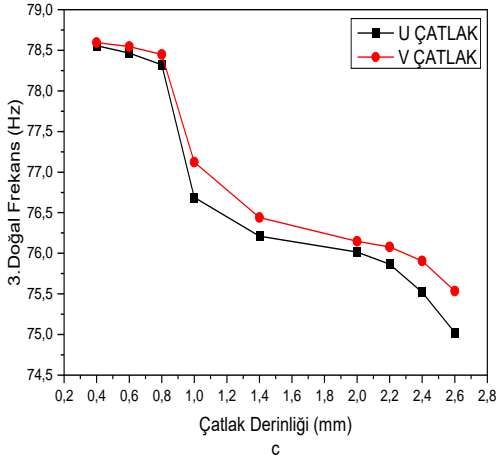
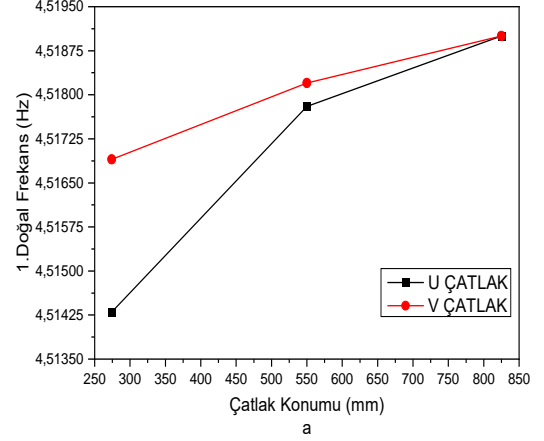
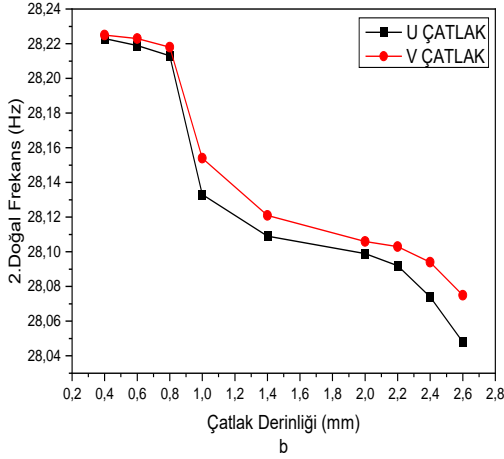
Mod i	$f_{i=2.6}$ (Hz) ^[1]	$f_{i=2.6}$ (Hz) Bu çalışma
1	4.2794	4.2921
2	27.992	28.048
3	74.8667	75.022
4	148.106	148.58
5	249.831	250.37
6	358.351	358.51
7	486.988	488.3
8	659.444	661.51
9	840.18	840.27
10	996.663	997.04

Tablo 4-8'den görüleceği üzere çatlak derinliğine ve mod sayısına karşılık gelen doğal frekans değerleri literatür ile uyumludur. Ayrıca artan çatlak derinliği ile birlikte doğal frekans değerlerinde düşüşler meydana geldiği gözükülmektedir. Denklem (4) incelendiğinde doğal frekans değerlerinin EI parametrelerine bağlı olduğu görülmektedir. Cisimde oluşan çatlakla birlikte I_1 değerlerinde bir azalma meydana geleceğinden dolayı doğal frekans değerlerinde bir düşüş meydana gelmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan Şekil 1 ve Şekil 2'deki gibi 5 ve 3 tabakalı kompozit kiriş modelleri ele alınmıştır. Çalışmada kompozit sandviç kirişlerin serbest titreşim analizi incelenmiştir. Analizler doğrulama kısmında ele alınan malzeme özellikleri ve geometrik boyutlar için yapılmıştır. Analizlerde tüm tasarımlar için mesh boyutu 2 mm olarak alınmıştır. Çalışmada literatürden farklı olarak V çatlak yapısı eklenerek U çatlak yapısı ile karşılaştırılmıştır. Literatürde yapılan çalışma 5 tabaka olmakla birlikte, 3 tabakalı bir yapı oluşturularak çelik-pvc malzeme kombinasyonundan oluşan kompozit kirişin serbest titreşim durumu incelenmiştir. Analizler U ve V çatlak yapısının farklı konumlarda, farklı çatlak genişliklerinde ve farklı çatlak derinliklerinde gerçekleştirilerek doğal frekans değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.



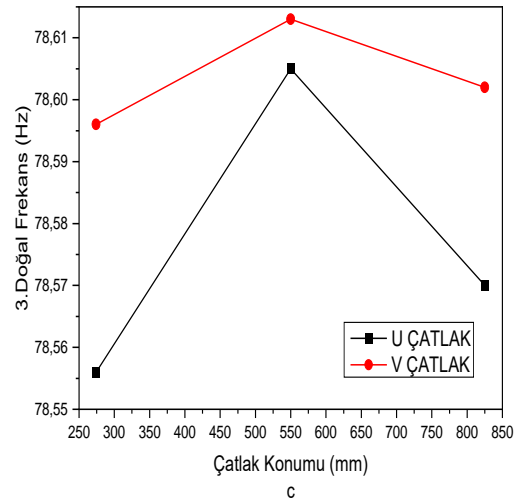


Şekil 7. $L_k=274$ mm için 5 tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin çatlak tipine ve derinliğine göre değişimi

Şekil 7'de ilk üç doğal frekansın $L_k=274$ mm için 5 tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin çatlak tipine ve derinliğine göre değişimi görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere çatlak derinliği arttıkça U ve V çatlak yapısının frekans değerlerinde düşüşler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum çatlak derinliğinin artmasıyla birlikte kirişin atalet momentinde azalmalara sebep olduğundan kirişin eğilme rijitliğindeki azalma ile izah edilebilir. Ayrıca V çatlak yapısının doğal frekans değerlerinin U çatlak yapısına nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum kirişten boşaltılan malzeme hacmi dolayısıyla kiriş kütlelerini etkilemesinden kaynaklanmaktadır.

Çatlak derinliği $b=0,4$ mm için 5 tabakalı kompozit kirişlerin çatlak konumlarına göre doğal frekans değerlerinin değişimi Şekil 8'de verilmiştir.

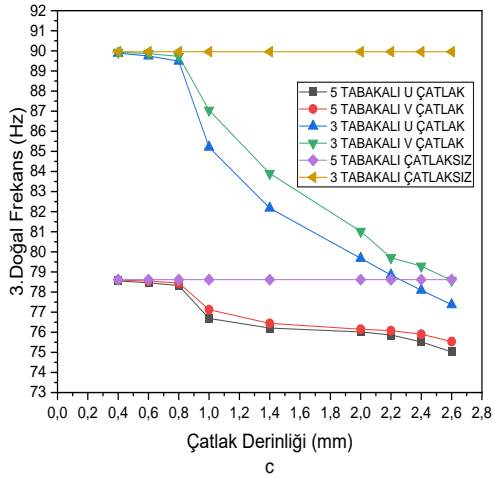
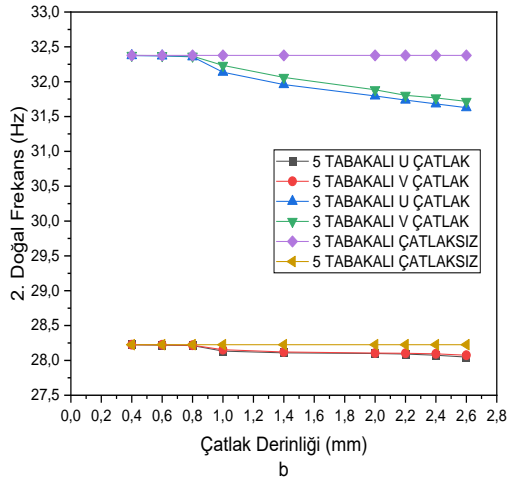
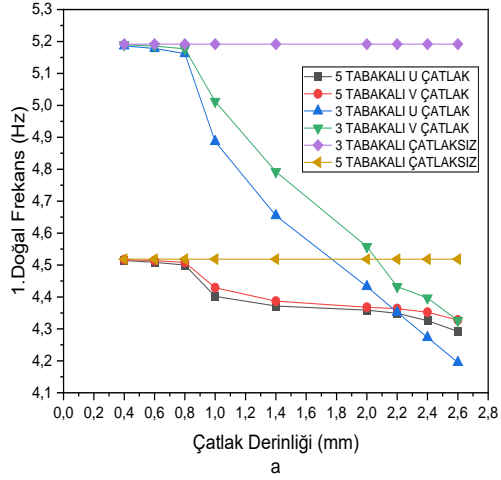
Şekil 8'de görülen 1. doğal frekans değerleri için, iki çatlak tipinde de çatlak konumu serbest uca doğru giderken frekans değerlerinde artışlar görülmüştür. Ayrıca U ve V çatlak tipi için çatlak konumu serbest uca doğru giderken doğal frekans değerleri arasındaki farkın giderek azaldığı görülmüştür.



Şekil 8. $b=0,4$ mm için 5 tabakalı kompozit kirişin doğal frekans değerlerinin çatlak tipine ve konumuna göre değişimi

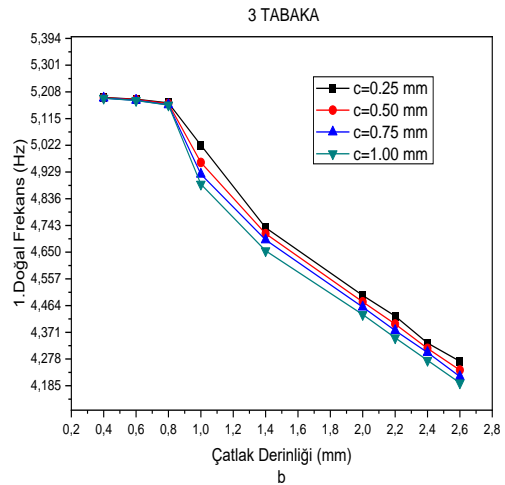
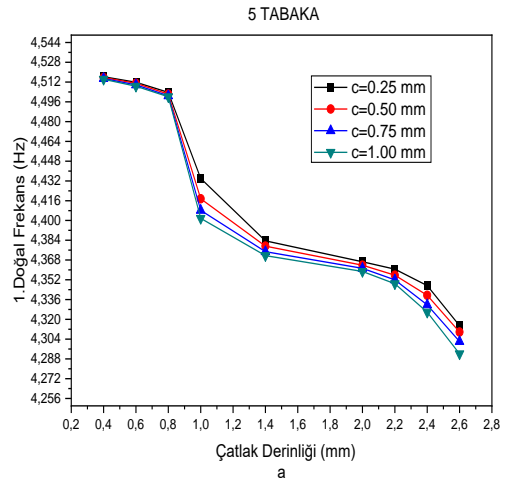
2. doğal frekans değerlerinde ise çatlak konumu 550 mm'ye kadar olan kısımda frekans değerlerinde bir azalma ve bu değerden sonraki frekans değerlerinde bir artış

gözlemlenmiştir. 3. doğal frekans değerlerinde ise 2. doğal frekans değerlerinin tersi bir durum görülmüştür.

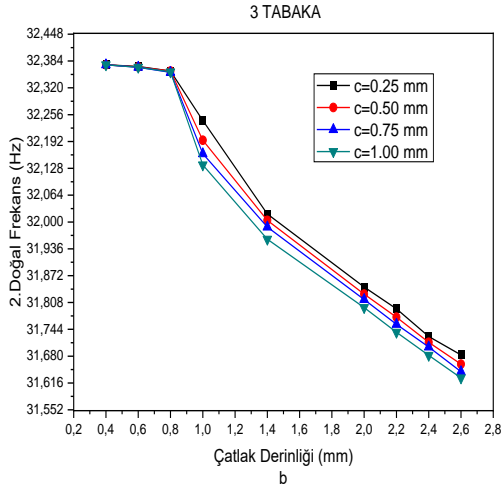
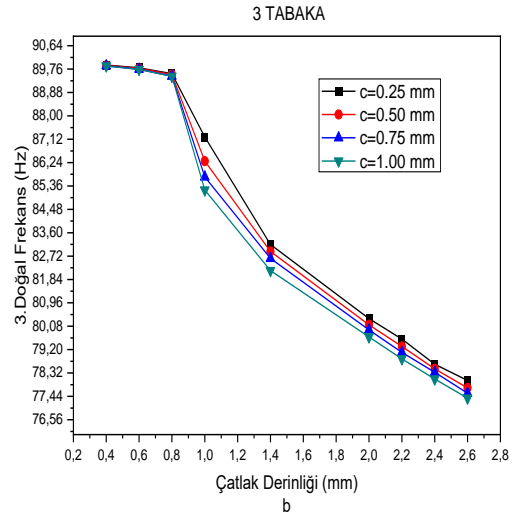
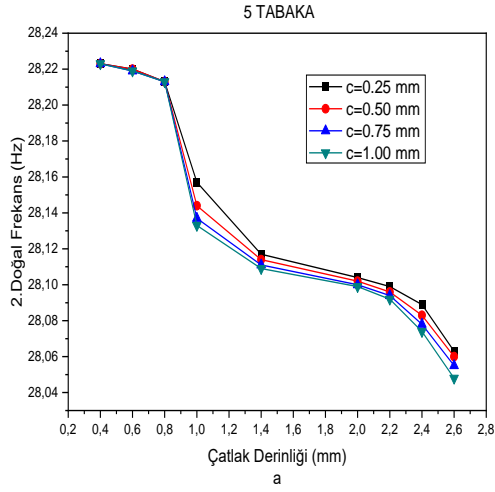


Şekil 9. $L_k=274$ mm için 3 ve 5 tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değerlerinin çatlak tipine ve çatlak derinliğine göre değişimi

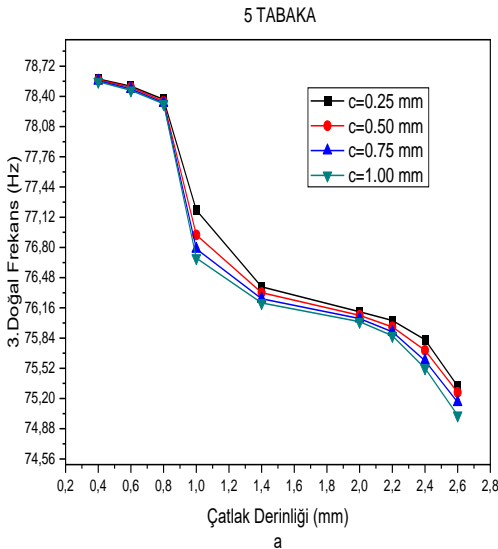
Şekil 9'da $L_k=274$ mm için 3 ve 5 tabakalı kompozit kirişlerin çatlaksız ve çatlıklı halde çatlak tiplerine ve çatlak derinliklerine göre ilk üç doğal frekansın değişimi görülmektedir. Genel olarak 3 tabakalı kompozit kirişlerin doğal frekans değerlerinin 5 tabakalı kompozit kiriş yapısına nazaran doğal frekans değerlerinden daha yüksek olduğu ayrıca 3 ve 5 tabakalı kompozit kirişlerin çatlak derinliğinin artmasıyla doğal frekans değerlerinde azalmalar olduğu görülmüştür. Ancak, Şekil 9a'da 3 tabakalı U çatlak tipinin 1. doğal frekans değerleri yaklaşık olarak çatlak derinliği 2,2 mm'den sonra 5 tabakalı kompozit kirişin frekans değerlerinin altına düştüğü görülmüştür. Şekil 9'dan da görüleceği üzere 3 tabakalı sandviç kirişlerin doğal frekans değerlerinin 5 tabakalı yapıya göre daha yüksek çıkmasının sebebi rijitlik ile izah edilebilir. 5 tabakalı kompozit yapının eğilme rijitliği (EI) ve yoğunluğu (ρ) 3 tabakalıya nazaran daha yüksek çıkmasına karşın, 3 tabakalı yapının eğilme rijitliğinin yoğunluğa oranı 5 tabakalı yapıya nazaran daha yüksek çıktığından doğal frekans değerleri daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum Denklem (3) ve Denklem (4)'ten de anlaşılmaktadır.



Şekil 10. $L_k=274$ mm için 3 ve 5 tabakalı kompozit kirişlerin 1. doğal frekans değerlerinin çatlak genişliğine ve derinliğine göre değişimi



Şekil 11. $L_k=274$ mm için 3 ve 5 tabakalı kompozit kirişlerin 2. doğal frekans değerlerinin çatlak genişliğine ve derinliğine göre değişimi



Şekil 12. $L_k=274$ mm için 3 ve 5 tabakalı kompozit kirişlerin 3. doğal frekans değerlerinin çatlak genişliğine ve derinliğine göre değişimi

Şekil 10, 11 ve 12' de $L_k=274$ mm için U çatlak yapısının ilk üç doğal frekansın çatlak genişliğinin çatlak derinliğine göre değişimi 3 ve 5 tabakalı kiriş için görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere 3 ve 5 tabakalı kompozit kiriş yapılarında çatlak genişliğinin artmasıyla birlikte doğal frekans değerlerinde azalmalar görülürken çatlak derinliğinin artmasıyla doğal frekans değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. V çatlak yapısı içinde aynı seyir gözlemlenmiştir. Ayrıca 3 tabakalı kompozit kirişin frekans değerlerinin 5 tabakalı kompozit kirişe göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

4 Sonuçlar

Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çelik-pvc kombinasyonu ile tasarlanan 3 ve 5 tabakalı kompozit kirişlerde U çatlak ve V çatlak yapısının çatlak derinliklerine, çatlak konumlarına ve çatlak genişliklerine göre serbest titreşimi incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Kompozit kirişlerde çelik-pvc malzeme kombinasyonu ile elde edilen 3 ve 5 tabakalı kompozit kiriş yapılarında 3 tabakalı yapının doğal frekans değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- V çatlak yapısının U çatlak yapısına nazaran doğal frekans değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Her iki çatlak tipinde de çatlak genişliğinin artmasıyla doğal frekans değerlerinde düşüşler olduğu tespit edilmiştir.
- Her iki çatlak tipi için çatlak konumunun serbest uca doğru kaydırılırken 1. doğal frekans değerlerinde sürekli bir artış meydana gelirken, 2. ve 3. doğal frekans değerlerinde artışlar ve düşüşler görülmüştür.
- Her iki çatlak tipi için çatlak derinliğinin artmasıyla birlikte doğal frekans değerlerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir.
- 3 tabakalı sandviç kiriş yapısının 5 tabakalı kiriş yapısına göre daha rijit bir yapı olduğu tespit edilmiştir.

- Her iki çatlak tipinde boşaltılan kütle miktarı kirişin doğal frekans değerini etkilediği tespit edilmiştir.
- Sandviç kiriş tasarımları için tabakalarda değişiklikler yapılarak arzu edilen frekans değerleri elde edilebilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] I. Negru, G. R. Gillich, Z. I. Praisach, M. Tufoi and N. Gillich, Natural frequency changes due to damage in composite beams. *Journal of Physics Conference Series*, 628 (1), 012091, 2015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/628/1/012091>.
- [2] M. Tam, Z. Yang, S. Zhao and J. Yang, Vibration and buckling characteristics of functionally graded graphene nanoplatelets reinforced composite beams with open edge cracks. *Materials*, 12 (9), 1412, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12091412>.
- [3] Y. Cunedioğlu and S. Shabani, Free vibration analysis of a single edge cracked symmetric functionally graded stepped beams. *Advances in Structural Engineering*, 23, 16, 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1177/1369433220939214>.
- [4] A. Shahdin, J. Morlier, L. Mezeix, C. Bouvet and Y. Gourinat, Evaluation of the impact resistance of various composite sandwich beams by vibration tests. *Shock and Vibration*, 18, 789-805, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/259295>.
- [5] S. Shabani and Y. Cunedioğlu, Free vibration analysis of cracked functionally graded non-uniform beams. 7, 015707, 2020. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6ad1>.
- [6] S. Samborski, J. Wiczorkiewicz and R. Rusinek, A numerical-experimental study on damaged beams dynamics. *Ekspluatacja i Niezawodność- Maintenance and Reliability*, 17 (4), 624-631, 2015. <https://doi.org/10.17531/ein.2015.4.20>.
- [7] G. R. Gillich, Z. I. Praisach, M. A. Wahab and O. Vasile, Localization of transversal cracks in sandwich beams and evaluation of their severity. *Shock and Vibration*, 2014 (3-4), 607125, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/607125>.
- [8] E. F. Erdurcan and Y. Cunedioğlu, Free vibration analysis of an aluminum beam coated with imperfect and damaged functionally graded material. *Archive of Applied Mechanics* 91, 1729-1737, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00419-020-01850-9>.
- [9] M. T. Das and A. Yılmaz, Vibration analysis of a cracked circular curved beams. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 783-791, 2018. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416380>.
- [10] N. A. Meshram and V. S. Pawar, Analysis of crack detection of a cantilever beam using finite element analysis. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 4 (4), 713-718, 2015. <https://doi.org/10.17577/ijertv4is041005>.
- [11] M. E. Toygar, Z. Kırıl, O. Sayman, Y. Arman and M. Özen, Effect of interface crack on lateral buckling behavior and free vibration response of a sandwich composite beam. *Journal of Composite Materials*, 47 (15), 1843-1851, 2012. <https://doi.org/10.1177/0021998312451611>.
- [12] M. Turan ve V. Kahya, Fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 119-130, 2018. <https://doi.org/10.31466/kfbd.453833>.
- [13] T. A. Aslan, A. R. Noori ve B. Temel, Birinci mertebe kayma deformasyon teorisine dayalı FD düz eksenli kirişlerin serbest titreşim analizi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (4), 21-28, 2019. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.702032>.
- [14] T. A. Aslan, A. R. Noori ve B. Temel, Çift yönlü fonksiyonel derecelenmiş malzemeli Timoshenko kirişlerinin serbest titreşim analizi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (3), 30-36, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.621183>.
- [15] H. D. Katı ve H. Gökdağ, Multi-step diferansiyel transform metodu ile uç kütle eklentili kirişlerin serbest titreşim analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (4), 1679-1693, 2019. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.571480>.
- [16] O. Sayman, M. E. Toygar, Z. Kırıl and B. G. Kırıl, Effect of the root crack on natural frequencies of sandwich composite beams, *Pamukkale University Journal of Engineering Science*, 19 (7), 298-302, 2013. <https://doi.org/10.5505/pajes.2013.96168>.
- [17] Ş. D. Akbaş, Post-buckling analysis of a fiber reinforced composite beam with crack, *Engineering Fracture Mechanics*, 212 (1), 70-80, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.03.007>.
- [18] S. Shabani and Y. Cunedioğlu, Free vibration analysis of functionally graded beams with cracks, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 6 (4), 908-918, 2020. <https://doi.org/10.22055/jacm.2019.30065.1672>.
- [19] C. Boga, Numerical and theoretical analysis of free vibration of a multi-cracked cantilever beam with rectangular cross section, *International Journal of Scientific and Technological Research*, 5 (3), 2019. <https://doi.org/10.7176/jstr/5-3-20>.





Investigation on post heat treatment parameters of additively manufactured AlSi10Mg parts in terms of time and build direction

Eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg parçalara ardıl ısıl işlem süreleri ve üretim yönü parametrelerinin etkisinin incelenmesi

Remzi Ecmel Ece^{1,*} , Ömer Keleş² , Bekir Sami Yılbaş³ 

¹ Turkish Aerospace Industries Inc., 06980, Ankara, Türkiye

² Gazi University, Mechanical Engineering Department, 06570, Ankara, Türkiye

³ King Fahd University of Petroleum and Minerals, Mechanical Engineering Department, 31261, Dhahran, Saudi Arabia

Abstract

This study reports the combinatorial influence of build direction and different ageing times. The Additively Fabricated (AF) with selective laser melting (SLM) specimens built-in various build directions (0° – 45° - 90°). Accordingly, Solution Heat Treatment (SHT) was applied then quenched in water at room temperature afterward. Subsequently, T4 and T6 ageing procedures were executed. Besides achieving advantageous T6 artificial ageing (AA), specimens were exposed to different time combinations (0.5, 1, 2, 6, 10 h). Although it was observed that the density did not change significantly with heat treatment, it was indicated that the hardness value decreased around 35% with the decrease in time, especially for T6 conditions. The microstructure disparity as a function of the utilized temperature, build direction, and time of the specimens were correlated to hardness values. It was observed that build direction and relative density results have no significant effect on the hardness.

Keywords: AlSi10Mg, SLM, Powder bed fusion, Ageing

1 Introduction

AM is a technique that has been trying to find a place in the industry since the 1980s. It has been on the agenda due to the development of technology and has not been able to find the value it deserves due to technological constraints [1,2]. The key advantage of AM is the capability of manufacturing lightweight, robust and complex shapes owing to layer by layer manufacturing methodology directly from computer-aided design (CAD) data. In the last few decades, interest in this technology has increased due to the fact that AM is one of the core methodologies of industry 4.0 [3,4].

Laser Powder Bed Fusion (LPBF) is one of the most prevalent techniques amongst the available AM processes that gives an opportunity to produce complex parts rapidly [5]. LPBF, also known as SLM or Direct Metal Laser Sintering (DMLS), is great interest. Regarding this technique, build volume is one of the drawbacks. Moreover, surface roughness and cost-effectivity also need to be

Öz

Bu çalışmada, Eklemeli İmalat ile üretilmiş parçaların inşa yönü ve farklı yaşlandırma sürelerinin parça üzerindeki etkileri incelenmiştir. Seçici Lazer Ergitme yöntemi (SLE) ile 0° – 45 – 90° inşa yönlerinde üretilmiş numunelere daha sonra çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmıştır. Takiben oda sıcaklığında su verme işlemine tabii tutulmuştur. Ardından da T4 ve T6 yaşlandırma işlemleri uygulanmıştır T6 yapay yaşlandırma işleminin avantajlarını görebilmek için numunelere farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlemle yoğunluğun önemli ölçüde değişmediği görülmekle birlikte, özellikle T6 koşulları için ısıl işlem süresinin artmasıyla birlikte sertlik değerinin %35 civarında azaldığı belirtilmiştir. Uygulanan sıcaklığın, inşa yönünün ve ısıl işlem sürelerinin bir fonksiyonu olarak mikro yapıdaki düzensizlikler incelenmiş ve sertlik değerleriyle ilişkilendirilmiştir. İnşa yönü ve yoğunluk sonuçlarının sertlik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: AlSi10Mg, SLM, Toz yataklı füzyon, Yaşlandırma

considered. Furthermore, the mechanical and geometrical quality of built parts highly depends on relative density and surface roughness [6].

Aluminium (Al)-Silicon (Si) alloys have become a highly preferred material in the industry due to their superior properties, such as good strength to weight ratio, high corrosion resistance, cost-effectiveness, and commercial availability [7]. In several publications, thermal post-processing parameters have been discussed [8-11]. Moreover, additively manufactured parts require specific post-processes to achieve good mechanical properties (mainly hardness and tensile strength). In general, specific heat treatments are applied, such as stress relief, low-temperature annealing, and natural/artificial ageing (T4, T6) to minimize residual stresses, achieve fine microstructure, and increase the toughness fatigue as creep properties [12-18]. The increase of mechanical properties at macroscale depends on the amount, distribution, and size of magnesium silicide (Mg₂Si) and Si in solid solution strengthening dislocation hardening and Hall-Petch like strengthening [19-

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ecmelece@gmail.com (R. E. Ece)

Geliş / Received: 20.06.2022 Kabul / Accepted: 01.07.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1133444

21]. In addition, the supersaturation of Si due to rapid cooling affects the cellular eutectic microstructure [21-23].

The presented study aims to observe optimum ageing parameters of the most used variation of Al-Si alloy's (AlSi10Mg) for T4 and T6 treatment conditions for samples fabricated with three different angles from the built plate (0°-45°-90°) regarding the heat treatment time. The microstructure dissimilarities consequential from the executed post treatments were interrelated to mechanical properties in terms of hardness, SEM, and XRD analyses.

2 Materials and methods

In this experimental study, commercially available gas atomized AlSi10Mg powder was used provided from GE Additive. The size distribution is 10 – 45 µm, while the average size is ~30 µm. The chemical composition of the powder is tabulated in Table 1. The powder morphology is spherical and has a fine satellite particle in which most of the sizes are less than 5 µm, as shown in Figure 1.

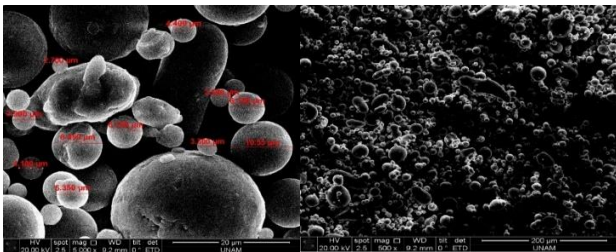


Figure 1. AlSi10Mg powder SEM micrograph showing the powder shapes

A Concept Laser M2 Cusing machine capable of Laser Powder Bed-Fusion was used for specimen fabrication. The system has a Yb-fibre laser with powers up to 400 W and a 60 µm laser spot size. The processing atmosphere is Argon, and Oxygen content was below 0.1 %. Chessboard scanning technique was applied for specimen fabrication which is not especially preferred. However, it is the standard scanning strategy of the Concept Laser System. The bi-directional scanning method has been applied as the laser scanning parameter for the inside of each island [24]. After melting of each islands, laser scans the all periphery of the layer to improve the surface finish. These islands are translated in the x, and y directions 1mm for each following layer and the inner scanning direction of the islands are changed by 90°. Samples were fabricated in three orientations according to build table (Figure 2). The long axis chosen perpendicular to the building table for vertically built samples. (coded below as AF-V; T4-V; T6-V / V:Vertical). According to the build table surface, the transversal direction is manufactured as 45° (coded below as AF-T; T4-T; T6-T / T: Transversal). Horizontally built samples (coded below as AF-H; T4-H;

T6-H / H: Horizontal) are positioned parallel to the fabrication & gas flow direction. The subsequent parameters were used: Laser power (P) 370 W, 1400 mm/s scan speed (Vs), layer thickness (Lt) of the part 25 µm. The hatch distance (Hd) was 112 µm while the energy density was calculated from the Equation 1 below and led to 94.38 J/mm³

$$Ed = P/(Vs \times Hd \times Lt) \quad (1)$$

Note that, as the current study assesses the influence of post-processing rather than the manufacturing parameters. So that the selected parameters were acceptable.

Specimens were first manufactured as cylindrical tensile test specimens with ø10 mm diameters, then cut to novel cylindrical samples with 10 mm heights from the top of each sample for heat treatment trials (Figure 2).

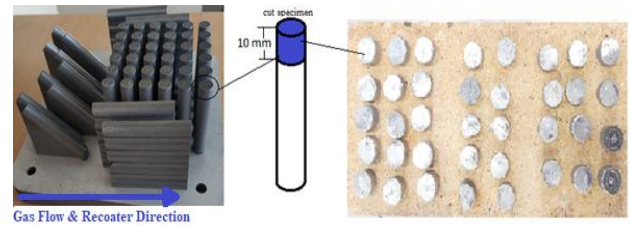


Figure 2. Test specimen manufacturing

According to the composition obtained from the energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis and thermodynamic calculations from the composition, 520°C must be exceeded to dissolve Mg₂Si. The samples were heated up to 530°C and dwelled for 2 hours for the solution heat treatment process, then quenched into water at room temperature (RT) (22°C) for approximately 30 minutes. Following this procedure, some samples were reserved for natural ageing for 96 hours. The rest were artificially aged at 200°C with different time intervals (0.5, 1, 2, 6, 10 hours) and cooled in the air afterward (Figure 3).

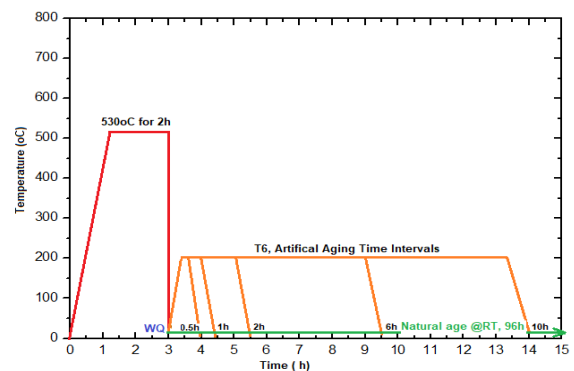


Figure 3. Schematic schedule of the ageing post-process

Table 1. Chemical composition of AlSi10Mg powder

	Al	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Zn	Sn	Cu	Ni	Pb
Bal.		9.6	0.16	<0.01	0.36	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
%wt		9	Max.	Max.	0.20	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
		11	0.55	0.45	0.45	0.15	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05

3 Results and discussion

3.1 Hardness and relative density vs. heat treatment

HR-15T microhardness measurements were performed with an EMCO-TEST/DuraScan hardness testing device with an applied load of 100gf according to the ASTM - E384 standard with a dwell time of 5 s. At least five measurements were taken from different zones of the etched surface. 100 mL of Keller's etching solution was prepared with a composition of 2.5 mL HNO₃ (nitric acid), 1.5 mL HCl (hydrochloric acid), 1 mL HF (hydrogen fluoride), and 95 mL H₂O (water). Etching was applied before the hardness measurement to determine the non-porous zones and increase the measurements' accuracy. Measurements were averaged and are depicted in Figure 4 with an error margin of 1 %. It is observed that the hardness increases in the range of 10 – 30 % in all directions as a result of T4 and T6 ageing.

Moreover, it was determined that the maximum hardness was reached in the T6 – 2 h samples, among which the highest hardness was achieved in T6 – 2 h samples, which were horizontal. However, lower hardness values were obtained in the T6 ageing process than AF in samples where 0.5 and 1 h were used. After 2 hours, there was an average decrease of 32 % compared to the maximum hardness in heat treatments. Because of the rapid cooling caused by the amount of laser energy corresponding to the unit area and the fact that this occurs quickly and prevents recrystallization and coarsening of the grain structure, higher hardness values were achieved [25-27].

Porosity is an important parameter for the mechanical behaviour of the materials for the parts produced by AM. The formation of porosity changes the bulk density of the material. In this context, density measurements were carried out for the materials produced. Density measurements were carried out in the Mettler-Toledo-XS204 device according to the Archimedes principle. The weight of the samples was measured by device first in the air and then immersing the samples in water. It was observed that the aging process did not have a significant effect on reducing the porosities. Among the AF samples, the lowest density was observed in horizontal samples and the highest density was observed in

vertical samples. Measurements indicates that this situation is due to the relatively low amount of porosity seen in vertical samples. No significant difference was detected in terms of density for the diagonal samples. There is a small amount of irregular increase in density for aging applied samples, unlike the AF samples. Similar results are also stated in some publications in the literature [28-30].

3.2 XRD results

Figures 5(a-c) present XRD spectral patterns of AM-AISI10Mg alloys fabricated in three different directions by the built table (0°, 45°, 90°) of the as-built, natural, and artificially aged conditions. A PANalytical X-Pert-Pro XRD machine was used for the analyses. The values in the graph are normalized to the highest peak of Al (111) such that all the data is presented in the same graph. Rapid cooling causes micro-solidification such that in the Al matrix, a limited quantity of Si peaks was noticed in the as-fabricated alloy, representing that a significant quantity of Silicon particles was supersaturated. The intensity of Si peaks increased after the 2 h SHT process but did not change drastically following Artificial Aging for 6 and 10 h. A small amount of a Mg₂Si phase could be detected at around 58° (220) and 100° (620) for T6 and as fabricated specimens. The crystallographic texture was observed in the XRD patterns of all plots; Al (111) presence the most substantial peak in the pattern, Si (200) revealed comparable intensity to Al (111) in the horizontal and transversal cross-section. On the contrary, Si (200) peaks are much higher than Al (111) peaks. The texture stated from XRD reveals that there is a thermal gradient along with the three directions during the process, which affects the preferential growth of Al along with the (111) orientation. In addition, the Al (200) peak of the vertical samples had a stronger concentration in contrast to horizontal and transversal samples. This slightly different texture in the three directions signifies that the vertical direction's energy density per unit area is higher than in the other directions. Note that similar texture behaviour remained for other directions after natural and artificial heat treatments.

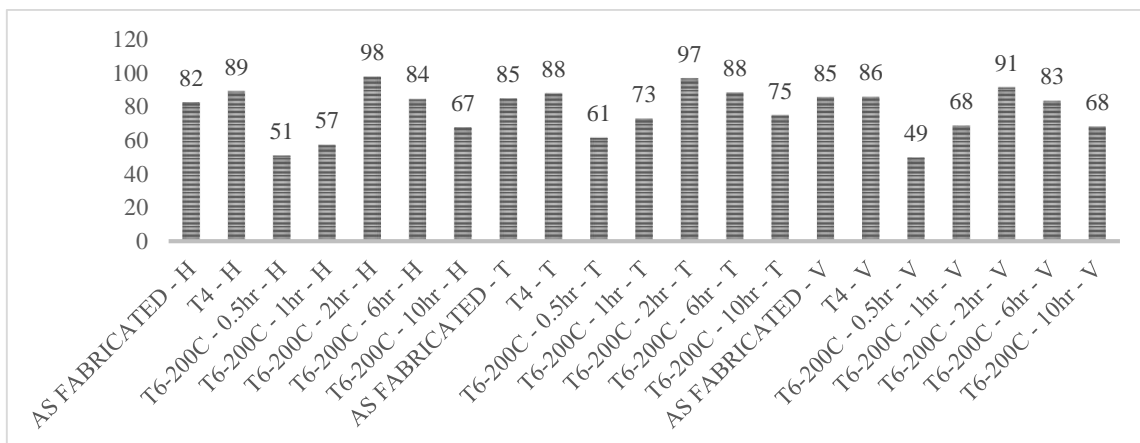


Figure 4. Hardness results of AM-AISI10Mg samples according to the HR-15T hardness measurement method

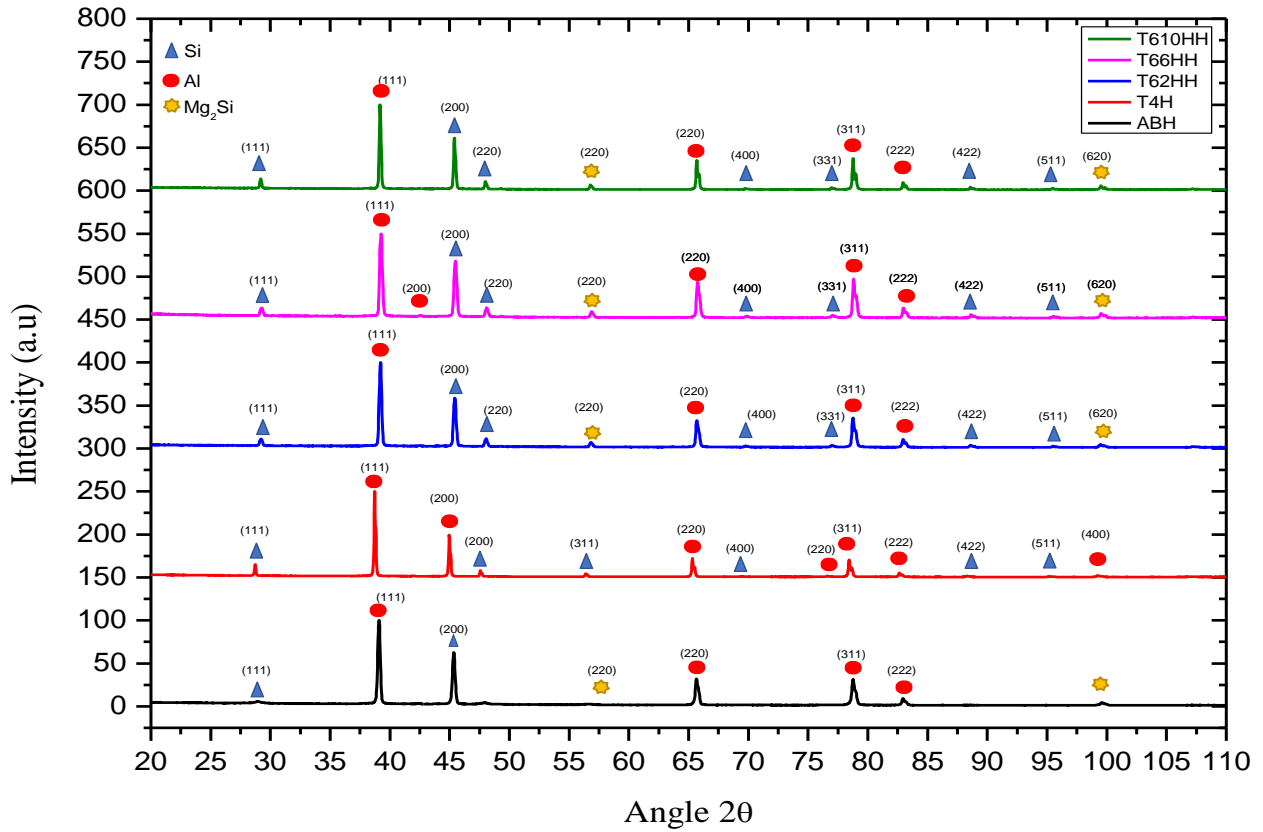


Figure 5a. XRD patterns of horizontal (0°) AM-AlSi10Mg samples AF-As fabricated, T4 naturally and T6 artificially aged samples (2 h, 6 h, 10 h)

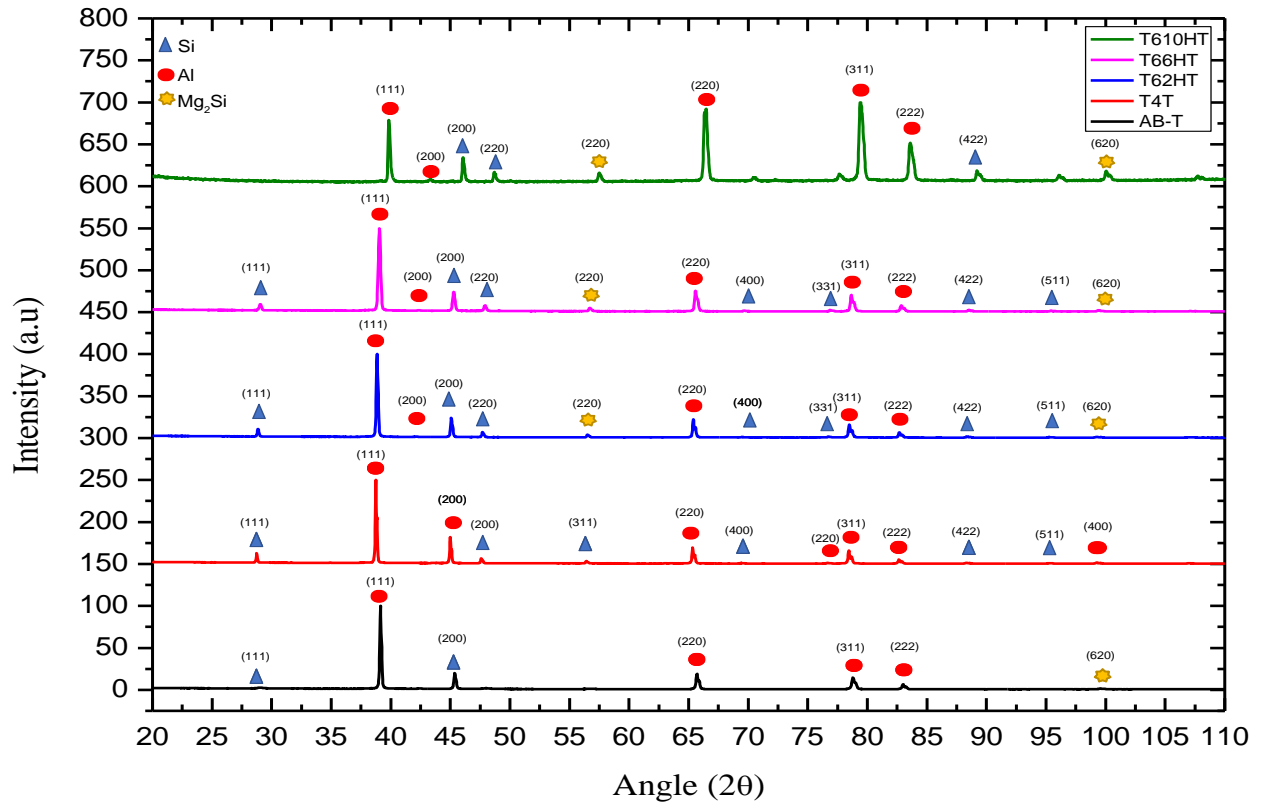


Figure 5b. XRD patterns of transversal (45°) AM-AlSi10Mg samples AF-As fabricated, T4 naturally and T6 artificially aged samples (2 h, 6 h, 10 h)

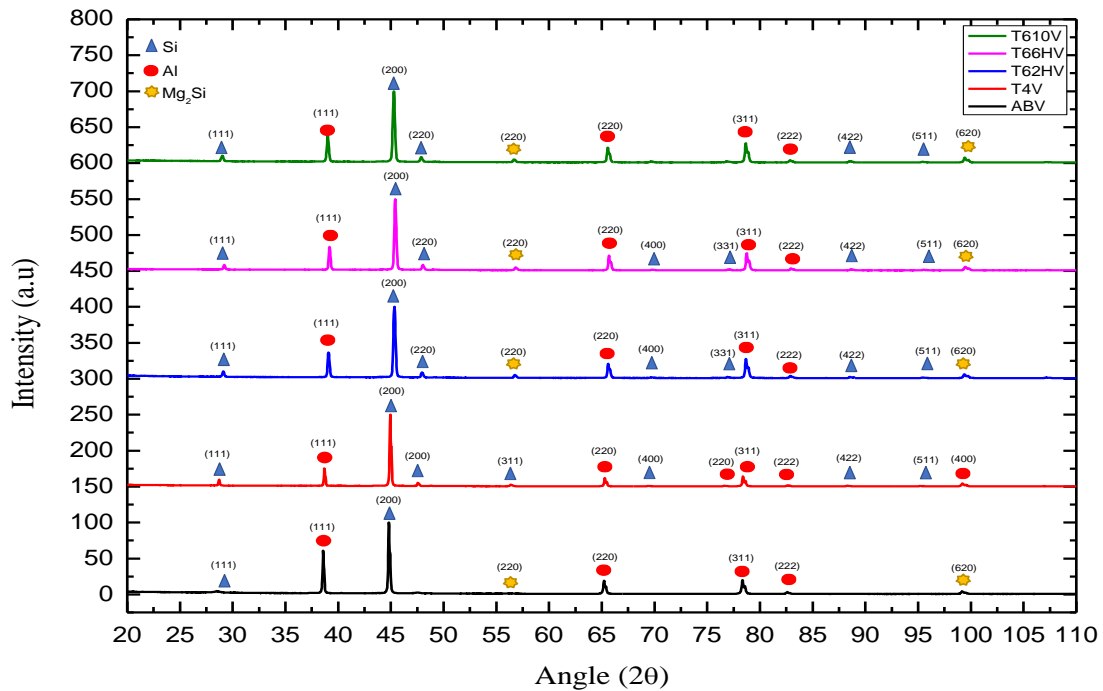


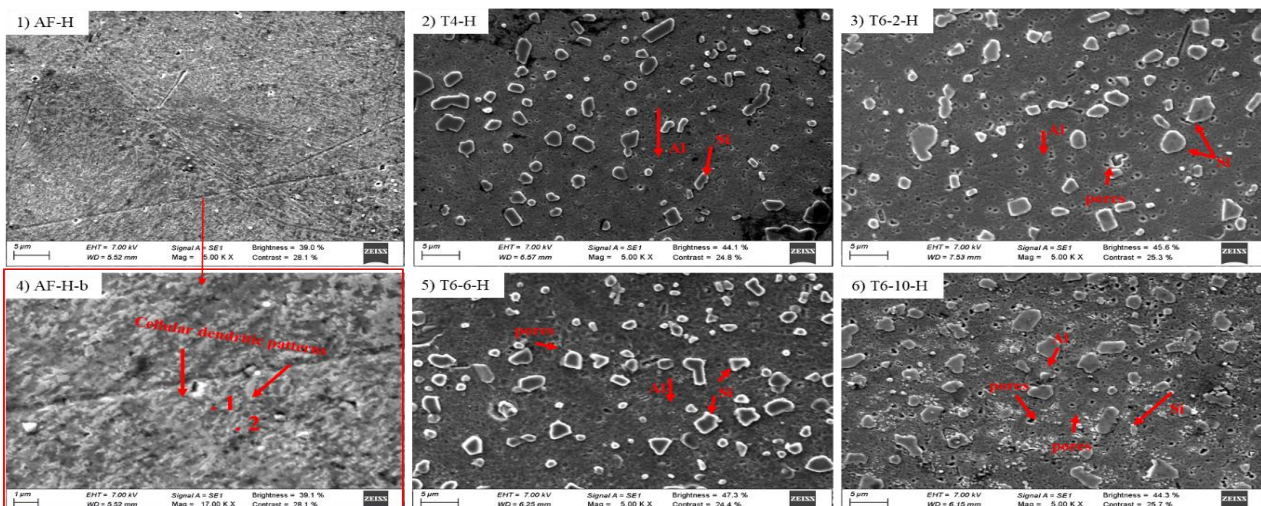
Figure 5c. XRD patterns of vertical (90°) AM-AISi10Mg samples AF-As fabricated, T4 naturally and T6 artificially aged samples (2h, 6h,10h)

3.3 Microstructural evaluation

The microstructure of samples was studied through a secondary electron method. The microstructure of AF samples consists of primary Al (dark region) within the majority of approximately 1 micron and Al-Si (lighter eutectic region), which can be seen in Figure 6. (AF-V-a; AF-V-b; AF-H-a; AF-H-b ; AF-T-a; AF-T-b) The eutectic structure located between some Al cells and enrichment of Si was also detected along the Al cell boundaries. The global microstructure of AM-AISi10Mg alloys after T4 (T4-V; T4-H ; T4-T) and 2 h, 6 h, 10 h, and SHT at 530°C is displayed in Fig. 6 (T6-2-V; T6-2-H; T6-2-T ; T6-6-V; T6-6-H; T6-6-T ; T6-10-V; T6-10-H; T6-10-T). Transformation of the microstructure by coarsening of Si particles during the SHT process was observed since columnar and "fish-scale" melt

pool features disappeared distinctively. The morphology and distribution of Si particles were further discovered in SEM micrographs in Figures. The predominance of Si particles seems to have an improper shape in all directions. The size variation lies approximately 500 nm to 5 µm while the aspect ratio remains similar in all directions.

In addition, no noticeable difference in shape and density of Si particles for Horizontal, Transverse, and Vertical cross-sections after the SHT were observed. Precipitate's approximate length was typically 1 – 5 µm and had a width of < 500 nm. EDS analysis performed to correctly recognise the precipitates. It is revealed that these precipitates were supplemented in iron (Fe). Moreover, coarsening and shape irregularity of Si particles are affected by T6 heat treatment time.



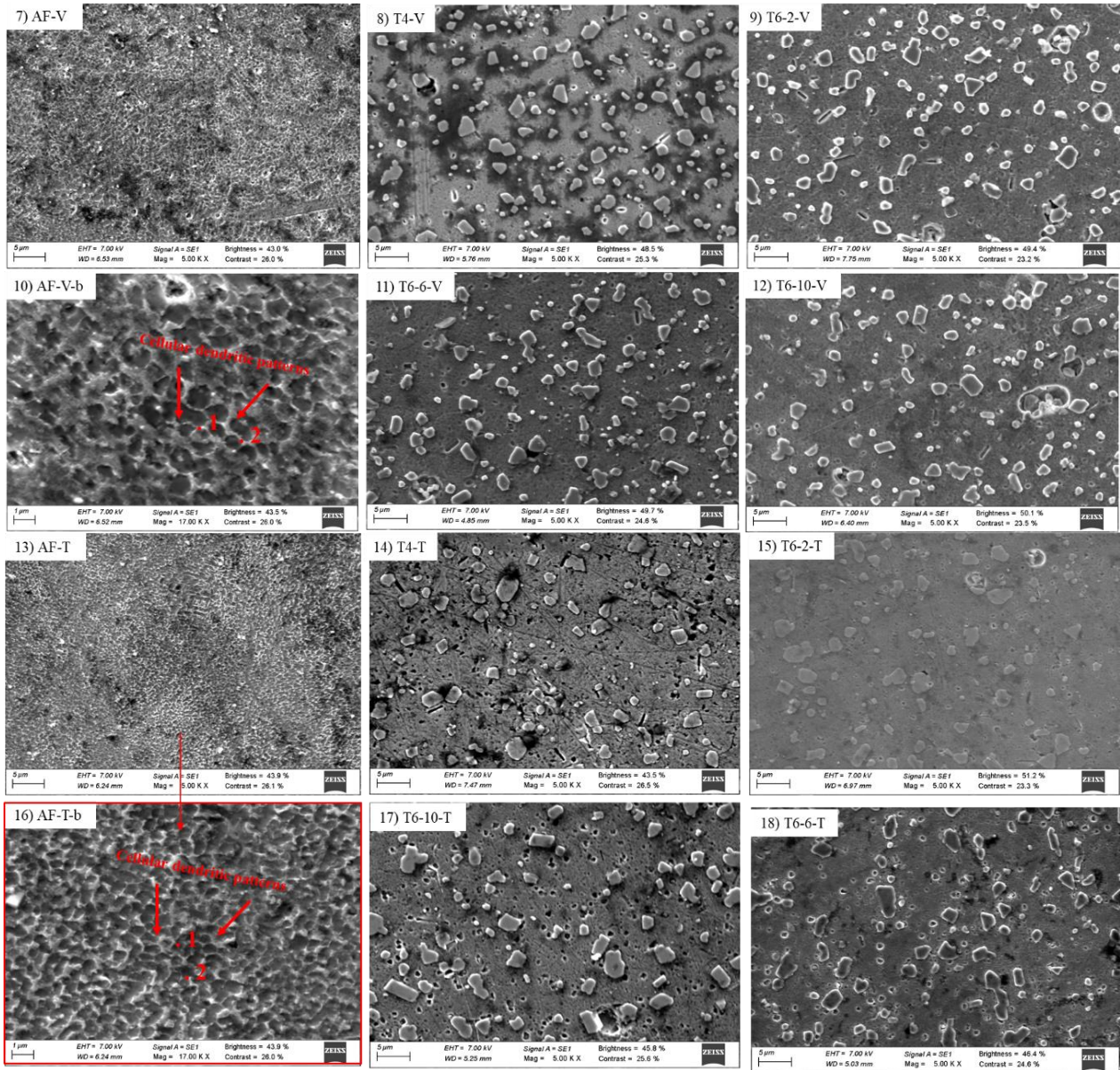


Figure 6. SEM view of samples. AF; As-Fabricated, T4; Natural Ageing; T6; Artificial Ageing. (H: Horizontal; V: Vertical; T: Transversal)

4 Conclusion

The effect of various post-process parameters was evaluated in this study for samples manufactured with different direction samples.

- This study paves the way for part manufacturers to identify specific post processes and choose the most suitable parameters for their design.
- The study may be further extended to evaluate the influences on mechanical properties of different heat treatments.
- Optimum heat treatment parameters regarding hardness are 2 hours at a time at 200 °C for all manufacturing directions.
- Especially in terms of time and cost for industrial applications, the method of obtaining parts with high

hardness and strength with direct heat treatment bypassing SHT needs to be investigated in detail.

Acknowledgement

This study is a part of the project (# 5189901) supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the Frontier R&D Laboratory Support Programme and hosted in Turkish Aerospace Industries Inc. The authors also acknowledge the support of King Fahd University of Petroleum and Minerals (KFUPM) in Saudi Arabia, Gazi University Turkey, and King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy (K.A.CARE) to accomplish this work.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity index (iThenticate): %2

References

- [1] B. Saleh et al., 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges, *Composite Part B Engineering*, 201, 108-376, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108376>.
- [2] J. Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials, *Applied Materials Today*, 7, 120-133, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>.
- [3] Wohlers T, Campbell RL, Wohlers report 2020: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. Fort Collins, Colo: Wohlers Associates; 2020.
- [4] L. Yi, C. Gläßner, and J. C. Aurich, How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from the commercial vehicle industry, *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 195-211, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.09.007>.
- [5] J. J. Lewandowski and M. Seifi, Metal additive manufacturing: A Review of mechanical properties, *Annual Review of Material Research*, 46, 151-186, 2016. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032024>.
- [6] A. Majeed, Y. Zhang, J. Lv, T. Peng, Z. Atta, and A. Ahmed, Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and porosity of AlSi10Mg alloy components manufactured by SLM, *Computational Industrial Engineering*, 139, 106-194, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106194>.
- [7] L. Zhou, A. Mehta, E. Schulz, B. McWilliams, K. Cho, and Y. Sohn, Microstructure, precipitates and hardness of selectively laser melted AlSi10Mg alloy before and after heat treatment, *Materials Characterization*, 143, 5-17, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.022>.
- [8] M. Moustafa, F. Samuel, H. Doty, Effect of solution heat treatment and additives on the microstructure of Al-Si (A413.1) automotive alloys, *Journal of Material Science*, 38, 4507-4522, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1027333602276>
- [9] I. Gutierrez-Urrutia, M. Munoz-Morris, D.G. Morris, Contribution of microstructural parameters to strengthening in an ultrafine-grained Al-7% Si alloy processed by severe deformation, *Acta Materials*, 55, 1319-1330, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.09.037>
- [10] B. Li, H. Wang, J. Jie, Z. Wei, Effects of yttrium and heat treatment on the micro-structure and tensile properties of Al-7.5 Si-0.5 Mg alloy, *Materials Design*, 32, 1617-1622, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.040>
- [11] M. Tang, P.C. Pistorius, J.L. Beuth, Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, 14, 39-48, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.12.001>
- [12] NT. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, N.M. Everitt, The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment, *Material Science and Engineering*, 667, 139-146, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.092>.
- [13] W. Li, S. Li, J. Liu, A. Zhang, Y. Zhou, Q. Wei, C. Yan, Y. Shi, Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism, *Material Science and Engineering*, 663, 116-125, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.088>.
- [14] L. Girelli, M. Tocci, M. Gelfi, A. Pola, Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy, *Material Science and Engineering*, 739, 317-328, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.026>.
- [15] K. Zyguła, B. Nosek, H. Pasiowiec, N. Szysiak, Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique, *Results in Materials* 104, 462-472, 2018.
- [16] X. Yu, L. Wang, T6 heat-treated AlSi10Mg alloys additively-manufactured by selective laser melting, *Procedia Manufacturing*, 15, 1701-1707, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.265>.
- [17] L. Zhou, A. Mehta, E. Schulz, B. McWilliams, K. Cho, Y. Sohn, Microstructure, precipitates and hardness of selectively laser melted AlSi10Mg alloy before and after heat treatment, *Material Characterisation*, 143, 5-17, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.022>.
- [18] E. Padovano, C. Badini, A. Pantarelli, F. Gili, and F. D'Aiuto, A comparative study of the effects of thermal treatments on AlSi10Mg produced by laser powder bed fusion, *Journal of Alloys Compound*, 831, 154-822, 2020. [doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154822](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154822).
- [19] A. Bendijk, R. Delhez, L. Katgerman, T.H. De Keijser, E.J. Mittemeijer, N.M. Van Der Pers, Characterization of Al-Si-alloys rapidly quenched from the melt, *Journal of Material Science*, 15, 2803-2810, 1980. <https://doi.org/10.1007/BF00550549>.
- [20] H.J. Axon, W. Hume-Rothery, The Lattice spacings of solid solutions of different elements in aluminium, *Proceedings of Royal Society London Series A Mathematical Physical and Engineering Science*, 193 1-24, 1948. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0030>.
- [21] K.G.G. Prashanth, S. Scudino, H.J.J. Klauss, K.B.B. Surreddi, L. Löber, Z. Wang, a. K.K. Chaubey, U. Kühn, J. Eckert, Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment, *Material Science and Engineering A*, 590, 153-160, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.023>.
- [22] L. Hitzler, C. Janousch, J. Schanz, M. Merkel, B. Heine, F. Mack, W. Hall, A. Öchsner, Direction and location dependency of selective laser melted AlSi10Mg specimens, *Journal Materials Processing*

- and Technology, 243, 48–61, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.029>.
- [23] J. Fite, S. Eswarappa Prameela, J. A. Slotwinski, and T. P. Weihs, Evolution of the microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg during room temperature holds and low temperature aging, Additive Manufacturing, 36, 101-429, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101429>.
- [24] H. Ali, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz, Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V, Material Science and Engineering A, 712, 175–187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.103>
- [25] H. Asgari, C. Baxter, K. Hosseinkhani, M. Mohammadi, On microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg_200C using recycled powder, Material Science and Engineering A, 707, 148–158, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.041>.
- [26] DD. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. International Materials Review, 57, 133–164, 2012. <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- [27] S. M. Yusuf, M. Hoegden, and N. Gao, Effect of sample orientation on the microstructure and microhardness of additively manufactured AlSi10Mg processed by high-pressure torsion, International Journal of Advance Manufacturing Technology, 106, 4321–4337, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04817-5>.
- [28] Z. H. Li, Y. F. Nie, B. Liu, Z. Kuai, M Zhao, and F.Liu, Mechanical properties of AlSi10Mg lattice structures fabricated by selective laser melting, Materials & Design, 192, 108-709, 2020.
- [29] A. Majeed, Y. Zhang, J. Lv, T. Peng, Z. Atta, and A Ahmed, Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and porosity of AlSi10Mg alloy components manufactured by SLM, Computers & Industrial Engineering, 139, 106-194, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106194>
- [30] N. O. Larrosa, W. Wang, N. Read, M. Loretto, H. Evans, C. Carr, J. and, P. J. Withers, Linking microstructure and processing defects to mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg alloy, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 98, 123-133, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.09.011>





Endüstriyel sünger ezme makinasının güç ünitesi tasarımı ve sonlu elemanlar metodu ile titreşim analizi

Power unit design of industrial sponge crushing machine and vibration analysis by finite element method

Emir Esim^{1,*} , Emre Benzer² 

¹ Erciyes Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

² Kilim Mobilya A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Merkezi, 38070, Kayseri, Türkiye

Öz

Tabiatta her cismin “Doğal Titreşim Frekansı” olarak adlandırılan sonsuz sayıda titreşim frekansı ve genliği vardır. Gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde, karmaşık yapıların doğal frekanslarının hesaplanması hızlı ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada Endüstriyel sünger ezme makinasının doğal frekansları sonlu elemanlar yöntemleri ile analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi katı mekaniğinden akustik problemlere kadar birçok mühendislik problemini çözümünde kullanılan en yaygın sayısal yöntemlerden biridir. Tasarımı gerçekleştirilen Sünger ezme makinasının katı modelin, yaygın olarak kullanılan ANSYS Workbench 18.1 programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi ile titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sistemi oluşturan bileşenler ayrı ayrı ve sistemin bir bütün olarak modellenerek analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde elde edilen doğal frekans değerleri tablo ve grafiklerle sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Sünger ezme, Sonlu elemanlar metodu, Serbest titreşim analizi, Doğal frekans

1 Giriş

Sünger üretiminde, genellikle blok süngeri rafta kürlendikten sonra, ebatlama işlemi yaparak, süngerden yatak, kapitone, dokunmuş tekstil kapitonesi, koltuk, kanepeler vs. üretimi yapılmaktadır [1]. Süngerleri üretiminde rulo, döner kesim, yatay kesim, profil ve CNC gibi ileri kesim tekniklerinden yararlanılarak, ihtiyaca göre farklı ebat ve tipte süngerler üretilmektedir.

Zamanla, döşemeli bir kanepenin üzerindeki kumaş gevşer. Aslında deforme olan kumaş değil, süngerdir. Bu nedenle, döşemeli bir çerçevede belirli bir yük altında bir süngerin mekanik özelliklerini belirlemek önem arz etmektedir [2]. Bu nedenle mobilya endüstrisinde poliüretan köpüklerin mekanik özelliklerinin önemli olduğuna inanılmaktadır [3]. Marsivana ve ark. farklı yüklem koşulları altında poliüretan köpüklerin başarısızlığını araştırmıştır [4]. Demirel ve Tuna, altı farklı yoğunluktaki ve iki farklı kategorideki poliüretan köpükler üzerinde sabit yorulma yüklemesinden sonra sertlik ve kalınlık değerlerindeki değişiklikleri ölçmüştür [5]. Gök ve

Abstract

Every object in nature has an infinite number of vibrational frequencies and amplitudes called "Natural Vibration Frequency". Thanks to the developing computer technology, the calculation of the natural frequencies of complex structures are carried out quickly and accurately. In this study, the natural frequencies of the industrial sponge crushing machine were analyzed by finite element methods. The finite element method is one of the most common numerical methods used in solving many engineering problems from solid mechanics to acoustic problems. Vibration analysis of the solid model of the designed sponge crushing machine was carried out using the finite element method with the help of the widely used ANSYS Workbench 18.1 program. In the analysis, the components that make up the system were modeled separately and the system as a whole and the results were compared. The natural frequency values obtained in the finite element analysis were presented in tables and graphics.

Keywords: Foam Crusher, Finite element analysis, Free vibration analysis, Natural Frequency

ark.mobilya döşemelerinde kullanılan poliüretan süngerin sertlik değerlerini araştırmıştır. Sünger malzemelerinin gelmişi, geçmişi, şimdisi ve geleceği ile ilgili çalışmalar Gama ve ark. tarafından özetlemiştir [6]. Bununla birlikte süngerin iç yapısıyla alakalı bir çok çalışma yapılmış ve iç yapısının önemli olduğu ifade edilmiştir. Ulrich poliollerin izosiyanat ile polikondenzasyonundan üretilen esnek poliüretan süngerlerin, gaz geçirgenliği yüksek, düşük yoğunluklu ve sınırlı mekanik mukavemetli açık hücreli olarak oluşturulduğunu belirtmiştir [7]. Quintero ve ark. ürettikleri esnek köpüklerin hücre çapının artmasıyla yırtılma direncinin azaldığını bulmuşlardır [8]. Constantinescu ve ark. sıcaklık ve gerilme oranı değişiminin etkisi altında poliüretan köpüklerin performansını ve verimliliğini araştırmıştır [9]. Youming Chen kapalı hücreli köpüklerin sıkıştırma ve kesme tepkilerinin sonlu eleman modellemesi için bir çerçeve oluşturmuştur. Sıkıştırma ve kesme altında kapalı hücreli süngerlerde hücre seviyesinde deformasyon ve arıza mekanizmalarını belirleme çalışmaları yapmışlardır [10]. Açık hücreli köpüklerin çok eksenli

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emiresim@erciyes.edu.tr (E. Esim)

Geliş / Received: 06.05.2022 Kabul / Accepted: 21.07.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1113370

ezilmesi üzerine çalışma yapmışlardır [11]. Tüm bu çalışmalara göre süngerler kürlenmeden sonra, içerisinde tam oluşmamış hücreler, kırılmadığı için ileriki zamanlarda yatakta ve koltukta çökme şikâyetlerine neden olmaktadır. Esim ve Benzer sünger çökmesi olarak ifade edilen yükseklik kaybını azaltacak, sünger içindeki kırılmamış hücrelerin kırılarak yapının normalize edilmesi sağlanacak bir makinenin tasarımını yaparak yapısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir [12].

Mühendislik yapıları, kullanımları sırasında genellikle birçok dinamik etki altındadır. Model analiz, mekanik bir sistemin dinamik özelliklerinin incelenmesi olarak tanımlanır. Mühendislik uygulamalarında; bütün araçlar, makineler ve binalar, titreşime neden olan dinamik kuvvetlere maruz kalır. Titreşimler yapılarda sorun yaratması, yapının tamamen güvenli olması veya istenilen test şartlarının uygunluğu gibi nedenlerle doğrudan araştırılmalıdır. Sebep ne olursa olsun, yapının titreşim tepkisinin bir şekilde ölçülmesi gerekir. Böylece yapının performansı, yorulması gibi faktörler değerlendirilebilir [13].

Fizik tabanlı simülasyonlar kullanılması ile mekanik tasarımların bileşenlerinin testi sırasında oluşabilecek beklenmeyen tasarım hataları doğal olarak azaltılır. Ayrıca, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile edilen sistemlerin katı modeli ile sistemlerin performans ve güvenilirlik analizi için çalışmalar gerçekleştirilebilir. Günümüzde makine, elektrik, inşaat, havacılık, hidrodinamik gibi çeşitli mühendislik alanlarından tıp alanına kadar birçok alanda sonlu eleman analizi kullanılmaktadır. Bu çalışmalara makine tasarımı ve analizi [14] titreşim analizi [15, 16] ve dış uygulamaları [17, 18] örnek verilebilir.

Sünger sektöründe sünger üretimi için birçok makine tasarımı yapılmıştır ve bunların başlıcaları sünger kesme makineleridir [19]. Yukarıda belirtilen nedenlerle süngerleri ezme için bir makine tasarımına ihtiyaç vardır. Literatürde kırma için tasarlanmış bu tür yapılarla ilgili çalışmalar yetersizdir. Bu çalışmanın ana amacı endüstriyel bir sünger ezme makinasının titreşim biçimlerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda ezme makinasının, benzetim ortamında titreşim davranışları ortaya konulacaktır. Analiz modeli oluşturulurken gerçek çalışma şartları ile ilgili tüm durumlar dikkate alınarak uygun analiz yaklaşımları uygulanacaktır.

2 Materyal ve metot

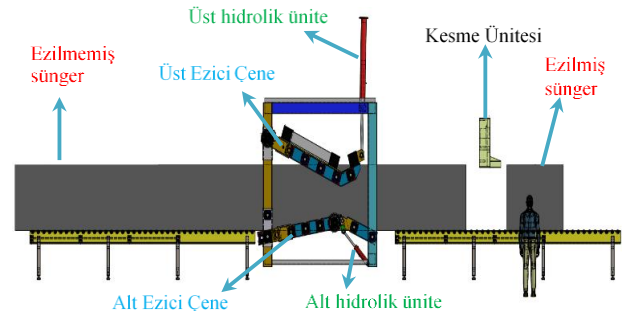
2.1 Ezme makinesi tasarımı

Sektörde sünger üreticileri, genellikle blok süngeri rafta kürlendikten sonra, ebatlama işlemi yaparak, süngerden yatak, kapitone, dokunmuş tekstil kapitonesi, koltuk, kanepeler vs. üretimi yapılmaktadır. Süngerlerin üretiminde rulo, döner kesim, yatay kesim, profil ve CNC gibi ileri kesim tekniklerinden yararlanılarak farklı tipteki süngerler kesilmektedir. Böylece ihtiyaca göre farklı ebat ve tiplerde süngerler üretilebilmektedir.

Ancak blok süngerler kürlenmeden sonra, içerisinde tam oluşmamış hücreler, kırılmadığı için ileriki zamanlarda yatakta çökme, koltukta çökme şikâyetlerine neden olmaktadır. Bu çalışmada daha önce yazarlar tarafından gerçekleştirilen, sünger içindeki kırılmamış hücrelerin

kırılarak yapının normalize edilmesini sağlayacak makinenin tasarımı [12] kullanılmıştır. Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmaya ek olarak güç ünitesinin tasarımı ve titreşim karakteristiklerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle çalışma bu tür makinelerin tasarımında güç ünitesi tasarımı ve yapıların titreşim performanslarının belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Genel olarak sünger bloklar 20m uzunluğunda, 1200mm yüksekliğinde ve 2000mm genişliğinde üretilmektedir. Bu bloklar daha sonra istenilen boy ve ebatlarda kesilerek üretilmekte ve kullanılmaktadır. Kesim işleminden önce sünger kalitesinin artırılması, kullanımdaki istenmeyen hataların giderilmesi ve tam açılmayan hücrelerin açılması amacıyla üretilen bu bloklar, Şekil 1'de görüldüğü gibi hat üzerinde ezilme işlemine tabi tutulmaktadır.

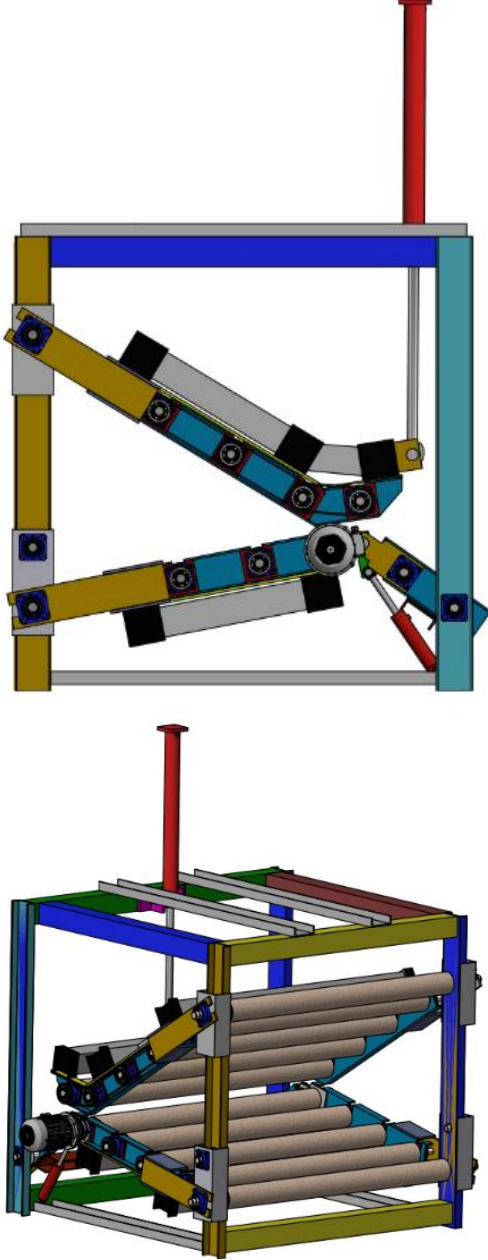


Şekil 1. Sünger ezme prosesi ve hattı

Şekil 2' de görüldüğü üzere ezme makinesi üzerinde çift çenenin olduğu görülmekte ve bu çenelerin üzerinde kademeli olarak ezme yapabilecek şekilde döner silindirin açılı olmasıyla ezme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ezme makinesi üzerinde ezme açısının ayarlanabilmesi amacıyla üst çenede 1 adet (Çap 100mm, Strok 1200mm) alt çenede 2 adet (Çap 70, Strok 400mm) piston bulunmaktadır. Ayrıca döner silindirlerin dönmeleri zincir dişliler ile sağlanmaktadır. Alt ve üst çenedeki silindirlerin hareketi amacıyla 2 adet 7.5 kW'lık motor ve redüktör grubu kullanılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı üzere ezme makinesi birçok elemandan meydana geldiğinden dolayı oldukça karmaşık bir tasarıma sahiptir.

Sistemin karmaşıklığı artıkça teorik bir çözüm üretmek zorlaşmaktadır. Bu gibi durumlarda yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılır. Bu yöntemlerden en yaygın olanı sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntemde literatürde "ağ" işlemi olarak geçen sistem düzgün geometrik küçük elemanlara bölünür ve çözüm çeşitli varsayımlarla bu sonlu elemanlar ağında gerçekleştirilir. Sonlu eleman ağının boyutu ne kadar büyük olursa, çözüm o kadar zor olur, ancak daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. Bu nedenle bu çalışmada kırma makinesinin katı modelinin oluşturulmasında SolidWorks programı kullanılmıştır. Titreşim analizi için de ANSYS Workbench programı tercih edilmiştir.

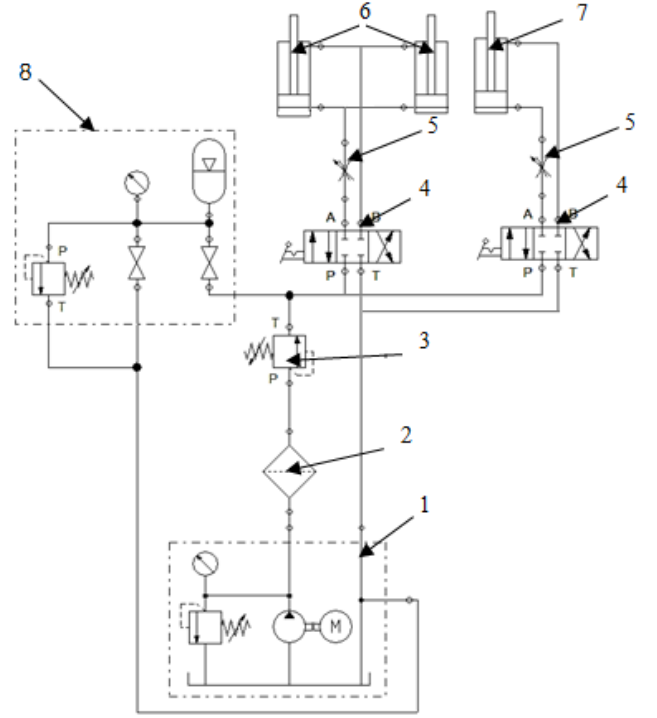
Tasarımı yapılmış ezme makinesinin katı modeli Şekil 2'de verilmiştir. Ezme makinasının CAD modeli Parasolid dosya formatında ANSYS'e aktarılmıştır.



Şekil 2. Sünger ezme sisteminin katı modeli [12]

Sistemde kullanılan hidrolik pompa 120 barda çalışan dişli pompa tipidir. Hidrolik yağ tankının kapasitesi hidrolik sistemde yaklaşık 40 litre yağ ve pompa basıncı değeri (120 bar), hidrolik silindir çapı ve maksimum piston kuvveti (F_p) dikkate alınarak belirlenmiştir. F_p daha önce gerçekleştirilen çalışmamızda [12] ezme yapılacak sünger sertliklerine göre deneysel çalışma yapılarak 150000N olarak belirlenmiş ve tüm hesaplamalar bu değere göre gerçekleştirilmiştir. Ezme makinesi sisteminin hidrolik şeması Fluid-Sim Hidrolik Paket Programı yardımıyla oluşturulmuştur (Şekil 3). Devre esas olarak bir basınç ünitesi (1), bir yağ filtresi (2), bir basınç sıralama valfi (3), iki 4 yollu 3 konumlu (4/3) yön kontrol valfi (4), bir çift yönlü akıştan kontrol valfi (5), iki çift etkili hidrolik silindir $\phi 50\text{mm} \times 400\text{mm}$ (6), bir çift etkili hidrolik silindir $\phi 100\text{mm} \times 1200\text{mm}$ (7) ve bir hidrolik akümülatörden (8) oluşmaktadır. Sistem, basınçlı yağı

basınç ünitesi ve filtre vasıtasıyla basınç sıralama valfine gönderir. Akışkan yağ, basınç dizi valfini açar ve çalışma basıncı altında yön kontrol valfine ve hidrolik akümülatöre gönderir. Hidrolik akümülatör yeterli basınca yüklendikten sonra yön kontrol valfinin konumu değiştirilerek hidrolik silindir hareket eder. Hidrolik silindirin hızı, çift yönlü bir akış kontrol valfi ile kontrol edilebilir.



Şekil 3. Ezme makinesinin sisteminin hidrolik devresi

2.2 Ezme makinesi hidrolik motor gücünün belirlenmesi

Makaslı bir kaldırma sistemi tasarlamak için hidrolik pompa için elektrik motoru seçilmelidir. Bu nedenle hacimsel debi (Q), silindir stroku ($L=1200\text{mm}$), hidrolik silindir çapı ($d=100\text{mm}$) ve kaldırma süresi ($t=15\text{s}$) dikkate alınarak aşağıda verildiği gibi hesaplanmalıdır;

$$Q = LA/t = \pi d^2/4t \quad (1)$$

Hacimsel debi (Q) $0.226\text{m}^3/\text{h}$ olarak belirlendi. Motorun hidrolik verimi ($\eta = 0.75$) dikkate alınarak, pompa basıncı ($P \approx 12000 \text{ kPa}$), motor gücü (N) aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$N = QP/3600\eta \quad (2)$$

Bu denklem kullanılarak motor gücü (N) 1.05kW olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle ezme makinesi hidrolik sistemi için 1.5kW gücünde elektrik motoru seçilmiştir.

3 Titreşim analizi ve SEM modelleme

3.1 Titreşim teorisi

Mekanik sistemlerde yapıların genel hareket denklemi [20] şu şekilde yazılabilir:

$$[m] \ddot{x}(t) + [c] \dot{x}(t) + [k] x(t) = f(t) \quad (3)$$

Burada; $[m]$ kütle matrisi, $[c]$ sönüm matrisi, $[k]$ rijitlik matrisi, $x(t)$ sistem yer değiştirme cevabı vektörü, $\dot{x}(t)$ sistem hız vektörü, $\ddot{x}(t)$ sistem ivme vektörü; $f(t)$ sisteme etki eden kuvvet vektörü olarak ifade edilir.

Sistemde uygulanan kuvvet ve sönüm olmadığı kabul edilirse **Denklem 3** şu şekilde yazılabilir:

$$[m] \ddot{x}(t) + [k] x(t) = 0 \quad (4)$$

$$U_i = \Phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, DOF \quad (5)$$

Bu harmonik ifade: Φ , i . titreşim modu için düğümsel genliklerin (mod şekli) bir vektörüdür. ω sembolü, modun açısal frekansını temsil eder. i ve θ faz açısını gösterir. **Denklem 5** zamana göre iki kez türevi alınırsa;

$$U_i = \omega_i^2 \Phi_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (6)$$

Denklem 5 ve **6**, **Denklem 4**'te yerine yazılırsa ve $(\omega_i t + \theta_i)$ terimi iptal edilerek yeniden düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \Phi_i = 0 \quad (7)$$

Elde edilen bu denklem özdeğer problemidir ve Block Lanczos özdeğer çıkarma yöntemi ile çözülebilmektedir.

3.2 Sonlu elemanlar metodunun doğrulanması

Ezme sisteminde yapılan analizin doğrulama çalışması amacıyla ezme sistemini oluşturan analitik olarak sonucunun bilindiği ezme milleri dikkate alınmıştır. Sistemde tasarımı yapılan millerin içi dolu, çapı 213mm ve boyu 2.7m'dir. Kullanılan miller her iki uçundan yataklı olmasından dolayı her iki ucu basit mesnetli kiriş olarak kabul edilmiştir. **Şekil 4**' te görülen basit mesnetli mil için kritik hız şu şekilde hesaplanmaktadır [21]:

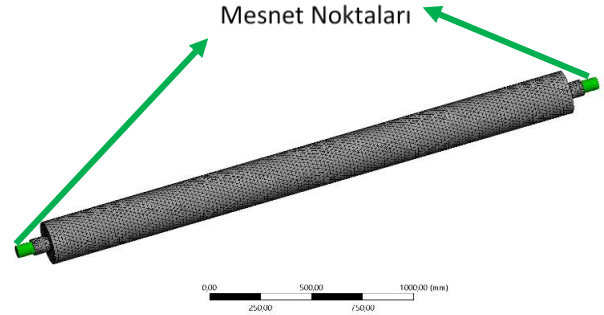
$$p_i = \frac{i^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\rho A}} \quad [rad / s] \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Burada; Kesit alanı $A = 0.25\pi D^2$, Kesit alan atalet momenti $I_x = I_y = \pi D^4 / 64$, Malzeme yoğunluğu $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, Elastiklik modülü $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, Çap $D = 213 \text{ mm}$, Kiriş boyu $L = 2700 \text{ mm}$.

Dikkate alınan basit mesnetli kirişin SEM modeli ve sınır şartlarının dikkate alındığı görünüm **Şekil 4**' te görülmektedir.

Analitik olarak yukarıda belirtilen denkleme göre kirişin doğal frekansı 57,915Hz olarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen frekans değeri ise 58. 317 Hz olarak belirlenmiştir. Bu değerle karşılaştırıldığında SEM

analizi ile edilen sonucun analitik hesaplamayı sağladığı anlaşılmaktadır.



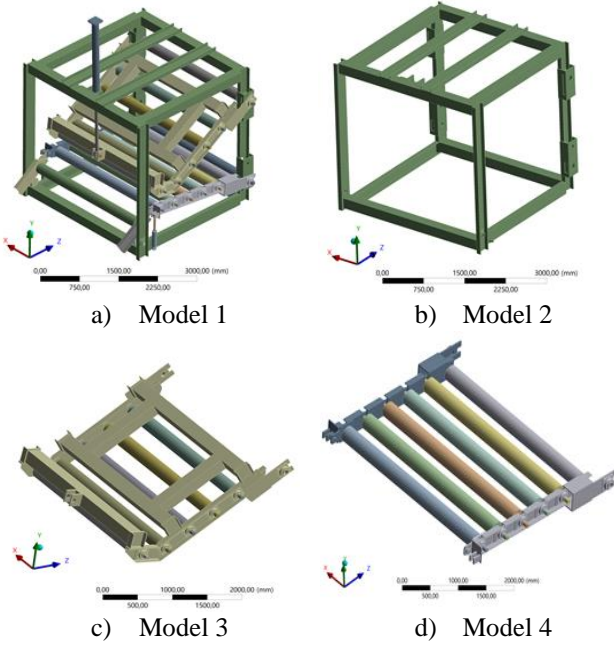
Şekil 4. Basit mesnetli kiriş Sem modeli ve sınır şartları

3.3 Ezme makinesi SEM analizi

Model analiz, tasarlanan yapının titreşim karakteristiklerini belirlemek için tasarım esnasında önemli bir aşama olarak kabul edilir. Bu nedenle serbest titreşim analizinin amacı, doğal frekansları ve davranışları belirlemektir. Serbest titreşim analizinde temel kabul, sistemin doğrusal olduğu ve sistemde herhangi bir doğrusal olmayan durumun ihmal edildiğidir. Herhangi bir yapının doğal frekanslarını ve mod şekillerini hesaplamak için ezme sistemi içerisinde genel işlem adımları uygulanmıştır. ANSYS WORKBENCH tarafından gerçekleştirilen model analiz süreci aşağıdaki gibidir:

Sünger ezme sistemini meydana getiren bileşenle ve bunların montajı Solidworks programı kullanılarak oluşturulmuştur. Katı tasarımı yapılan ezme sisteminin tüm modelleri ANSYS Workbench 18.1 programına aktarılmıştır. Tüm kontak tanımlamaları ve sınır şartları bu program ile tanımlanmıştır. Ezme makinesinin titreşim analizlerinde birlikte hareket eden gruplar birleştirilerek ana çerçeve, alt çene, üst çene, piston ve silindirler olarak tasarımı yapılmıştır. Hareketli olan alt çene üst çene ve çerçevelerin titreşim analizleri ayrı ayrı yapılmıştır ayrıca yapının tümü dikkate alınarak analizler yapılarak sonuçları verilmiştir. Tüm sistem dışında analizi yapılan ezme makinası bileşenleri **Şekil 5**'te verilmiştir.

Titreşim analizi Intel Core i7-2600 CPU @ 3.40 GHz, 32 GB Ram özellikleri olan bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Çerçeve sistemi ve tüm sistem ezme makinasının yerle temas eden yüzeylerinden sabitlenerek, alt çene ve üst çeneler ise ezme makinasına bağlantı yapılan pim noktalarından sabitlenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Ezme makinasını meydana getiren ana bileşenler ve onların alt bileşenleri birbirine temas halindedir. Bu nedenle analiz sırasında yüzeyler birbiri ile ayrılmaz şekilde bağlantılı olduğundan, kontak tipi BAĞLI (BONDED) olarak tanımlanmıştır. Elaman tipi olarak solid186 (doğrusal tetrahedral katı eleman) ve solid187 (doğrusal kübik katı eleman) tipleri kullanılmıştır. Elemanların boyutları ise ortalama 20 mm ayarlanmıştır. Örneğin Model 1 1416214 elemandan ve 2510241 düğüm noktasından meydana gelmiştir. Tüm sistem için modelin ağ yapısını gösteren görünüm **Şekil 6**'da verilmiştir.

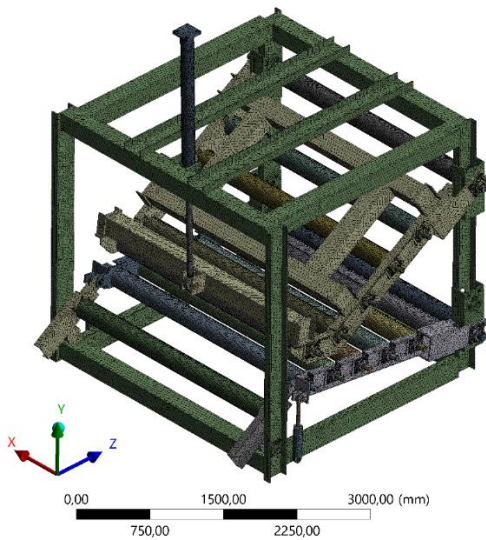


Şekil 5. Analiz için oluşturulan modeller a) Tüm sistem (Model 1) b) Ana şase (Model 2) c) Üst çene (Model 3) d) Alt çene (Model 4)

Yapının farklı modellerinde aynı ağ yapısı kullanılmış fakat üzerindeki elemanların olamamasına göre eleman ve düğüm sayısı farklılık göstermektedir. Analizlerde kullanılan malzemelerin homojen ve izotropik olduğu varsayılmıştır. Tasarımda malzeme olarak St 37 seçilmiştir ve bu malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Poison oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
St 37	200	0,3	7850



Şekil 6. Ezme makinası ağ görünümü

Ezme makinasının yapısal ve çalışma özelliklerine göre, yürütme birimleri düşük hızda çalışma aralığında çalışır, bu nedenle başlangıç modlar sistemin dinamik özellikleri etkilemede önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, yapının yüksek frekanslı modları sistemin dinamik davranışına çok az etkisi vardır ve genellikle ihmal edilebilir. Bu nedenle ilk dört frekansa karşılık gelen mod şekilleri dikkate alınmıştır.

Hesaplamalarda ilk 6 doğal frekans dikkate alınmıştır. Titreşim analizlerinde genellikle yüksek genliklerdeki şekil değiştirme ilk 4 doğal frekans için meydana gelmektedir. Bu nedenden dolayı ilk dört doğal frekansa karşılık gelen modal davranış biçimlerinin sonuçları dikkate alınmıştır. Model 1 ve 2 için elde edilen modal davranış biçimleri Şekil 7’de verilmiştir.

Frekanslarda genel değerlendirme yapabilmek için tüm ezme makinası ve ana şasenin doğal frekans sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Verilen bu davranış biçimleri incelendiğinde tüm sistem davranışının daha düşük genliklerde şekil değiştirdiği (0,47-0,73mm arasında) fakat ana şasenin daha (1.11mm-1.48mm arasında) fazla şekil değiştirme gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca elde edilen doğal frekanslar incelendiğinde tüm yapının doğal frekansları ana şaseye göre azaldığı görülmektedir. Bu sonucun temel nedenin tüm yapının kütlelerinin ana şase ve diğer bileşenlere göre fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bir yapının kütlesi değiştiğinde yapının doğal frekansı da değişecektir. Ayrıca, titreşim teorisinin temel ilkelerine göre cismin kütlesi ile doğal frekansı arasında ters orantı bulunmaktadır [22].

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

Burada f , k ve m sırasıyla doğal frekans [Hz], sertlik ve kütedir.

Tablo 2. Tüm ezme sistemi ve ana şase doğal frekans değerleri

Mod	Doğal frekans değerleri [Hz]	
	Model 1 (Tüm Yapı)	Model 2 (Ana Şase)
1	3.7719	6.511
2	6.9718	16.138
3	9.97	16.555
4	10.34	31.374
5	11.771	42.015
6	12.772	43.001

Ezme makinasını meydana getiren alt ve üst çenenin sistemden ayrı olduğu düşünüldüğünde bu yapıların dinamik davranışını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen titreşim davranış biçimleri Şekil 8’de verilmiştir. Aynı şekilde alt ve üst çene için hesaplanan doğal frekans sonuçları Tablo 3’te sunulmuştur.

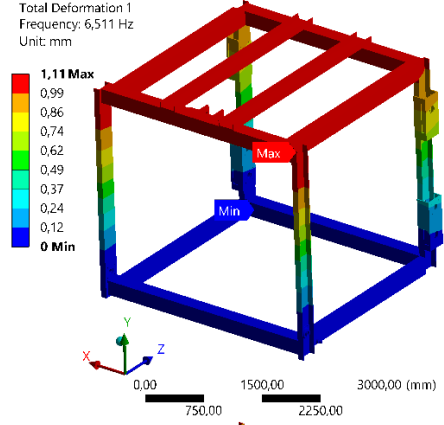
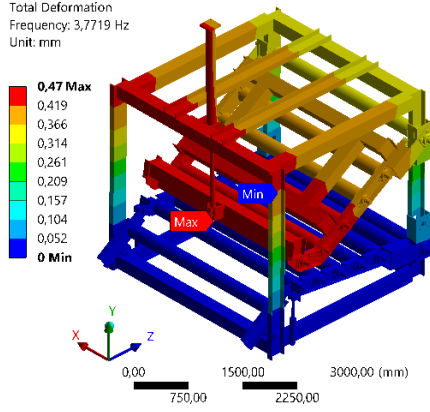
Üst ve alt çene biçim değiştirme davranışları incelendiğinde toplam şekil değiştirme ilk 3 frekans için üst çeneye göre daha az iken 4. doğal frekans için daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca Tablo 3’e göre alt çene doğal frekanslarında artış olduğu görülmektedir.

Mod No

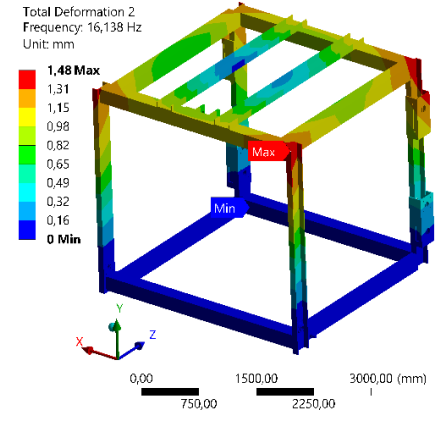
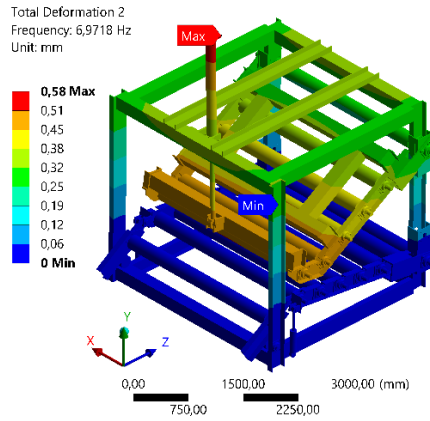
Model 1(Tüm Yapı)

Model 2(Ana Şase)

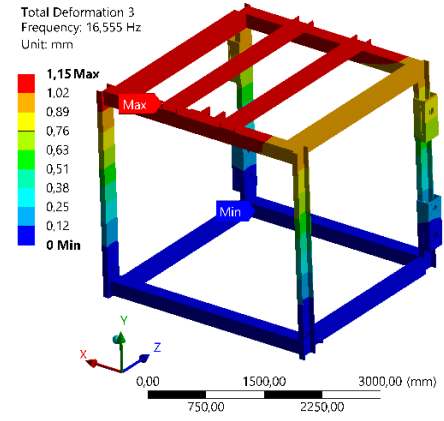
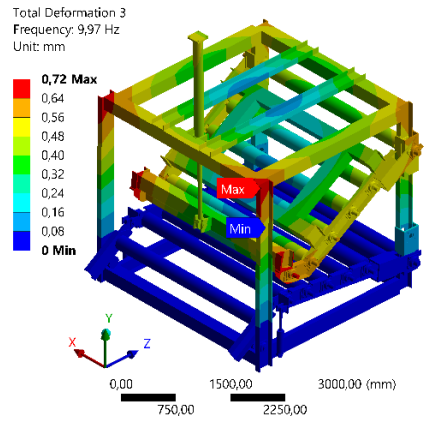
1



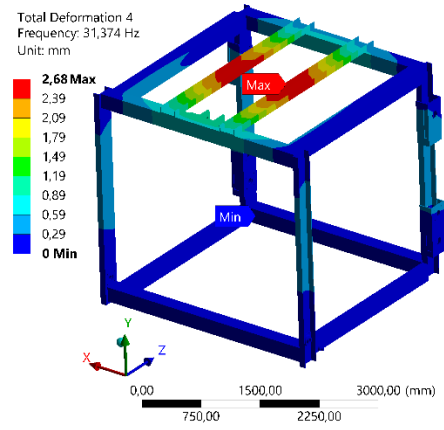
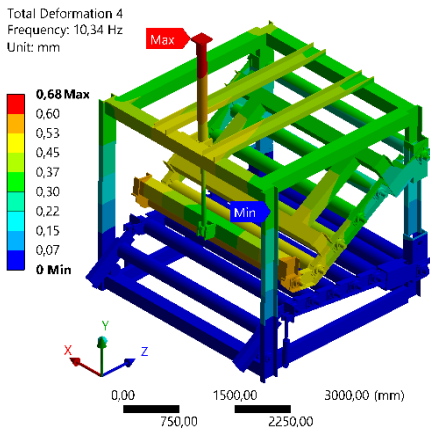
2



3



4

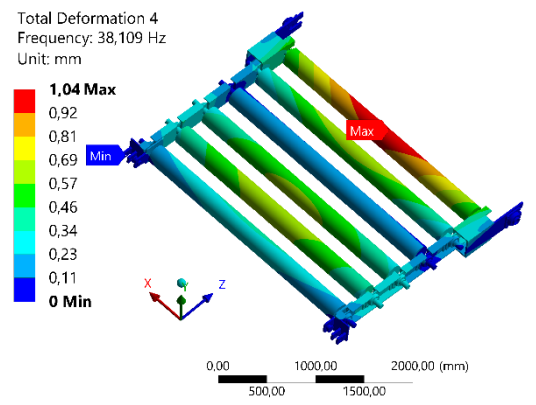
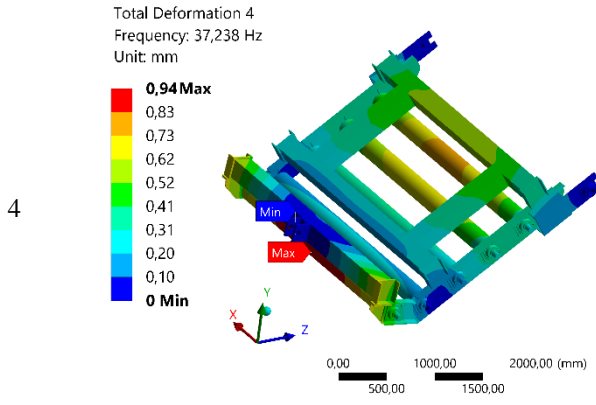
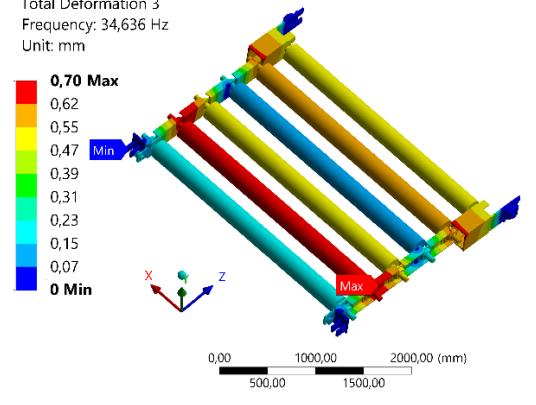
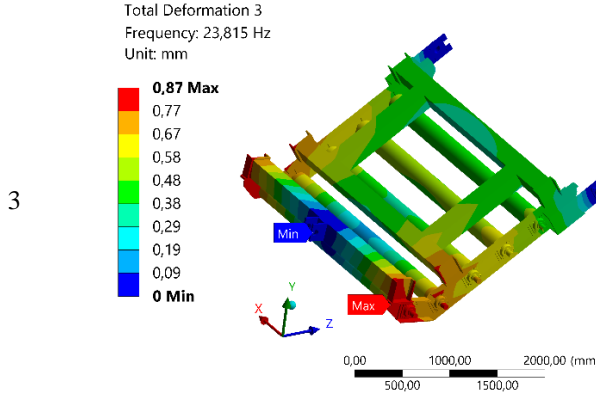
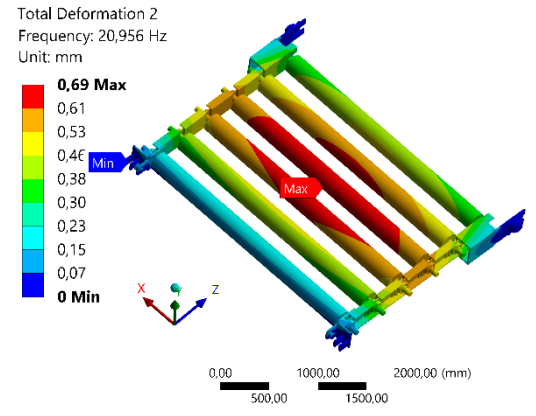
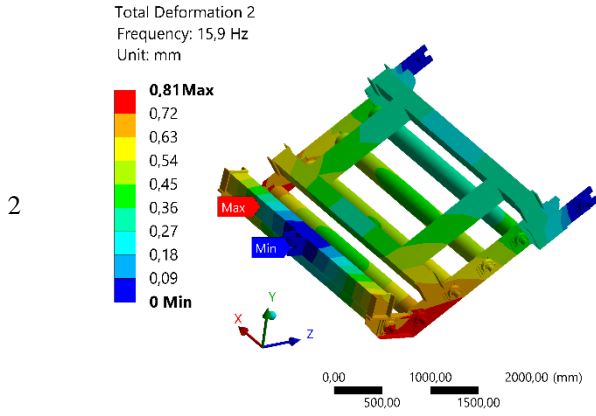
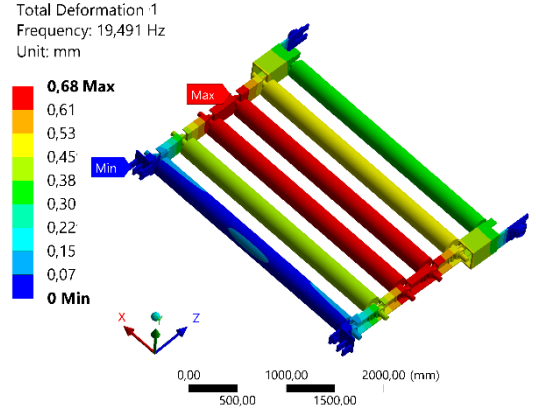
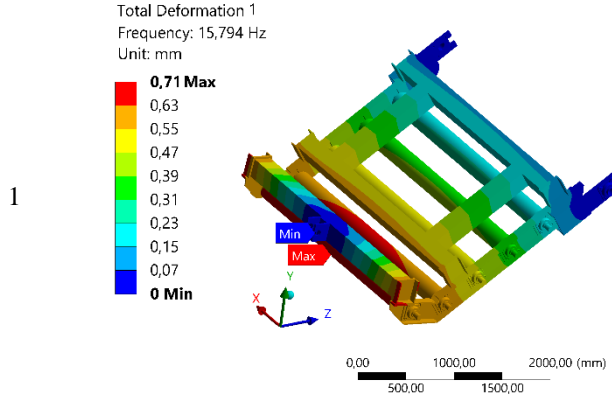


Şekil 7. Tüm sistem ve ana şasenin titreşim biçimleri

Mod No

Model 3(Üst Çene)

Model 4(Alt Çene)



Şekil 8. Alt ve üst çene titreşim biçimleri

Şekil değiştirmenin düşük olmasının sebebi olarak üst çenenin üzerinde alt çeneye göre şekil değiştirmeyi etkileyecek ekstra çerçevenin olmasından kaynaklanmaktadır. Doğal frekansların alt çenede artmış olması kütle kaynaklanmaktadır. Ayrıca tüm sistemin şase üst çene ve alt çeneye doğru frekans değerlerinin giderek artış göstermesinin nedeni olarak kütle olduğu söylenebilir.

Tablo 3. Alt ve üst çene doğal frekans değişimleri

Mod	Doğal frekans değerleri [Hz]	
	Model 3 (üst çene)	Model 4 (alt çene)
1	15.794	19.491
2	15.9	20.956
3	23.815	34.636
4	37.238	38.109
5	43.978	41.413
6	45.096	51.553

4 Sonuçlar

Bu çalışma sünger kalitesini artırmak için sünger ezme makinasının tasarımı ve titreşim karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma ilk bölümünde ezme makinası için gerekli hidrolik sitem tasarımı ve hesapları verilmiştir. İkinci olarak ta ezme makinası ve ana bileşenleri olan şase üst çene ve alt çene olmak üzere bileşenleri ayrı ayrı modellere sistem ve bileşenlerinin dinamik davranışları incelenmiştir. Bu nedenle titreşim özelliklerini analiz etmek için 3 boyutlu model tasarlanmıştır. Ezme sisteminin modal analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntemi probleme uygulamak için öncelikle ezme makinasını oluşturan tüm parçalar SOLIDWORKS çizim programı kullanılarak 3 boyutlu modellenmiştir. 3 boyutlu modellenen parçalar aynı çizim programı kullanılarak birleştirilmiştir. Üretilen katı model, ANSYS Workbench 18.1 yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi için çözüm sonuçlarını etkileyen en önemli faktör mesh kalitesidir. Artan ağ kalitesi, sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu artırır. Meshlerin boyutunu en aza indirmek, mesh kalitesini artırmak için etkili bir yöntem olsa da, bilgisayarların çözme kapasitesi bizi sınırlandırmaktadır. Bu nedenle uygun eleman boyutları seçimi yapılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra gerekli sınırlamalar yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmanın önemli özelliklerinden biri de ezme sisteminin tüm bileşenleri ve ezme makinasını oluşturan ana şase, alt ve üst çenelerin ayrı ayrı analiz edilerek dinamik davranışının incelenmesidir. Böylece sistemin hem bütünü hem de bileşen açısından güvenli ve emniyetli çalışma sınırları belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Genel olarak sistemin güvenli ve emniyetli çalışma frekans olarak 50 Hz' den büyük değerler kabul edilebilir.

Sünger ezme sistemi için titreşim karakteristik bilgisi, başarılı bir tasarım elde etmek, sistemdeki aşırı ve rahatsız edici stresleri, hızlı aşınma ve rezonans etkilerini ortadan kaldırmak için önemlidir. Bu nedenle performans verimliliğini artırmak ve gürültüyü azaltmak için ezme sisteminin titreşim özelliklerinin araştırılması

gerekmektedir. Bu çalışma, ezme makinasının dinamik davranışını ve bileşenlerinin bu davranışa etkisinin belirlenmesinde önemli bir katkı sunmaktadır. Bu yönüyle bu tür makine tasarımlarında titreşim karakteristiklerinin belirlenmesinde örnek teşkil etmektedir.

Teşekkür

Yazarlar çalışmaya desteklerinden dolayı Kilim Mobilya A.Ş. 'ye teşekkür ederler.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %7

Kaynaklar

- [1] David Eaves, Handbook of polymer foams. Rapra Technology Ltd., Shrewsbury, 2004.
- [2] Samet Demirel and B. Ergun Tuna, Evaluation of the cyclic fatigue performance of polyurethane foam in different density and category. Polymer Testing, 76, 146-153, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.03.019>.
- [3] A. Li, D. D. Yang, H. N. Li, C. L. Jiang, and J. Z. Liang, Flame-retardant and mechanical properties of rigid polyurethane foam/MRP/mg(OH 2/GF/HGB composites. Journal of Applied Polymer Science, 135(31), 46551, 1-8, 2018.
<http://dx.doi.org/10.1002/app.46551>.
- [4] Liviu Marsavina, Tomasz Sadowski, Dan Mihai Constantinescu, and Radu Negru, Failure of Polyurethane Foams under Different Loading Conditions. Key Engineering Materials, 385-387, 205-208, 2008.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.385-387.205>.
- [5] Samet Demirel , B. Ergun Tuna Constant-Fatigue Performance of Different Polyurethane Foams for Sitting Purposes. Kastamonu Univ., Journal of Forestry Faculty, 19(2), 225-234, 2019.
<https://doi.org/10.17475/kastorman.626277>.
- [6] N.V. Gama, A. Ferreira, and A. Barros-Timmons, Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. Materials (Basel), 11, 1841, 1-35, 2018.
<https://doi.org/10.3390/ma11101841>.
- [7] H. Ulrich, Urethane Polymers. Kirk- Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. J. Wiley, New York, 1983.
- [8] M. W. Quintero, J. A. Escobar, A. Rey, A. Sarmiento, C. R. Rambo, A. P. Novaes de Oliveira, and D. Hotza, Flexible polyurethane foams as templates for cellular glass-ceramics. Journal of Materials Processing Technology, 209(12-13), 5313-5318, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.03.021>.
- [9] D.M. Constantinescu and D.A. Apostol, Performance and Efficiency of Polyurethane Foams under the Influence of Temperature and Strain Rate Variation. Journal of Materials Engineering and Performance,

- 29(5), 3016-3029, 2020.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11665-020-04860-4>.
- [10] Y. Chen, R. Das, and M. Battley, Finite element analysis of the compressive and shear responses of structural foams using computed tomography. *Composite Structures*, 159, 784-799, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.091>.
- [11] C. Yang and S. Kyriakides, Multiaxial crushing of open-cell foams. *International Journal of Solids and Structures*, 159, 239-256, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.10.005>.
- [12] E. Esim and E. Benzer, Structural Analysis of Industrial Foam Crusher Machine By Using Finite Element Method. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 29, 343-350, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1012035>.
- [13] D.J. Ewins, *Modal Testing: Theory and Practice*. Resarch Studies Press, London , 2000.
- [14] M. Tınkır and H.Ç. Sezgen, Linear static analysis of hydraulic cylinder via finite element method. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6 (1), 203-212, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.298151>.
- [15] Ş.Yıldırım and E. Esim, Modal Analysis of Double Beam Overhead Type Crane Systems by Finite Element Method. *Konya Journal of Engineering Sciences*. 7, 975-988, 2019. <https://doi.org/10.36306/konjes.627067>.
- [16] Ş.Yıldırım and E. Esim, Free vibration analysis of multi-carriages crane systems with finite element method. 5th International Conference on Engineering and Natural Science, pp. 22-30. Prague, Czech Republic, 2019.
- [17] T. Aslan, Y. Üstün and E. Esim, Stress distributions in internal resorption cavities restored with different materials at different root levels: A finite element analysis study. *Australian Endodontic Journal*, 45(1),64-71, 2019. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1111/aej.12275>.
- [18] İ. Leblebicioğlu, E. Esim., D. Kılıç, K. Kılıç , ‘All-On-Four ‘ , ‘All-On-Five’ Ve ‘All-On-Six’ konsepti kullanılarak üretilen protezlerin stres dağılımının sonlu elemanlar analiz yöntemi ile incelenmesi. *Selcuk Dental Journal*, 8(3), 774-782, 2021. <https://doi.org/10.15311/selcukdentj.864992>.
- [19] Wenming Liu, Research on Technical Transformation and Innovative Design of Polyurethane Sponge Cutting Machine. 2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID), pp. 632-636, Guangzhou, China, 2021.
- [20] Zhijun Wu, Chao Xu, Jianfu Zhang, Dingwen Yu and Pingfa Feng, Modal and Harmonic Reponse Analysis and Evaluation of Machine Tools. 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation, pp. 929-933, ChangSha, China,2010
- [21] Singiresu S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2011.
- [22] C.W. De Silva, *Vibration: Fundamentals and Practice Second Edition (2nd ed.)*. Taylor and Francis, Boca Raton, 2007.





Yan rüzgar koşullarında ön kısmı düz plakalı bir otobüs modeli üzerindeki aerodinamik direncin düşürülmesi

Aerodynamic drag reduction on a bus model with upstream flat plate under crosswind conditions

Mehmet Seyhan¹ , Erhan Fırat^{2,*} 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

²Munzur Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 62000, Tunceli, Türkiye

Öz

Akaryakıt fiyatları ve insanların çevrenin mevcut durumu üzerinde meydana getirdiği değişimler ticari taşıtların yakıt ekonomisinin iyileştirilmesine olan ilgiyi arttırmıştır. Büyük olasılıkla, bir taşıtın yakıt ekonomisini iyileştirmenin en ekonomik yolu taşıtı aerodinamik açıdan daha verimli yapmaktır. Bu çalışmada, sıfır ve sıfırdan farklı sapma açılarında ($\beta \leq 9^\circ$), 1:25 ölçekli otobüs modelinin ön alt yüzeyine paralel ve modele göre daha önde olacak şekilde yerleştirilen düz plakaların aerodinamik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Kıyaslama çalışmaları, düz plakasız otobüs modelini de hesaba katarak, genişliğe-dayalı Reynolds sayısının $Re_w = 104000 \pm 3000$ değerinde gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri, zaman ortalamalı sürükleme katsayısında, $\langle C_D \rangle$, dik bir artışın gözlemlendiği kritik bir plaka genişliğinin varlığını ortaya koymaktadır. Sıfır sapma açısında, otobüs genişliğinin (w) onda yedisi kadar genişlikli bir plakanın otobüs modelinin $0.16w$ daha önüne yerleştirildiği bir geometrik kurulum, plakasız otobüs modeline etkieninkinin %92.9'u kadarlık bir zaman-ortalama direnç oluşturmaktadır. Bu kurulumun, yan akış şartları altında da $\langle C_D \rangle$ düşürmede etkin olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Direnç düşürme, Düz plaka, Otobüs, Rüzgar tüneli, Aerodinamik

1 Giriş

Otobüsler ve tırlar (çekici+treyler), Avrupa Birliği (AB) sınırları içerisindeki karayolu taşımacılığı sonucunda oluşan toplam CO₂ miktarının %25'lik kısmından sorumlu taşıtlardır [1]. Türkiye'de, COVID-19 pandemisinin ortaya çıktığı yıl olan 2020'de bile yolcular, trafiğe kayıtlı şehiriçi ve şehirlerarası otobüsler üzerinden 8,767 milyar km yol kat etmişlerdir [2]. Yolcu ve yük taşımacılığının önemli bir kısmını temsil eden bu kara taşıtlarının yakıt sarfiyatlarını, dolayısıyla da yapmış oldukları CO₂ salınımını azaltmak hem çevresel açıdan hem de ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir.

Türkiye'de, şehirlerarası ulaşım için tasarlanan otobüsler, ciddi artışlar gösteren akaryakıt fiyatlarına rağmen yolcu taşımacılığının önemli bir kısmını temsil etmektedirler. Ortalama yakıt tüketimleri 20-30 L/100 km

Abstract

Fuel costs and environmental pressures increase interest in improving fuel economy in the commercial vehicles. Presumably, the most economical way to improve a vehicle's fuel economy is to make it more aerodynamically efficient. In this work, the aerodynamic performance of flat plates placed upstream of and parallel to the front lower surface of a 1:25 coach model at zero and non-zero yaw angles ($\beta \leq 9^\circ$) has been experimentally investigated. Comparative studies have been performed at a width-based Reynolds number $Re_w = 104000 \pm 3000$, considering the coach model without flat plate. The force measurements suggest the existence of a critical plate width at which a steep increase in time-averaged drag coefficient, $\langle C_D \rangle$, was observed. At zero yaw, a geometrical configuration consisting of a plate width seven tenth of the coach's width (w) placed $0.16w$ upstream of the coach model produces a time-averaged drag that is 92.9% that of the coach model without plate. It is seen that this configuration is also effective in reducing $\langle C_D \rangle$ under crosswind conditions.

Keywords: Drag reduction, Flat plate, Coach, Wind tunnel, Aerodynamics

bandında olan bu otobüslerin yakıt sarfiyatını daha da düşürebilmek adına atılacak herhangi bir girişim oldukça elzemdir. Bu girişimlerden bir tanesi, bu taşıtları aerodinamik açıdan daha verimli hale getirmekle ilgili olabilir çünkü şehirlerarası yolculuk süresinin çoğunda 70 - 110 km/sa aralığındaki hızlarla hareket eden bu taşıtlara etkien hava direncinin, taşıtın sarf ettiği toplam yakıt içerisindeki payı azımsanamayacak büyüklüktedir.

Yolcu taşımacılığında önemli iki parametre olan yolcu ve bagaj kapasitesi göz önüne alındığında taşıtın mevcut dış tasarımında köklü bir değişikliğe gitmek çok sağlıklı bir yöntem olarak gözükmemektedir. Bu sebeple, çoğu araştırmacı, taşıta etkien toplam dirence en çok katkı sağlayan ön ve arka yüzeyler etrafındaki akış yapısını değiştirmeye odaklanmışlardır. Bu durum, otobüs dışında kalan diğer küt cisimler için de böyledir [3-5]. Otobüsle

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: efiat@munzur.edu.tr (E. Fırat)

Geliş / Received: 06.07.2022 Kabul / Accepted: 22.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1141511

alakalı çalışmalara bakacak olursak, Bayındırlı ve Çelik [6], 1:64 ölçekli ve tekerlekleri bulunan bir otobüs modelinin ön cam açısının, modele etkileyen aerodinamik direnç üzerindeki etkilerini k-ε türbülans modelini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Üç-boyutlu otobüs modelleri etrafında daimi olmayan bir akış yapısı olsa da, büyük ihtimalle zamandan tasarruf edebilmek adına, çalışmalarını daimi şartlar için gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmaları sonucunda, ön cam açısının 0°'den 45°'ye artırılması durumunda aerodinamik direnç katsayısında (C_D) genellikle bir düşüşün sağlandığını verilen tüm uzunluğa-dayalı Reynolds sayıları için göstermişlerdir. Bhave ve Taherian [7] dört farklı ön kısım tasarımına sahip tekerlekli otobüs modellerine etkileyen direnci sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışmaları sonucunda, ön yüzeye ait keskin kenarların yuvarlatılmasının ve ön yüzeylerin düzden daha çok, ileriye doğru şişme yapacak şekilde tasarlanmasının otobüs direncini düşürmeye katkı sağladığını göstermişlerdir. Farklı hızlar için (60, 80 ve 100 km/sa) sayısal olarak test edilen otobüs modellerinden en iyi iyileşmeyi gösteren modelin baz modele göre direnç katsayısında %56 civarı bir düşüş sağladığı belirtilmiştir. Bu düşüşün yüksek çıkmasının sebebi baz modelin dikdörtgenler prizması şeklinde tasarlanmış olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışmalarında kullandıkları türbülans modeli ve benzetimlerin daimi şartlar altında mı yoksa daimi olmayan şartlar altında mı gerçekleştirildiği bilgisi ise çalışmalarında belirtilmemiştir. Schmidt vd. [8], oldukça basitleştirilmiş tekerleksiz bir tır modeli arka kısmına hem de arka üst yüzeyden açılan deliklerden gönderilen salınlı jetler yerleştirilerek modele etkileyen aerodinamik direnci düşürmeye çalışmışlardır. Bu basit model otobüsü de andırdığından burada atıf yapılmıştır. Deneysel çalışmalarında parametre olarak, kanatçık yerleştirme açısını, kanatçık uzunluğunu, jet momentum katsayısını ve komşu jetler arası açıklık mesafesini kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda, jetlerin aktif olmadığı durumda, yalnızca içe eğimli kanatçıkların açısının 10° olduğu durum için direnç katsayısında baz modele kıyasla %20 düşüş sağlanabildiği belirtilmiştir. Hem jetlerin aktif olduğu hem de içe eğimli kanatçıkların açısının 20° olduğu durum için direnç katsayısında baz modele kıyasla %7'lik bir düşüş sağlanabildiği belirtilmiştir. Sucipto ve Widodo [9] tasarladıkları tekerleksiz otobüs modelinin arka alt kısmında yer alan difüzör bölgesine kanatçıklar yardımıyla çeşitli sayılarda (2, 3 ve 4) oluklar oluşturmuşlar ve oluk sayısının otobüs aerodinamik performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının 2.19×10^6 değerinde ve k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmaları sonucunda, test edilen oluk sayılarının direnç katsayısı bakımından aynı ve %0.5 civarı bir düşüş sağladığını belirtmişlerdir. Shao vd. [10] ise tasarladıkları tekerlekli otobüs modelinin arka alt ve üst kenarlarının içerisine dönen silindireler yerleştirmişler ve bu aktif akış kontrol yönteminin aerodinamik performansı iyileştirebilme potansiyelini sayısal olarak test etmişlerdir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının 1.6×10^6 değerinde ve k-ε türbülans

modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmalarında, üst ve alt silindirlerin, sırasıyla, 293 rad/s ve -1241 rad/s'lik hızlarla döndürülmesi durumunda, silindirlerin dönme yapmadıkları otobüs modeline göre direnç katsayısının %25 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Direnç kuvvetini düşürerek elde edilen kazanım gücünü silindirleri verilen hızlarda döndürebilmek için gerekli güce kıyaslayarak önerdikleri aktif akış kontrol sisteminin verimliliğini çalışmaları içerisinde sunmadıkları için, önerilen sistemin ne derece faydalı olacağı bilinmemektedir. Bayındırlı vd. [11] geri görüş aynaları ve havalandırma/iklimlendirme ünitesi gibi detayları da içeren tekerlekli bir otobüs modeline etkileyen aerodinamik direnci düşürmek adına model arka üst kısmına farklı spoiler türü parçalar yerleştirmişlerdir. Çalışmalarını, hem deneysel hem de sayısal olarak uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının $3.8 \times 10^5 - 7.9 \times 10^5$ aralığında gerçekleştirmişlerdir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için ve k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Üç numaralı kanal tipi olan spoilerin kullanılması durumunda $Re=7.9 \times 10^5$ için direnç katsayısında spoilerless otobüs modeline nazaran %25'lik bir düşüş sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Silindir, kare gibi basit bir küt cisme etkileyen direnç kuvvetinin, onun ön kısmına yerleştirilen ve boyut olarak ondan daha küçük olan bir ön parça ile düşürülebildiği birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir [12-15]. Bu tekniğin otobüslere de uygulanması düşüncesi, pratikte karşılaşılan bir probleme çözüm üretilebilmesi anlamını taşıdığından oldukça önemlidir. Bu düşünce bazı araştırmacılar tarafından test edilmiştir. Mesela, Bayındırlı [16], 1:33 ölçekli ve tekerlek, geri görüş aynaları ve havalandırma/iklimlendirme ünitesi gibi detayları da içeren bir otobüs modeline etkileyen aerodinamik direnci düşürmek adına model ön kısmına yarım daire şekilli bir parça yerleştirmiştir. Deneysel çalışmada, otobüs modeli ile ön parça arasındaki boyutsuz mesafe (0.10, 0.15 ve 0.20) ve ön kısma yerleştirilen yarım daire şekilli parçanın çapı (10, 20 ve 30 mm) temel parametrelerdir. En yüksek uzunluğa-dayalı Reynolds sayısı olan 7.9×10^5 değerinde 30 mm çaplı ön parçanın 0.15'lik boyutsuz mesafeye yerleştirilmesi sonucu zaman-ortalama direnç katsayısında, ön parça bulunmayan otobüs modeline nazaran %11 civarı düşüş sağlanabildiği gösterilmiştir. Bayındırlı vd. [17] tarafından gerçekleştirilen benzer bir diğer çalışmada ise 1:64 ölçekli ve tekerlek ile havalandırma/iklimlendirme ünitesi gibi detayları da içeren bir otobüs modeline etkileyen aerodinamik direnci düşürmek adına model ön kısmına ok ucu şekline sahip plaka yerleştirmiştir. Üç-boyutlu sayısal çalışmalarını daimi şartlar için uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının $1.73 \times 10^5 - 3.46 \times 10^5$ aralığı için ve k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. İlgili parçanın kullanılması durumunda $Re=3.46 \times 10^5$ için direnç katsayısında ön parçasız otobüs modeline nazaran %6.8'lik bir düşüş sağlanabileceğini göstermişlerdir. Seval [18] ise iki farklı ön tasarıma sahip otobüs modeline etkileyen direnç katsayılarını ön kısma yerleştirilen plakalarla düşürmeye çalışmıştır. O çalışmada kullanılan otobüs modellerinden bir tanesi mevcut çalışmada kullanılan ile aynıdır. Deneysel çalışma uzunluğa-

dayalı Reynolds sayısının $1.2 \times 10^5 - 2.0 \times 10^5$ aralığı için gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, Reynolds sayısının 200000 olduğu ve boyutsuz uzunluğu 0.7 olan plakanın 0.1'lik bir boyutsuz boşlukla otobüs ön kısmına yerleştirildiği durumda, sırasıyla, Model-1 ve Model-2 kodlu otobüslerin direnç katsayılarının referans modelinkine kıyasla %15.9 ve %1.1 daha düşük olduğunu bildirmiştir. Mevcut çalışma da bu paragrafta atıf yapılan çalışmalar gibi otobüs direncini düşürmek için bir ön parçadan faydalanma ana fikrini taşımaktadır.

Tahmin edilebileceği üzere kara taşıtları durağan bir ortam içerisinde hareket etmemektedirler. Otobüs ile ilgili yapılan yukarıdaki çalışmaların çoğunda ise rüzgarın, otobüsün hareket ekseninden farklı bir eksende gelmesi durumunda önerilen sistemlerin aerodinamik etkinliklerini koruyup koruyamadıkları ortaya koyulmamıştır. Bu çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan ilk güdü budur. Diğer bir güdü ise, otobüs ön kısmı ile ilgili ciddi direnç düşürme potansiyeli taşıyan pasif akış kontrol parçalarının yeterinden az sayıda parametre değeri için incelenmiş olmasıdır. Bu çalışmayı diğerlerinden ayıran temel bileşenler bunlardır. Bu deneysel çalışmada, 45° ön cam açısına sahip ve 1:25 ölçekli bir otobüs modeline etkiyen direnç ve yan kuvvet değerleri 4 farklı plaka uzunluğu, 21 farklı plaka-otobüs arası boyutsuz boşluk değeri (g/w) ve 9 adet sapma açısı (β) için test edilmiştir. Çalışmada test edilen parça ön kısma yerleştirildiği için sürücünün direkt görüş alanında kısıtlama yaratsa da sürücü koltuğunun konumunun değiştirilmesi durumunda bu problemin aşılabileceği düşünülmektedir. Diğer yandan, bu parçanın, sadece yüksek hızlara çıkıldığında aktif hale geçen bir sistem olarak (aktif akış kontrol sistemi) tasarlanması da üreticilere önereceğimiz diğer bir husustur.

2 Materyal ve metot

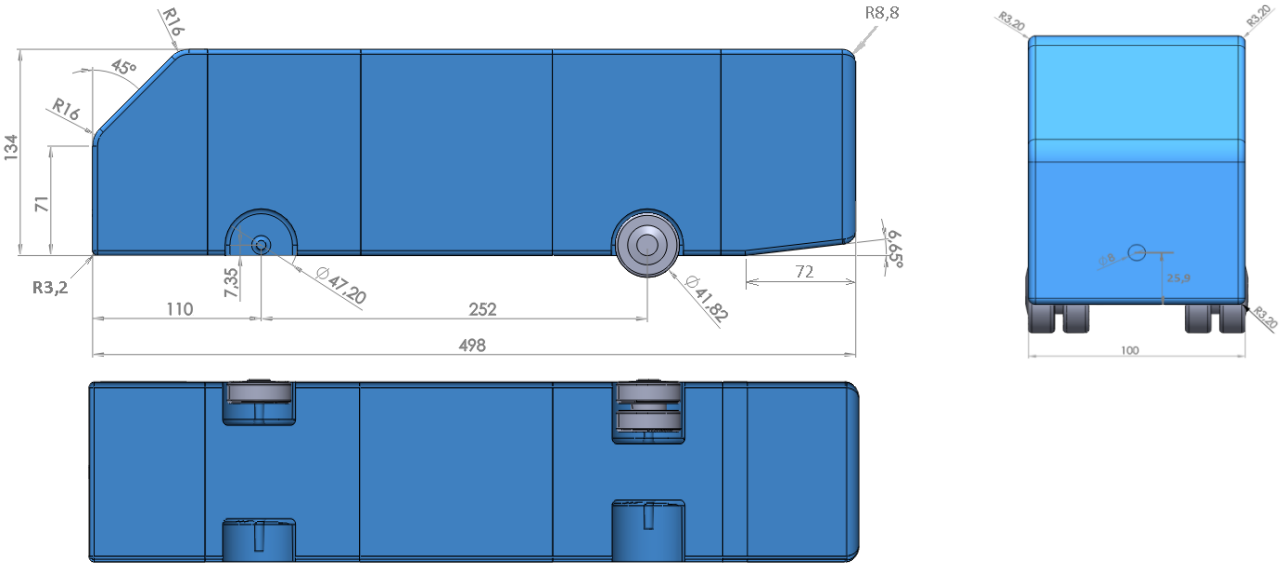
2.1 Otobüs modeli ve ön plakalar

Otobüs modeli, günümüz şehirlerarası ticari otobüslerinin (coach) boyutlarından faydalanılarak tasarlanmıştır. Otobüs modeli, plakalar ve plakaları tutan

destek çubuğu FDM (Fused Deposition Modelling) teknolojisiyle çalışan bir üç-boyutlu yazıcıda basılmıştır (TEVO 3D Electronic Technology Co.,Ltd., Tornado). Otobüs modeli, çok parçalı olarak basıldıktan sonra yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Basılan tüm parçaların dış yüzeylerine, baskı esnasında oluşan katman pürüzlülüğünü gidermek adına hem polyester macun uygulanmış hem de zımparalama yapılmıştır. İşlemler, parçaların yüzey düzlemselliğini bozmadan uygulanmıştır. Neredeyse pürüzsüz hale getirilen yüzeyler, yüzey akış görselleştirme uygulaması için, mat siyah renge boyanmıştır.

Otobüsün 1:25 ölçekli halinin bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak gerçekleştirilen çizimi Şekil 1 içerisinde sunulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere otobüsün tüm kenarları belirli değerlerle yuvarlatılmıştır, arka alt kısmı belirli bir açıyla yerleştirilmiş difüzör kısmına sahiptir, ön tarafında tekli arka tarafında ikili tekerlekler bulunmaktadır ve ön yüzeyinin üst kısmı 45° lik içe doğru bir eğime sahiptir. Plakaları, otobüs ön kısmında belirli bir mesafede ve sabit tutabilmek adına ön yüzeyde, otobüs tabanından 25.9 mm mesafede, yanlara eşit mesafede ve 8 mm çapta açılan delik de yine şekil içerisinde görülmektedir. Model otobüsün uzunluğu $l=498$ mm, genişliği $w=100$ mm ve yoldan olan yüksekliği ise 147.56 mm'dir.

Destek çubuğu, destek çubuğunun ön kısmına yerleştirilen plaka sabitleme parçası ve üç-boyutlu yazıcıda basımı yapılan 5 adet düz plakaya ait görsel Şekil 2 içerisinde sunulmuştur. Tüm plakaların kalınlıkları 3 mm yükseklikleri ise 30 mm'dir. Genişlikleri ise sırasıyla 10 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm ve 90 mm'dir. Bu sebeple plakaların kodları genişliklerine göre verilmiştir. Örneğin, P50 kodu boyutu 50 mm \times 30 mm \times 3 mm olan plakayı temsil etmektedir. Yapılan ön testler sonucunda P10'un otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama direnci düşürmede yeterli etkinliği sağlayamadığı görüldüğünden testlerden çıkarılmıştır. Plakalar, ağırlık merkezleri destek çubuğunun eksenine ile çakışacak şekilde ve çift taraflı ince bant yardımıyla destek çubuğuna sabitlenmişlerdir.



Şekil 1. Otobüs modelinin ön, yan ve alt görünüşlerine ait görseller. Tüm uzunluklar mm cinsindedir.



Şekil 2. Plakalar ve destek çubuğu

2.2 Rüzgar tüneli olanakları

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm deneyler Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü içerisinde yer alan 570 mm × 570 mm test bölgesi en-kesit alanına sahip açık çevrim rüzgar tüneli içerisinde gerçekleştirilmiştir. Tünel daralma konisinin daralma oranı 6,3:1'dir. Tünel test bölgesi içerisindeki serbest akım hızı $U_\infty=8\pm0,2$ m/s iken serbest akım türbülans şiddeti %0,5, $U_\infty=22\pm0,6$ m/s iken serbest akım türbülans şiddeti %0,9 olmakla birlikte aralıktaki değişim neredeyse doğrusaldır. Testler tünel içi serbest akım sıcaklığının 22.5 ± 1 °C ve yerel atmosfer basıncının 101 ± 1 kPa olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Tünel içi serbest akım hızı değeri Pitot-statik tüplü mikromanometre ile ölçülmüştür (PCE Inst., PCE PFM2). Deneyler, plakasız model için, genişliğe-dayalı Reynolds sayısının $Re_w=52000\pm2000 - 143000\pm4000$ aralığında, uzunluğa-dayalı Reynolds sayısının $Re_l=25900\pm8000 - 710000\pm20000$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Genişliğe-dayalı Reynolds sayısı şu formülle hesaplanmıştır.

$$Re_w = \frac{\rho \cdot \langle U_\infty \rangle \cdot w}{\mu} \quad (1)$$

Burada yer alan ρ simgesi kg/m^3 cinsinden hava yoğunluğunu, μ simgesi kg/m-s cinsinden hava viskozitesini ve $\langle \dots \rangle$ operatörü ise zaman-ortalamasını ifade etmektedir. Plakalı modellere ait kuvvet ölçümleri $Re_w=104000\pm3000$ değerinde gerçekleştirilmiştir.

Model, hız ölçümleri esnasında tünel içerisine yerleştirilmiştir. Modelin tekerlekleri ile sınır tabaka cam plakası arasındaki mesafe 2 mm'den düşük olacak ve plaka yüzeyine temas etmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu mesafe, tünel çalışır konuma geçtiğinde dahi tekerleklerin

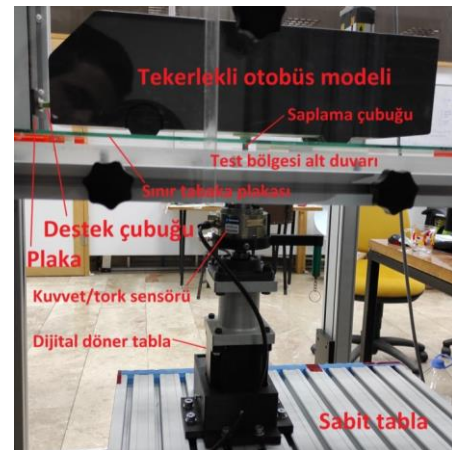
yüzeye temas etmesini engellemekte ve sağlıklı kuvvet ölçümleri almaya olanak sunmaktadır. Çalışmada iki adet aerodinamik kuvvetin boyutsuzlaştırılmış halleri olan direnç ve yan katsayısının zaman-ortalama değerleri, sırasıyla, aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$\langle C_D \rangle = \frac{2 \cdot \langle F_D \rangle}{\rho \cdot \langle U_\infty \rangle^2 \cdot A_F} \quad (2)$$

$$\langle C_S \rangle = \frac{2 \cdot \langle F_S \rangle}{\rho \cdot \langle U_\infty \rangle^2 \cdot A_F} \quad (3)$$

Burada, F_D simgesi N cinsinden direnç kuvvetini, F_S simgesi N cinsinden yan kuvveti, A_F simgesi ise m^2 cinsinden otobüsün ön görünüş alanını temsil etmektedir. Otobüs modelinin alt kısmında tam otobüsün orta noktasından ve yüzey normaline çakışık şekilde bir delik açılmıştır. Daha sonra açılan bu deliğe saplama çubuğu yerleştirilmiştir (Şekil 3). Otobüse rijit şekilde bağlantılı hale getirilen saplama çubuğunun açıkta kalan ucu ise aerodinamik kuvvet ölçümünde kullanılan kuvvet/tork sensörüne yerleştirilmiştir (Schunk, FTD-Gamma SI-32-2.5). Bu sensörün alt kısmında laboratuvar personeli tarafından tasarlanmış ve imal edilmiş olan bilgisayar kontrollü döner tabla yer almaktadır. En altta ise tüm sisteme zemin olan sabit tabla yer almaktadır.

Plaka destek çubuğu otobüs modeline sıkı geçme ile geçmektedir. Otobüs ön kısmına yerleştirilen plaka ile otobüs ön yüzeyi arasındaki boyutsuz boşluk (g/w) 0.1 ile 0.5 arasında 0.02'lik adımlarla değişecek şekilde çelik cetvelle ayarlanmıştır (Şekil 4). Cep tipi hassas terazi de plaka üst yüzeyinin tabanı temsil eden sınır tabaka plakasına paralel olmasını sağlamak için kullanılmıştır. Otobüs modelinin uzunluğu boyunca olan eksenin serbest akım hızı doğrultusundan olan sapmasını temsil eden sapma açısı için müsaade edilebilir değer aralığı $\beta=\pm 9^\circ$ olduğundan, ölçümler bu aralıkta ve 1° 'lik adımlarla gerçekleştirilmiştir [19]. Sapma açısız durumda otobüs modeli blokaj oranı %5 değerinden düşük olduğu için elde edilen kuvvet verilerine herhangi bir blokaj düzeltmesi uygulanmamıştır [19].



Şekil 3. Plakalı otobüsün tünel test bölgesi içerisinde kuvvet ölçümüne hazır hali



Şekil 4. Ön kısmına belirli bir boşlukla (g) plaka yerleştirilmiş otobüs modeli

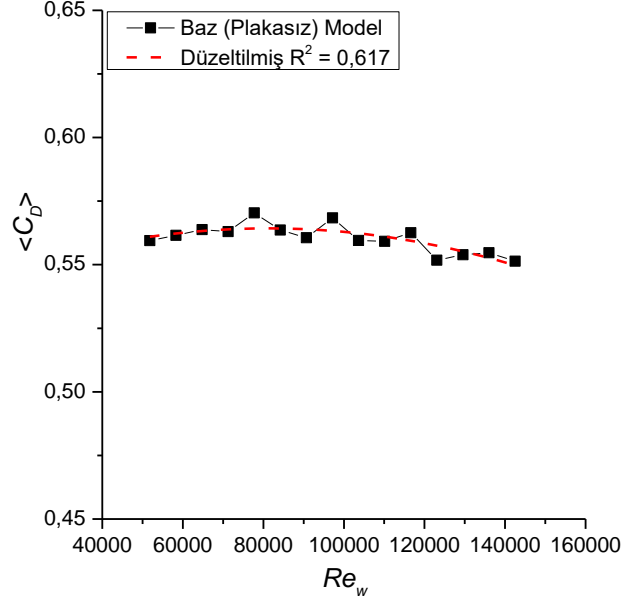
Her bir serbest akım hız ölçümünde 2 Hz ile 100 s boyunca veri alınmış ve ortalama değeri belirleyebilmek adına toplam 200 veri kullanılmıştır. Her bir direnç ve yan kuvvet ölçümünde ise 2000 Hz ile 30 s boyunca veri alınmış ve ortalama değeri belirleyebilmek adına toplam 60000 veri kullanılmıştır. Genişliğe-dayalı Reynolds sayısı için belirsizlik değeri $\pm\%3$, boyutsuz boşluk için belirsizlik değeri $\pm\%1$, direnç ve yan katsayıları için belirsizlik değeri $\pm\%4$ ve sapma açısı için belirsizlik değeri $\pm 0.3^\circ$ olarak hesaplanmıştır.

Zaman-ortalama direnç düşürme etkinliği en yüksek olan plaka için yüzey-yağ akış görselleştirme tekniği kullanılarak bu etkinliği nasıl sağladığı anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu sebeple, 1:5:7 oranında oleik asit, titanyum dioksit ve gaz yağı karışımı ile elde edilen nihai karışım model ön yüzüne uygulanmıştır. Bu karışım oranı, Seyhan ve Sarioğlu [20] tarafından yapılan çalışmadaki yüz yağ karışımı hazırlama oranıyla benzer olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu karışım içerisinde kullanılan oleik asit titanyum dioksitin gaz yağı içerisinde topaklanmasını önlemek için kullanılmıştır. Yüzey-yağ görselleştirme işlemi plakasız model için de yapılmış ve oluşan duvar akım çizgileri kıyaslanmıştır.

Otobüs modeli yan aynalar, klima ünitesi, taban ayrıntıları ve çamurluklar gibi bazı ufak detayların dışında prototipe geometrik olarak benzemektedir. Bununla birlikte eldeki rüzgar tüneli, model ile prototipin Reynolds sayısını eşleştirmeye olanak vermemektedir. Bu da kinematik benzerliğin sağlanamadığı anlamına gelmektedir. Aerodinamik direnç katsayısı ile genişliğe-dayalı Reynolds sayısı arasındaki ilişkiye bakıldığında (Şekil 5) Reynolds sayısı bağımsızlığının ve/veya dinamik benzerliğin de elde edilemediği görülmüştür. Tüm bunlar, çalışmanın, tam olmayan benzerlik durumunda gerçekleştirildiğini göstermektedir. Bu da, mevcut model üzerinde test edilen plakaların aerodinamik açıdan etkinlikleri ile prototip üzerinde test edilmesi planlanan plakaların aerodinamik açıdan etkinliklerinin birebir aynı değerde olmayacağını bizlere açıklamaktadır.

3 Bulgular ve tartışma

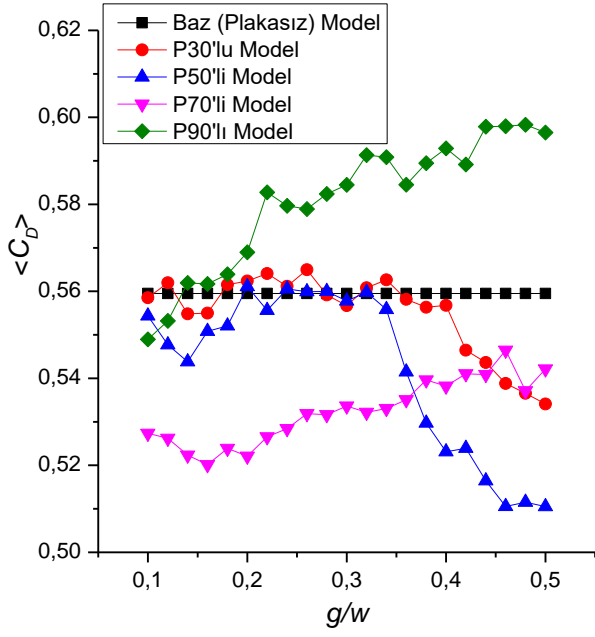
Şekil 5 içerisinde baz (plakasız) modele etkileyen zaman-ortalama direnç katsayısının, $\langle C_D \rangle$ genişliğe-dayalı Reynolds sayısı (Re_w) ile değişimi verilmiştir.



Şekil 5. Plakasız modelin zaman-ortalama direnç katsayısının genişliğe-dayalı Reynolds sayısı ile değişimi. Veri noktalarına en küçük kareler yöntemiyle uydurulan 2. dereceden polinom da grafik içerisinde verilmiştir

Otobüs modeline plaka takılı olmadığı durumda, model ön yüzünde yer alan delik ince, dairesel şekilli bir bant ile kapatılmıştır. Şekil, $Re_w \cong 80000$ değerinden başlamak üzere baz modelin $\langle C_D \rangle$ değerinin artan Re_w ile birlikte hafifçe azaldığını göstermektedir. Bu durum, model yüzeyinde gelişen sınır tabaka kalınlığı ile ilişkilendirilmiştir [21]. Tünel hız ve boyut kapasitesinin yetersiz olmasında dolayı Reynolds sayısından bağımsızlık sağlanamadığı için bu tarz bir azalış yaklaşık $Re_w \cong 1000000$ değerine kadar beklenmektedir. Bu sebeple geriye kalan testlerin hepsi $Re_w = 104000 \pm 3000$ değerinde gerçekleştirilecektir. Bu Re_w değerinde baz modele ait zaman-ortalama direnç katsayısının değeri $\langle C_D \rangle = 0.56$ 'dır.

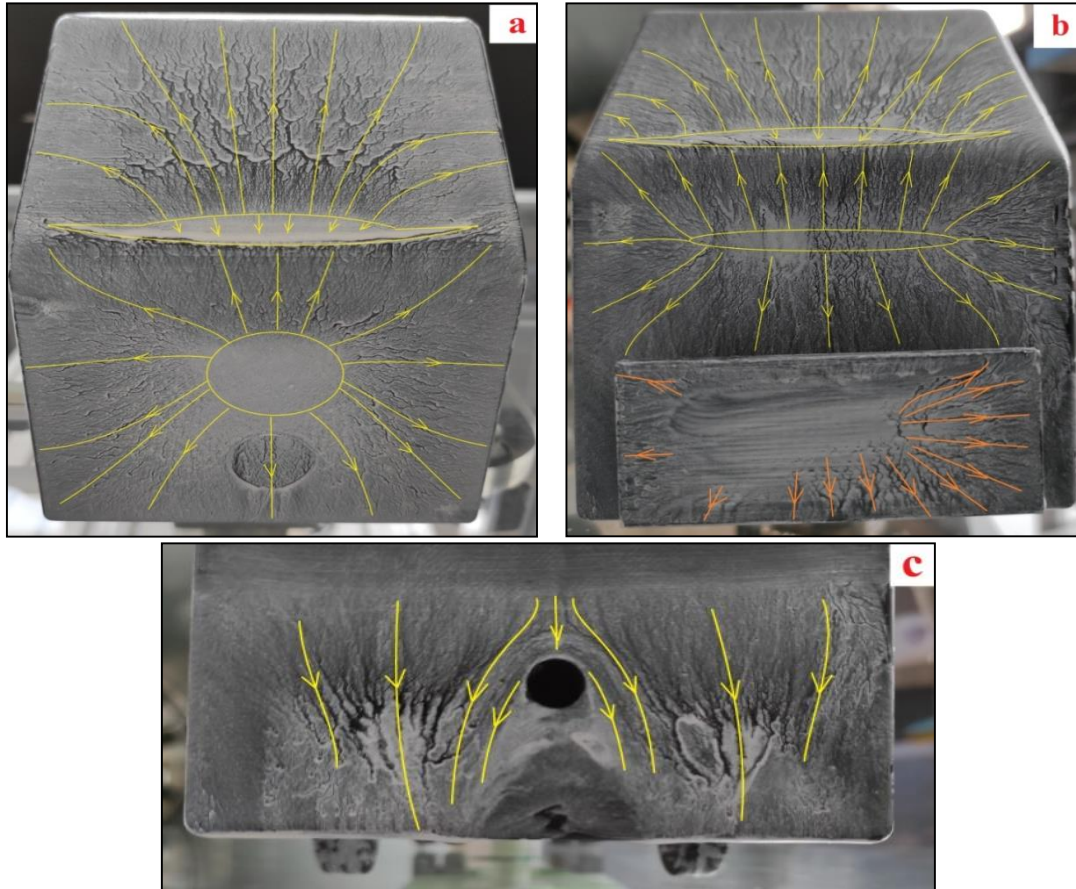
Şekil 6 içerisinde farklı genişliğe sahip plakaların otobüs modelinin sapma açısız durumdaki zaman-ortalama direnç katsayısı üzerindeki etkileri farklı boyutsuz boşluk değerleri için sunulmuştur. P30'lu otobüs modelinin $\langle C_D \rangle$ değeri $g/w = 0.4$ boyutsuz boşluk değerine kadar baz modelinkine çok yakındır. Bu boyutsuz boşluktan sonra artan g/w ile birlikte azalmaya başlamıştır. Bu azalış, muhtemelen bu boyutsuz boşluk değerinden sonra plakadan dökülmeye başlayan çevrilerin model yüzeyinde gelişen sınır tabakayı daha erkenden türbülanslıya geçirmesine ve model ön yüzünde bir miktar basınç düşüşü oluşturmasına dayandırılmıştır [14, 15, 22]. P30'lu otobüs modelinin minimum $\langle C_D \rangle$ değeri test edilen en büyük boşluk değeri olan $g/w = 0.5$ 'te 0.534 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. Sapma açısız durumda, farklı genişlikli plakalara sahip otobüs modeline etkiyen zaman-ortalamalı direnç katsayılarının boyutsuz boşluk ile değişimleri. Plakasız model verisi kıyaslama amaçlı verilmiştir. $Re_w=104000\pm 3000$

P50'li otobüs modelinin $\langle C_D \rangle$ değeri $g/w=0.14$ ve 0.46 değerlerinde iki adet minimum görmüştür. İlk minimum değer $\langle C_D \rangle=0.544$ ikincisi ise $\langle C_D \rangle=0.511$ 'dir. İkinci minimum, tüm testler içerisinde baz modele kıyasla elde edilen en düşük $\langle C_D \rangle$ 'yi temsil etmektedir ve ona da, P30'lu modeldeki düşüşe sebep olan aynı fiziksel olayın sebep olduğu düşünülmektedir. Aerodinamik açıdan elde edilen bu düşüş çok kıymetli olsa da pratiklik açısından bu denli uzun bir mesafeye plaka yerleştirmek, mühendislik tasarımı açısından oldukça zorlayıcıdır ve sürücünün direkt görüş alanının daha da kısıtlanması gibi sıkıntılar doğurmaktadır. P50'li otobüs modelinin $\langle C_D \rangle$ değerinde $g/w<0.2$ 'de görülen ilk düşüş ise muhtemelen plakadan çevri dökülmesinin olmadığı durumda gerçekleşmiştir. Bu durumda, plaka, otobüs ön yüzeyinde bir kalkan etkisi (shielding effect) yaratmakta ve art izinde kalan otobüs yüzeyinde basınç düşüşüne sebep olmaktadır [14-15].

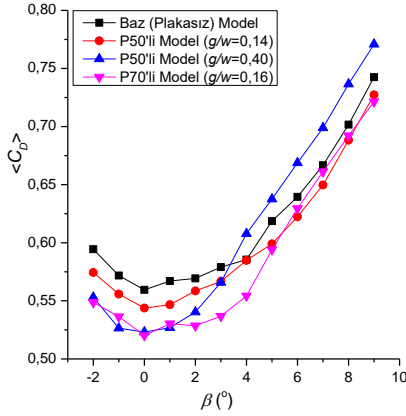
P70'li otobüs modelinin $\langle C_D \rangle$ değeri test edilen tüm g/w değerleri için baz modelinkinin altında kalmıştır. P70'li otobüs modelinin $\langle C_D \rangle$ değeri oldukça düşük bir boyutsuz boşluk değerinde, $g/w=0.16$, minimuma erişmiştir. Bu değer baz modelinkinden %7.1 daha düşüktür.



Şekil 7. Yüzey-yağ akış görselleştirme fotoğrafları: a) Baz model, b) P70'li model ($g/w=0.16$), c) plakası çıkarılmış durumdaki P70'li model ($g/w=0.16$)

P90'lı model ise test edilenler arasında aerodinamik direnç açısından en kötü performansı göstermiştir. En düşük boyutsuz boşluk değerinde, $g/w=0.10$, P90'lı otobüs modelinin $\langle C_D \rangle$ değeri minimuma, 0.549, erişmiştir. Bu modelin $\langle C_D \rangle$ değeri artan g/w ile birlikte genellikle artış sergilemiştir. Plaka genişliği 70 mm'den 90 mm'ye uzatıldığında, plakadan ayrılan kayma tabakaları otobüs ön yüzeyinin dışına taşacak şekilde bir art izi bölgesi oluşturduklarından, sadece P90 plakasına etkiyen dirençteki artışın P90'lı otobüsün direncini bu denli arttırdığı düşünülmektedir. Bu da plaka genişliği için aerodinamik verimlilik açısından kritik bir değer varlığına işaret etmektedir.

P70'li otobüs modelinin bu denli bir etkinliği nasıl sağladığına dair kanıtlar elde edebilmek için P70'li modelin ve baz modelin ön kısmına yüzey-yağ akış görselleştirme tekniği uygulanmıştır (Şekil 7). Modelin ön kısmına, test bölgesi açıklıklarından erişim zorlu olduğu için fotoğraf çekimi esnasında plakaya temas sonucu bazı yüzey akım çizgileri bozulmuştur. Karmaşık akış yapısı olmasa da plaka üzerinde kalan akım çizgileri şekilde turuncu renkle sunulmuştur. Otobüs modeline P70 plakasının eklenmesi sonucunda baz otobüs modeli ön yüzeyinin alt kısmının ortasında meydana gelen durma noktasının daha yukarıya taşındığı görülmektedir. Dahası, otobüsün, plaka arkasında kalan ve plaka ön görünüş alanından daha geniş olan bir kısımda P70 tarafından oluşturulan kalkan etkisi sayesinde daha düşük basınçlı bir bölge oluşturulmuştur [14-15]. serbest akım tarafından oluşturulan yüksek basınçlı bölgenin plaka art izi içerisinde kaldığı için daha düşük basınçlı bir bölgeye dönüştüğü çıkarımı yapılabilmektedir [14-15].

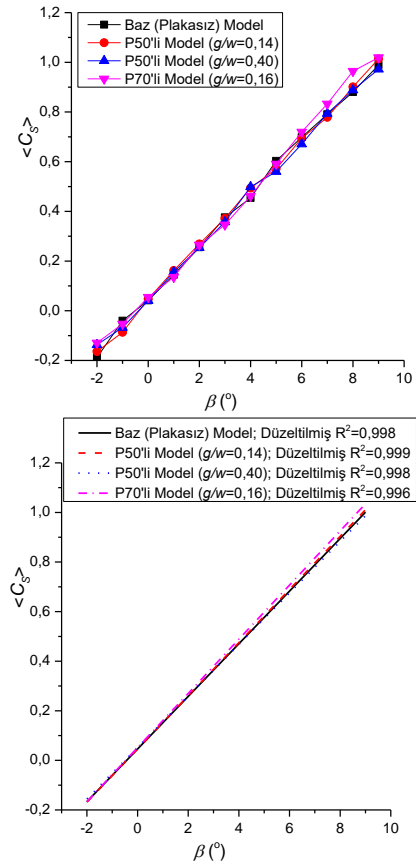


Şekil 8. Direnç düşürme bakımından farklı genişlikli plakalardan en verimlilerine sahip otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama direnç katsayılarının sapma açısı ile değişimleri. Plakasız model verisi kıyaslama amaçlı verilmiştir. $Re_w=104000\pm 3000$

Yan rüzgarın, direnç düşürme açısından verimli bulunan bazı durumlar (P50'li otobüs modeli $g/w=0,14$, P50'li otobüs modeli $g/w=0,40$ ve P70'li otobüs modeli $g/w=0,16$) üzerindeki etkisi ise Şekil 8 içerisinde sunulmuştur. Yan rüzgar durumunda en iyi performansı $g/w=0,16$ 'ya yerleştirilmiş P70'li otobüs modelinin sergilediği

görülmüştür. Baz modele kıyasla en kararlı performansı ise $g/w=0,40$ 'a yerleştirilmiş P50'li otobüs modeli sergilemiştir. Diğer bir deyişle, bu otobüs modeli, baz modelinkinden olan fark direnç katsayısını, $\Delta\langle C_D \rangle$, test edilen tüm sapma açıları için neredeyse sabit bir değerde tutabilmeyi başarmıştır. Sapma açısının $\beta>5^\circ$ olduğu durumlarda sergilediği performans $g/w=0,16$ 'ya yerleştirilmiş P70'li otobüs modeli ile aynı olmaktadır. Sapma açısız durumda gayet iyi direnç performansı gösteren $g/w=0,40$ 'a yerleştirilmiş P50'li otobüs modelinin $\beta>3^\circ$ durumunda baz model karşısındaki bu etkinliğini kaybettiği görülmektedir.

Şekil 9'da ise verimli bulunan yukarıdaki durumlara ait yan katsayılarının sapma açısı ile değişimleri verilmiştir. En küçük kareler regresyonu alt taraftaki grafikte verilen doğrular incelendiğinde, boyutsuz boşluk değeri düşük olan P50 ve P70'li modellere etkiyen yan kuvvetin baz modelinkinden hafifçe yüksek olduğu, boyutuz boşluk değeri yüksek olan P50'li modele etkiyen yan kuvvetin ise baz modelinkinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, baz modelle kıyaslandığında, plakalı modellerin cüzi bir fark oluşturdukları söylenebilir.



Şekil 9. Direnç düşürme bakımından farklı genişlikli plakalardan en verimlilerine sahip otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama yan katsayılarının sapma açısı ile değişimleri. Veri noktalarına en küçük kareler yöntemiyle uydurulan 1. dereceden polinomlar alttaki grafik içerisinde verilmiştir. Plakasız model verisi kıyaslama amaçlı verilmiştir. $Re_w=104000\pm 3000$

4 Sonuçlar

Kara, hava ve deniz taşıtlarının birim mesafeyi alabilmek için tükettikleri enerjiyi minimize edebilmek adına halen birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bunların bir kısmı yeni motor teknolojileri üzerine, bir kısmı ağırlık azaltma üzerine, bir kısmı aerodinamik direnci düşürebilme üzerine ve diğer kısmı da bir takım diğer enerji kayıplarını azaltma üzerinedir. Bu deneysel çalışmada da 1:25 ölçekli bir otobüs modeli baz alınmış ve ona etkiyen aerodinamik kuvvetler yan rüzgarın olduğu ve olmadığı durumlar için ön kısma yerleştirilen plakalar yardımıyla düşürülmeye çalışılmıştır. Reynolds sayısından bağımsızlık sağlanamamış olsa da çalışmalar genişliğe-dayalı Reynolds sayısının $Re_w=104000\pm 3000$ değerinde gerçekleştirilmiştir.

Genişliği otobüs modeli genişliğinin 0.7'si kadar ve yüksekliği de otobüs modeli genişliğinin 0.3'ü kadar olan ince bir plakanın otobüs modeli ön alt yüzeyine paralel ve aralarındaki boyutsuz boşluk $g/w=0.16$ olacak şekilde konumlandırıldığı durumda, otobüs modeline etkiyen zaman-ortalama direnç katsayısında, $\langle C_D \rangle$, %7.1'lik bir düşüş elde edildiği görülmüştür. Yan rüzgar durumunda da aynı kurulum baz (plakasız) modele göre $\langle C_D \rangle$ 'de kayda değer bir düşüş sağlamıştır. Plakanın, otobüs modeli ön yüzeyindeki basınç dağılımını değiştirerek bunu sağladığı akış görselleştirme fotoğraflarından görüleceği gibi, plaka ile otobüs ön yüzeyi arasında nasıl bir akış etkileşimi olduğunun elde edilememiş olması, $\langle C_D \rangle$ 'deki bu düşüşün altında yatan fiziksel olayların yeterli açıklıkla ortaya koyulamamasına sebep olmuştur.

Çalışma, öne yerleştirilen düz plaka genişliği için bir kritik değerin olduğunu ve bu kritik değerin üzerindeki bir genişliğe sahip plakanın aerodinamik açıdan verimsizlik oluşturacağını da göstermiştir.

Mevcut bulgular, ön kısma konumlandırılacak plakaların, otobüs direncini düşürmek adına ciddi bir potansiyel taşıdığını açıkça ortaya koymaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] European Commission, Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en, Accessed 22June 2022.
- [2] TÜİK, Taşıt-kilometre İstatistikleri 2020, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2020-45784>, Accessed 22June 2022.
- [3] A. Şumnu, Shape modification of Ahmed body to reduce drag coefficient and determination of turbulence model. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(2), 824-832, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.879584>.
- [4] M. Lorite-Díez, J.I. Jiménez-González, L. Pastur, O. Cadot and C. Martínez-Bazán, Drag reduction on a three-dimensional blunt body with different rear

- cavities under cross-wind conditions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 200,104145 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104145>.
- [5] M. Sarioglu, Control of flow around a square cylinder at incidence by using a splitter plate. Flow Measurement and Instrumentation, 53, 221-229, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.06.024>.
- [6] C. Bayındırlı and M. Çelik, The determination of effect of windshield inclination angle on drag coefficient of a bus model by CFD method. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 9(3), 122-129, 2020. <https://doi.org/10.18245/ijaet.723755>.
- [7] A. Bhave and H. Taherian, Aerodynamics of intercity bus and its impact on CO₂ reductions. Proceedings of the Fourteenth Annual Early Career Technical Conference, pp. 165-172, Alabama, USA, 2014.
- [8] H.-J. Schmidt, R. Wozidlo, C. N. Nayeri, and C. O. Paschereit, Drag reduction on arectangular bluff body with base flaps and fluidic oscillators. Experiments in Fluids, 56, 151, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00348-015-2018-3>.
- [9] A.S. Sucipto and W.A. Widodo, Numerical Study of Multiple-Channel Diffusers on The Rear Bus Body. AIP Conference Proceedings, 1788, 030094, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4968347>.
- [10] N. Shao, G. Yao, C. Zhang, and M. Wang, A New Method to Optimize the Wake Flow of a Vehicle: The Leading Edge Rotating Cylinder. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 5781038, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5781038>.
- [11] C. Bayındırlı, Y.E. Akansu, and M. Celik, Experimental and numerical studies on improvement of drag force of a bus model using different spoiler models. International Journal of Heavy Vehicle Systems. 27(6), 743-776, 2020. <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2020.112975>.
- [12] T. Igarashi, Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 141-153, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00150-5).
- [13] S.-J. Lee, S.-I. Lee, and C.-W. Park, Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod. Fluid Dynamics Research, 34, 233-250, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2004.01.001>.
- [14] A. Prasad and C.H.K. Williamson, A method for the reduction of bluff body drag. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 155-167, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00151-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00151-7).
- [15] E. Firat, Y. E. Akansu, and H. Akilli, Flow past a square prism with an upstream control rod at incidence to uniform stream. Ocean Engineering, 108, 504-518, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.041>.
- [16] C. Bayındırlı, Reducing of Pressure Based Drag Force of a Bus Model by Flow Control Rod in Wind Tunnel. International Journal of Automotive Science and Technology, 5(4), 412-418, 2021. <https://doi.org/10.30939/ijastech.994351>.

- [17] C. Bayındırlı, M. Çelikve M. Demiralp, Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürükleme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 785-795, 2018. <https://doi.org/10.2339/politeknik.403993>.
- [18] S. Yiğit. Otobüs direncini düşürmek için bir yöntem. Yüksek Lisans Tezi, Munzur Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [19] SAE J1252_198107, SAE Wind Tunnel Test Procedure for Trucks and Buses. SAE International, 1981. https://doi.org/10.4271/J1252_198107.
- [20] M. Seyhan and M. Sarioglu, Investigation of drag reduction performance of half NACA 0009 and 0012 airfoils placed over a trailer on the flow around truck-trailer. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(7), 2971-2979, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0620-2>.
- [21] M. Hassaan, D. Badlani, and M. Nazarinia, Numerical study of the effect of aspect ratio on the flow characteristics of the Ground Transportation System. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206, 104314, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104314>.
- [22] M. Breuer, Effect of Inflow Turbulence on an Airfoil Flow with Laminar Separation Bubble: An LES Study. *Flow, Turbulence and Combustion*, 101, 433-456, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10494-017-9890-2>.





Karbon nanotüp örüntülü polymer silindirik kabukların aksel yük etkisi altında burkulması

Buckling of carbon nanotube patterned polymer cylindrical shells under the axial load

Mahmure Avey^{1*} , Fethi Kadioğlu² , Semra Ahmetolan³ 

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Matematik Mühendisliği Anabilim Dalı 34469 İstanbul, Türkiye*

²*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469 İstanbul, Türkiye*

³*İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Mühendisliği Bölümü 34469 İstanbul, Türkiye*

Öz

Bu makalede, aksel basınç yüküne maruz kalan karbon nanotüp (KNT) örüntülü silindirik kabukların burkulması, kayma deformasyon teorisi (KDT) çerçevesinde sunulmaktadır. Nanokompozitlerin malzeme özellikleri kalınlık koordinatına bağlı olarak lineer fonksiyon şeklinde değişmektedir. KNT örüntülü silindirik kabukların temel denklemleri Donnell tipi kabuk teorisi baz alınarak türetilmekte ve Galerkin yöntemi uygulanarak kritik aksel yük ifadesi KDT çerçevesinde elde edilmektedir. Enine kayma deformasyonlarının fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) KNT örüntülü silindirik kabukların kritik aksel yük değerlerine etkileri, KNT örüntüleri, hacim kesir oranı ve kabuk parametreleri değiştirilerek araştırılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Nanokompozit, Silindirik kabuk, Burkulma, Kritik aksel yük

1 Giriş

Polimer kompozit malzemelerin halihazırda uygulama olarak bulunduğu uzay ve havacılık endüstrisinin gelişimi ve olası uygulamalarının genişlemesi, mukavemet özellikleri seviyesi için artan gereksinimler yaratmaktadır [1]. Modern teknolojinin umut verici yönlerinden biri, malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli nano ölçekli malzemeler üretebilmesidir. Bu nano ölçekli malzemelerden biri, yüksek viskoziteli malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olan karbon nanotüpleridir. KNT'ler füllerden oluşan boru şeklindeki nano-malzemeler olup 1991 yılında Iijima [2] çalışmasında gündeme gelmiştir. Silindirik şekilli bu malzemeler, benzeri görülmemiş mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinden dolayı kompozit endüstrilerinde geniş uygulama alanına sahiptir. Bu nedenle, KNT'lerin kompozitlere takviyesi onların mekanik özelliklerini büyük ölçüde artırabilir [3,4]. Bu geliştirilmiş kompozitlerin uçak ve otomobil ekipmanlarında uygulanması, yakıt verimliliğini artırabilir ve daha büyük çevresel etkiye sahip olan egzoz gazı emisyonunu azaltabilir. KNT desenli kompozitler ile ilgili gerçekleştirilen ilk araştırmalarda malzeme özelliklerinin belirlenmesi ile uğraşmıştır [5,6]. Han ve Elliott [7], KNT'lerle takviye edilmiş polimer kompozitlerin malzeme

Abstract

In this article, the buckling of carbon nanotube (CNT) patterned cylindrical shells subjected to axial compressive load is presented within the framework of shear deformation theory (SDT). The material properties of nanocomposites change as a linear function depending on the thickness coordinate. The basic equations of cylindrical shells with CNT pattern are derived based on Donnell type shell theory and the critical axial load expression is obtained within the framework of SDT by applying Galerkin method. The effects of transverse shear deformations on the critical axial load of functionally graded CNT patterned cylindrical shells are investigated by changing CNT patterns, volume fraction ratio and shell parameters.

Keywords: Nanocomposite, Cylindrical shell, Buckling, Critical axial load

özelliklerini değerlendirmek için moleküler dinamik (MD) simülasyonunu kullanarak KNT takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin, polimer matris çeşitlerine ve KNT'lerin kalitesine ve miktarına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Nanokompozit silindirik kabuklar genellikle modern mühendislik dallarında, özellikle uzay araçlarında, nükleer reaktörlerde ve roketlerde kullanıldığı için son teknoloji ürünlerle (yeni sınıf çok fonksiyonlu malzemelerle) donatılmaktadır. Karbon nanotüp menşeli yapısal elemanlar, yeni nesil heterojen kompozitler sınıfına ait olup bunların modellenmesi sağlam bir matematiksel altyapı gerektirir. Ayrıca karmaşık mühendislik problemleri olan çeşitli yükler altında nanokompozit silindirlerin titreşim ve burkulma problemlerinin gerçekçi matematiksel modellerinin oluşturulması, onların uygulamalarının güvenilirliği ve emniyeti açısından oldukça önemlidir. FD nanokompozit silindirik kabuklar, kullanım amacı gereği daha fazla aksel basınç yükü etkisine maruz kaldığından onların tasarım sırasındaki burkulma davranışının analiz edilmesi önemlidir. KNT takviyeli silindirik kabukların burkulma problemi ilk olarak Shen [8] çalışmasında gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda, nanokompozit menşeli silindirik kabukların termomekanik ve burkulma davranışları üzerine bazı çalışmalar

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mahmureavey@gmail.com (M. Avey)

Geliş / Received: 05.07.2022 Kabul / Accepted: 29.07.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngmuh.1140950

yapılmıştır. Örneğin; Lei vd. [9] çalışmasında, elemansız kp-Ritz yöntemini kullanarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüplerle güçlendirilmiş kompozit plakların burkulma analizini gerçekleştirilmiştir. Chakraborty vd. [10] eserinde, yarı analitik yaklaşım kullanılarak KNT'lerle güçlendirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş lamine kompozit silindirik kabuk panellerin burkulma ve titreşim analizi sunulmuştur. Nam vd. [11] çalışmasında, termal ortamda elastik temel ile çevrili aksel sıkıştırma altında ortogonal karbon nanotüp takviyeli kompozit silindirik kabukların burkulması klasik kabuk teorisi çerçevesinde ele alınmıştır.

Karbon nanotüplerle güçlendirilen kompozitlerin hacim içeriği gradyan olarak dağıldığından, yapının enine kayma modülü, fiber yönündeki etkin elastik modülünden çok daha az olduğundan yapı enine kaymaya daha duyarlı olur ve dikkate alınmalıdır [12-14]. Literatür taraması, KDT çerçevesinde karbon nanotüplerle takviye edilen silindirik kabukların burkulmasının yeterince çalışılmadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, söz konusu problemin KDT çerçevesinde incelenmesi hedeflenmektedir.

2 Materyal ve metot

2.1 Problemin formülasyonu ve mekanik özelliklerin modellenmesi

Şekil 1'de, aksel basınç yükü altındaki KNT örüntülü dairesel ve kapalı silindirik bir kabuk ve karakteristikleri sunulmaktadır. Oxyz koordinat sisteminin orijin silindirik kabuğun orta yüzeyinin sol ucunda yer almakta olup ve x, y ve z eksenleri Şekil 1'deki gibi yönlendirilmektedir.



Şekil 1. Aksel yüklü nanokompozit silindirik kabuk ve koordinat sistemi

Nanokompozit silindirik kabuğun Young modülleri ve Poisson oranı gibi etkin malzeme özellikleri, karışım kuralına göre aşağıdaki gibi ifade edilir [8]:

$$\begin{aligned} Y_{11}(\bar{z}) &= \eta_1 V_{knt}(\bar{z}) Y_{11}^{knt} + V^m Y^m, \\ \frac{\eta_2}{Y_{22}(\bar{z})} &= \frac{V_{knt}(\bar{z})}{Y_{22}^{knt}} + \frac{V^m}{Y^m}, \quad \nu_{12} = V_{knt}^* \nu_{11}^{knt} + V^m \nu^m \\ \frac{\eta_3}{G_{12}(\bar{z})} &= \frac{V_{knt}(\bar{z})}{G_{12}^{knt}} + \frac{V^m}{G^m}, \\ G_{13}(\bar{z}) &= G_{12}(\bar{z}), \quad G_{23}(\bar{z}) = 1.2 G_{12}(\bar{z}) \end{aligned} \quad (1)$$

Burada verimlilik parametreleri $\eta_i (i=1,2,3)$ ile polimerin hacim kesir oranı V^m ile polimerin (veya matrisin) ve

KNT'lerin Young modülleri sırasıyla Y^m ve Y_{kk}^{knt} ile ve KNT'lerin kayma modülü G_{12}^{knt} ile gösterilmektedir.

Hacim kesir oranı V_{knt} kalınlık koordinatının lineer fonksiyonları olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [8, 15]:

$$\begin{aligned} V_{knt} &= V_{knt}^* \text{ ise } \dot{U} \\ V_{knt} &= (1 - 2\bar{z}) V_{knt}^* \text{ ise } V \\ V_{knt} &= (1 + 2\bar{z}) V_{knt}^* \text{ ise } A \\ V_{knt} &= 4|\bar{z}| V_{knt}^* \text{ ise } X \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 Temel bağıntı ve denklemlerin türetilmesi

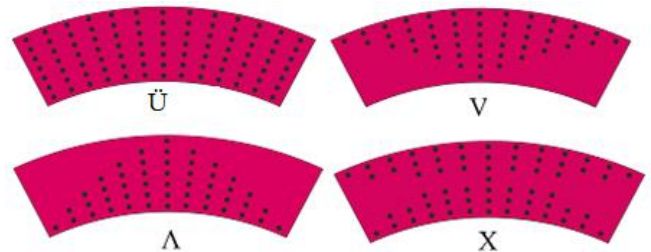
KNT örüntülü silindirik kabukların KDT çerçevesinde bünyesel bağıntıları Denklem (1) dikkate alınarak aşağıdaki gibi oluşturulur [15]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada σ_{ij} ve ε_{ii} , $\gamma_{ij} (i=1,2, j=2,3)$ sırasıyla gerilme ve deformasyon bileşenleri, $A_{ij} (i,j=1,2,\dots,6)$ fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozitlerin malzeme özelliklerine bağlı katsayılar olup şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} A_{11}(\bar{z}) &= \frac{Y_{11}(\bar{z})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad A_{12}(\bar{z}) = \frac{\nu_{21}Y_{11}(\bar{z})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \\ A_{21}(\bar{z}) &= \frac{\nu_{12}Y_{22}(\bar{z})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad A_{22}(\bar{z}) = \frac{Y_{22}(\bar{z})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ A_{44}(\bar{z}) &= G_{23}(\bar{z}), \quad A_{55}(\bar{z}) = G_{13}(\bar{z}), \\ A_{66}(\bar{z}) &= G_{12}(\bar{z}) \end{aligned} \quad (4)$$

Şekil 2'deki en kesitlerdeki örüntüler Denklem (2) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Silindirik kabuğun KNT örüntülü en kesitleri

Denklem (3) ve KDT'nin varsayımları dikkate alınarak, KNT örüntülü silindirik kabukların keyfi bir noktadaki deformasyon alanının bileşenleri $(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \gamma_{12})$, orta yüzeydeki $(\varepsilon_{011}, \varepsilon_{022}, \gamma_{012})$ deformasyonları ile aşağıdaki gibi ifade edilir [15]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{011} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + I_1(z) \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \\ \varepsilon_{022} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + I_2(z) \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} \\ \gamma_{012} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + I_1(z) \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} + I_2(z) \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada $\varphi_i (i=1,2)$ sırasıyla y ve x eksenlerine göre açılırları gösterir, $I_i(z)$ gerilme fonksiyonları içeren parametre olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$I_1(z) = \int_0^z \frac{df_1}{dz} \frac{1}{G_{13}(\bar{z})} dz, \quad I_2(z) = \int_0^z \frac{df_2}{dz} \frac{1}{G_{23}(\bar{z})} dz \quad (6)$$

Kuvvet ve moment bileşenleri aşağıdaki integrallerden bulunur [16]:

$$\begin{aligned} N_{ij} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} dz, \quad Q_i = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{i3} dz, \\ M_{ij} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} z dz, \quad (i, j = 1, 2) \end{aligned} \quad (7)$$

Düzlem içi kuvvetlerle Airy gerilme fonksiyonu (F) arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir [16]:

$$N_{11} = h \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}, \quad N_{12} = -h \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}, \quad N_{22} = h \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad (8)$$

KDT çerçevesinde silindirik kabukların aksenal yük altındaki stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri şu şekildedir [16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{11}}{\partial x} + \frac{\partial M_{12}}{\partial y} - Q_1 &= 0, \quad \frac{\partial M_{21}}{\partial x} + \frac{\partial M_{22}}{\partial y} - Q_2 = 0, \\ \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + \frac{N_{22}}{R} - N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{011}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{022}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{012}}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (10)$$

Sonraki aşamada, [Denklemler \(3\), \(4\), \(5\), \(6\), \(7\), \(8\)](#) kullanılarak, kuvvet ve moment bileşenleri ve orta yüzeydeki deformasyonlar, w yer değiştirme, F gerilme fonksiyonu ve açılırların fonksiyonları cinsinden ifade edilir. Elde edilen bağıntılar [Denklemler \(9\) ve \(10\)](#)'a yerleştirilerek, aksenal basınç yükü altında KNT'lerle takviye edilmiş kayma deformasyonlu silindirik kabukların stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri aşağıdaki şekli alır:

$$\begin{aligned} &h(c_{11} - c_{31}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + hc_{12} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} - c_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ &- (c_{14} + c_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + c_{15} \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x^3} + c_{35} \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x \partial y^2} \\ &- I_3 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + c_{18} \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial x^2 \partial y} + c_{38} \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial x^2 \partial y} = 0 \\ &hc_{21} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} + h(c_{22} - c_{31}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - (c_{32} + c_{23}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \\ &- c_{24} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + c_{35} \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x \partial y^2} + c_{25} \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x \partial y^2} \\ &+ c_{38} \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial x^2 \partial y} + c_{28} \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial y^3} - I_4 \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} = 0 \quad (11) \\ &hb_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} + h(b_{12} + b_{21} + b_{31}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + hb_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} \\ &- b_{23} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - (b_{24} + b_{13} - b_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - b_{14} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ &+ \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + b_{25} \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x^3} + b_{15} \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x \partial y^2} + b_{35} \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x \partial y^2} \\ &+ b_{28} \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial x^2 \partial y} + b_{38} \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial x^2 \partial y} + b_{18} \frac{\partial^3 \varphi_2}{\partial y^3} = 0 \\ &\frac{h}{R} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + I_3 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + I_4 \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} = 0 \end{aligned}$$

Burada b_{ij} ve $c_{ij} (i=1,2,\dots,4, j=1,2,\dots,8)$ malzeme ve kabuk özelliklerine bağlı katsayılarıdır [15].

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Temel denklemlerin çözümü

Serbest mesnetli sınır koşullarını sağlayan yaklaşım fonksiyonları aşağıdaki gibi aranır [15]:

$$\begin{aligned} w &= A_1 \sin(\lambda x) \sin(\mu y), \quad F = A_2 \sin(\lambda x) \sin(\mu y), \\ \varphi_1 &= A_3 \cos(\lambda x) \sin(\mu y), \quad \varphi_2 = A_4 \sin(\lambda x) \cos(\mu y) \end{aligned} \quad (12)$$

Burada $A_i (i=1,2,\dots,4)$ bilinmeyen genliklerdir, $(\lambda, \mu) = \left(\frac{m\pi}{L}, \frac{n}{R} \right)$ olup dalga parametreleri, (m, n) ise burkulma modlarıdır.

[Denklemler \(12\)](#)'deki fonksiyonlar [Denklemler sistemi \(11\)](#)'de yerine yazılıp, Galerkin yöntemi uygulandığında, aşağıdaki cebirsel matris denklemi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & -k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & -k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & -k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & N\lambda^2 & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Matris içindeki katsayılar aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned}
 k_{11} &= [(c_{11} - c_{31})\lambda^2\mu^2 + c_{12}\lambda^4]h, \\
 k_{12} &= (c_{14} + c_{32})\lambda^2\mu^2 + c_{13}\lambda^4, \\
 k_{13} &= c_{15}\lambda^3 + c_{35}\lambda\mu^2 + I_5\lambda, \quad k_{14} = (c_{18} + c_{38})\mu\lambda^2, \\
 k_{21} &= [c_{21}\mu^4 + (c_{22} - c_{31})\lambda^2\mu^2]h, \\
 k_{22} &= (c_{32} + c_{23})\lambda^2\mu^2 + c_{24}\mu^4, \quad k_{23} = (c_{25} + c_{35})\lambda\mu^2, \\
 k_{24} &= c_{28}\mu^3 + c_{38}\lambda^2\mu + I_6\mu, \\
 k_{31} &= h[b_{22}\lambda^4 + (b_{12} + b_{21} + b_{31})\lambda^2\mu^2 + b_{11}\mu^4], \\
 k_{32} &= b_{23}\lambda^4 + (b_{24} + b_{13} + b_{32})\lambda^2\mu^2 + b_{14}\mu^4 + \frac{\lambda^2}{R}, \\
 k_{33} &= b_{25}\lambda^3 + (b_{15} + b_{35})\lambda\mu^2, \\
 k_{34} &= (b_{28} + b_{38})\lambda^2\mu + b_{18}\mu^3, \quad k_{41} = \frac{\lambda^2 h}{R}, \\
 k_{43} &= I_5\lambda, \quad Q_{44} = I_6\mu
 \end{aligned} \tag{14}$$

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nanokompozit silindirik kabukların kritik eksenel basınç yükünü bulmak için, cebirsel Denklem (13)'ün katsayılarından oluşan determinanı sıfıra eşitleyip determinant kofaktörler cinsinden yazıldığında, şu cebirsel denklem elde edilir:

$$k_{41}D_{41} - ND_{42}\lambda^2 + k_{43}D_{43} + k_{44}D_{44} = 0 \tag{15}$$

Burada D_{ij} ($i = 4, j = 1, 2, 3, 4$) kare matrisin determinantıdır ve şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
 D_{41} &= - \begin{vmatrix} k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{32} & k_{33} & k_{34} \end{vmatrix}, \quad D_{42} = - \begin{vmatrix} k_{11} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{33} & k_{34} \end{vmatrix} \\
 D_{43} &= - \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{34} \end{vmatrix}, \quad D_{44} = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Denklem (15)'den KDT çerçevesinde KNT takviyeli nanokompozit silindirik kabukların kritik eksenel yükü için aşağıdaki ifade bulunur:

$$N_{kdt}^{kr} = \frac{k_{41}D_{41} + k_{43}D_{43} + k_{44}D_{44}}{\lambda^2 D_{42}} \tag{17}$$

KDT çerçevesinde, KNT takviyeli nanokompozit silindirik kabukların boyutsuz kritik eksenel yükü aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$N_{1kdt}^{kr} = \frac{N_{kdt}^{kr}}{Y^m h} \tag{18}$$

Temel bağıntılarda enine kayma deformasyonları göz ardı edilerek, KKT'ye dayalı KNT örüntülü silindirik kabukların kritik eksenel yükü için ifade elde edilir. Bu

durum için boyutlu ve boyutsuz kritik eksenel yükler sırasıyla N_{kk}^{kr} ve N_{1kk}^{kr} sembolleri ile gösterilmektedir. Kritik eksenel yükün minimum değerini bulmak için **Denklemler (17) ve (18)** burkulma modu (m, n) 'ye göre minimize edilir.

3.2 Karşılaştırma

Karşılaştırmada, matris için PMMA adı verilen poli (metil metakrilat) ve takviye elemanı olarak (10, 10) KNT'ler kullanılmaktadır. KNT ve PMMA'nın mekanik özellikleri $T = 300K$ (oda sıcaklığı) için sırasıyla aşağıdaki gibidir [8]:

$$\begin{aligned}
 Y_{11}^{knt} &= 5.6466 \text{TPa}, \quad Y_{22}^{knt} = 7.080 \text{TPa}, \quad Y_{12}^{knt} = 1.9445 \text{TPa}, \\
 \nu_{12}^{CN} &= 0.175, \quad \rho^{knt} = 1400 \text{kg/m}^3 \quad \text{ve} \quad Y^m = 2.5 \times 10^9 \text{Pa}, \\
 \nu^m &= 0.34, \quad \rho^m = 1.15 \times 10^3 \text{kg/m}^3.
 \end{aligned}$$

Ayrıca, KNT'nin verimlilik parametreleri **Tablo 1**'de sunulmaktadır.

Tablo 1. KNT'lerin hacim oranı için KNT/matris verimlilik parametreleri

V_{knt}^*	η_1	η_2	η_3
0.12	0.137	1.022	0.715
0.17	0.142	1.626	1.138
0.28	0.141	1.585	1.109

Ü ve X tipi KNT'lerle modellenen kayma deformasyonlu silindirik kabukların kritik eksenel basınç yükü değerleri Shen [8] sonuçlarıyla karşılaştırmak için **Tablo 2**'de listelenmiştir. Shen [8] çalışmasında kritik eksenel basınç yükü $N_{shen}^{kr} = 2\pi RN_{kdt}^{kr}$ olarak kullanıldığı için bizim çalışmada elde edilen N_{kdt}^{kr} ifadesi $2\pi R$ ile çarpılmaktadır. KNT'nin geometrik özellikleri: $L_{knt} = 9.26 \text{nm}$, $R_{knt} = 0.68 \text{nm}$, $h_{knt} = 0.067 \text{nm}$ ve $\nu_{12}^{knt} = 0.175$ olup silindirik kabuğun geometrik karakteristikleri şu şekildedir: $R/h = 30$, $h = 0.002 \text{m}$, $\bar{Z} = L^2/Rh = 100, 300, 500$. KNT'nin hacim kesir oranı $V_{knt}^* = 0.17$ olarak ele alınmıştır. Bu veriler Shen [8] çalışmasından alınmıştır. Kayma gerilme fonksiyonlar şu şekildedir: $f_i(z) = z - 4z^3/3$, ($i = 1, 2$). **Tablo 2**'den görülebileceği gibi, bizim çalışmamızda elde edilen Ü ve X tipi KNT takviyeli kayma deformasyonlu silindirik kabuğun kritik eksenel basınç yükünün minimum değerleri Shen [8] çalışmasında elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. Parantez içindeki (m, n) sayıları eksenel burkulma yükünün minimum değerlerine karşı gelen dalga sayılarıdır.

Tablo 2. Değişik tip KNT örüntüsüne sahip silindirik kabukların KDT çerçevesinde kritik yük değerlerinin \bar{Z} parametresine bağlı olarak karşılaştırılması

\bar{Z}	$N_{shen}^{kr} = 2\pi RN_{kdt}^{kr} (m, n)$			
	Ü	X	Ü	X
	Ref. [8]		Bu çalışma	
100	121.08	142.81	121.278 (1,4)	138.953(1,4)
300	122.25	148.06	122.440 (2,4)	148.966 (1,3)
500	122.98	142.58	123.1203(2,4)	139.314 (2,4)

3.3 Nanokompozit silindirik kabukların burkulma analizi

Bu alt bölümde, KNT örüntülü silindirik kabukların kritik aksel yükü için sayısal sonuçlar sunulmaktadır. Özgün analizler için, malzeme özellikleri önceki karşılaştırmada sunulan matris olarak PMMA ve takviye olarak (10, 10) KNT'ler seçilmiştir. Kayma gerilme fonksiyonları da benzer şekilde parabolik fonksiyon olarak seçilmiştir. Sayısal hesaplarda Formüller (17) ve (18) ve Maple programı kullanılmaktadır.

Farklı KNT örüntüleri için kompozit silindirik kabukların kritik aksel yükleri ($10N_{1kdt}^{kr}$ ve $10N_{1kkt}^{kr}$) ve karşılık gelen (m, n) burkulma modlarının hacim kesir oranlarına göre dağılımı Tablo 3' de sunulmaktadır. Burada, silindirik kabuk karakteristikleri şu şekilde kullanılmıştır: $L/R=1$, $R/h=20$, $h=0.002m$. Tablo 3' den görüldüğü gibi kritik aksel yükün en büyük değeri X örüntülü silindirlerde meydana gelirken en küçük kritik aksel yük değeri Λ örüntülü silindirlerde ortaya çıkar. Kritik aksel yükün değerine kayma deformasyonlarının etkisi belirgin olmakla beraber V_{knt}^* 'nin değişimi ile farklılıklar göstermektedir. Örneğin; $V_{knt}^*=0.12$ 'den 0.17 'ye ve sonra 0.28 'e geçiş yaptığında kullanılan tüm örüntülerinde kritik aksel yük değerine enine kayma deformasyonlarının etkisi azalıp sonra artmaktadır. Örneğin, \ddot{U} , V , Λ ve X örüntülere sahip silindirlerde enine kayma deformasyonunun etkisi sırasıyla, $V_{knt}^*=0.12$ için %18.90, %13.02, %12.55 ve %26.98; $V_{knt}^*=0.17$ için %16.37, %11.06, %10.68 ve %24.24 ve $V_{knt}^*=0.28$ için %23.09, %15.38, %15.09 ve %33.34 olduğu görülmektedir. Burada kayma deformasyonunun etki oranı aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$\%100 \times \left(N_{1kkt}^{kr} - N_{1kdt}^{kr} \right) / N_{1kdt}^{kr}$$

Tablo 3' den görüldüğü gibi üniform örüntüye sahip silindirik kabukların kritik aksel yüküne kıyasla FD örüntülerin etkilerinin önemli derecede farklı olduğu görülmektedir. V ve Λ örüntülü kabukların kritik aksel yük değerleri üniform silindirik kabuktakinden küçük olduğu halde, X örüntülü kabuklarda bu değerler daha büyüktür. V_{knt}^* değiştiğinde kritik aksel yüke lineer değişen örüntü etkisi belirgin olup farklılıklar göstermektedir. Örneğin, örüntülerin kritik aksel yüke etkileri KKT ve KDT çerçevesinde sırasıyla,

$V_{knt}^*=0.12$ için V örüntüsünde (-19.93%) ve (-14.12%), Λ örüntüsünde (-%25.05) ve (-%19.17) ve X örüntüsünde %36.31 ve %22.73;

$V_{knt}^*=0.17$ için V örüntüsünde (-%19.07) ve (-%13.93), Λ örüntüsünde (-%24.22) ve (-%19.06) ve X örüntüsünde %35.81 ve %23.02;

$V_{knt}^*=0.28$ için V örüntüsünde (-%22.22) ve (-%14.42), Λ örüntüsünde (-%25.14) ve (-%17.34) ve X örüntüsünde %41.14 ve %22.33 olduğu görülmektedir.

Görüldüğü gibi KDT çerçevesinde örüntülerin kritik aksel yüke etkileri klasik kabuk teorisine kıyasla daha

düşük olmaktadır. Burada örüntü etkilerinin oranı bu ifade ile hesaplanmıştır: $\%100 \times \left(N_{1kdt}^{FD} - N_{1kdt}^{\ddot{U}} \right) / N_{1kdt}^{\ddot{U}}$.

\ddot{U} , V , Λ ve X şeklinde KNT örüntüleri için polimer silindirik kabukların boyutsuz kritik aksel yüklerinin ($N_{1kdt}^{kr} \times 10$ ve $N_{1kkt}^{kr} \times 10$) L/R oranına bağlı olarak dağılımı Şekil 3' de sunulmaktadır. Sayısal hesaplarda silindirik kabuk karakteristikleri şu şekilde seçilmiştir: $R/h=20$, $h=0.002m$ ve $V_{knt}^*=0.17$. Şekil 3' den görüldüğü gibi L/R oranı arttığında kritik aksel yükün değerleri sürekli olarak azalmaktadır.

Enine kayma deformasyonlarının kritik aksel yüke etkisi L/R oranının artmasına bağlı olarak güçlü bir şekilde belirginliğini kaybetmektedir. Bu azalma özellikle Λ ve V desenli silindirlerde gözlenmiştir. X desenli silindirlerde ise L/R oranı 0.75'den 1.75'e arttığında enine kayma deformasyonlarının kritik aksel yüke etkisinin azalmasına rağmen belirginliğini koruduğu görülmüştür. Örneğin, L/R oranı 0.75'ten 1.75'e arttığında \ddot{U} , V , Λ ve X -örüntüleri için kayma deformasyonlarının kritik aksel yüke etkileri sırasıyla, %28.24'ten %5.86'ya, %20.03'den %3.37'ye, %19.83'den %3.48'e, %38.55'ten %9.2'ye kadar azalmaktadır. Görüldüğü gibi oranının sonraki artışlarında kayma deformasyonların kritik aksel yüke etkileri azalarak yok olur ve bu durumda klasik kabuk teorisi çerçevesinde elde edilen ifadelerin kullanılması mümkün olabilir.

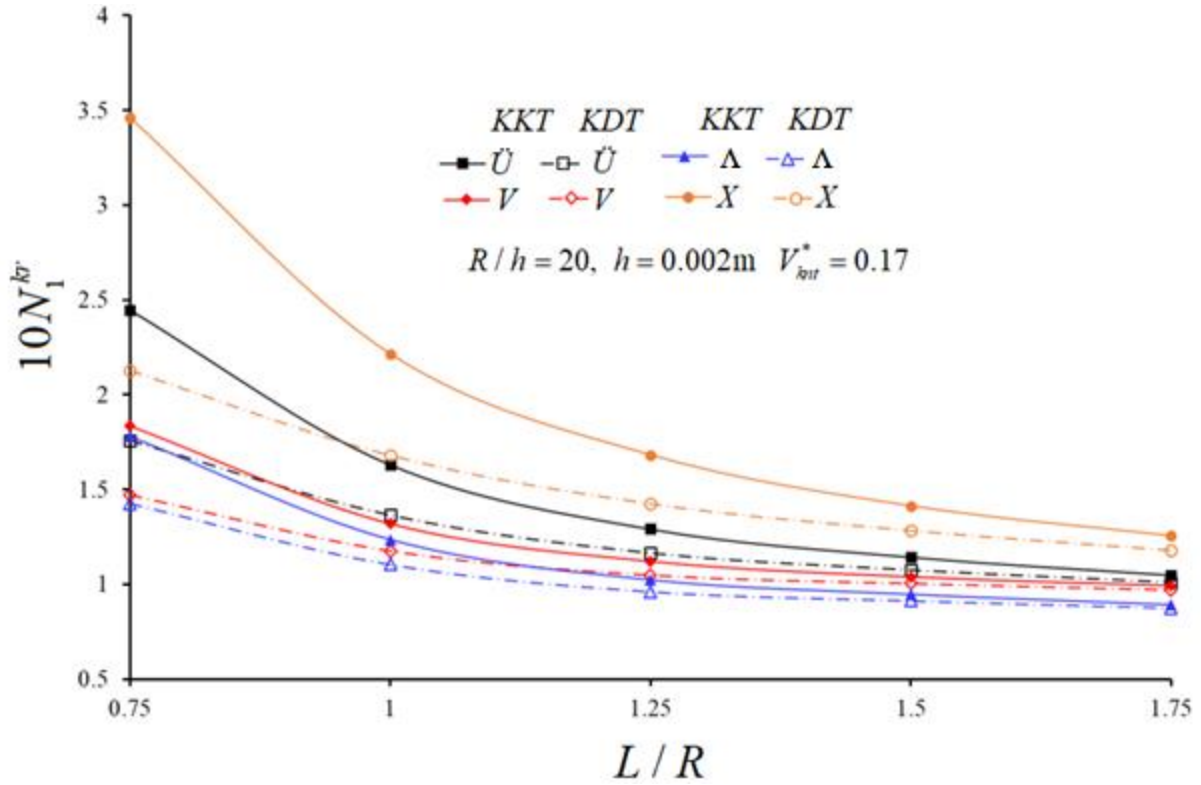
KNT'lerin polimer içindeki dağılımlarının kritik aksel yüke etkisi L/R oranının artmasına bağlı olarak sürekli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalmanın özellikle V örüntülü silindirde daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Λ ve X örüntülü silindirlerde ise L/R oranı arttığında örüntülerin kritik aksel yüke etkisinin azalmasına rağmen belirginliğini ciddi bir şekilde korumaktadır. Kayma deformasyon teorisi KKT'ye kıyasla örüntü etkilerini kayda değer olarak azaltmaktadır.

Örneğin, L/R oranı 0.75'ten 1.75'e arttığında fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik kabukların kritik aksel yük değerleri ile üniform dağılımlı silindirlerin kritik aksel yük değerleri kıyaslandığında, KDT çerçevesinde V , Λ ve X -örüntülerinin kritik aksel yüke etkileri sırasıyla, (-%16.34)'ten (-%4.06)'ya, (-%18.74)'ten (-%13.35)'e ve %21.07'den %16.62'ye kadar azalmakta iken, KKT çerçevesinde V , Λ ve X -örüntülerinin kritik aksel yüke etkileri sırasıyla, (-%24.93)'den (-%5.34)'e, (-%27.26)'dan (-%14.89)'a ve %41.4'ten %19.75'e kadar azalmaktadır.

Görüldüğü gibi L/R oranının sonraki artışlarında kayma deformasyonların kritik aksel yüke etkileri azalarak yok olur ve bu durumda klasik kabuk teorisi çerçevesinde elde edilen ifadelerin kullanılması mümkün olabilir.

Tablo 3. Farklı örüntüler için KNT takviyeli silindirik kabukların boyutsuz kritik eksenel yük değerleri ve (m, n) burkulma modlarının hacim kesir oranına göre dağılımı

V_{knt}^*	$N_1^{kr} \times 10, (m, n)$							
	Ü		V		Λ		X	
	KKT	KDT	KKT	KDT	KKT	KDT	KKT	KDT
0.12	1.074(1,4)	0.871(1,4)	0.860(1,4)	0.748(1,4)	0.805(1,4)	0.704(1,4)	1.464(1,4)	1.069(1,4)
0.17	1.631(1,4)	1.364(1,4)	1.320(1,4)	1.174(1,4)	1.236(1,4)	1.104(1,4)	2.215(1,4)	1.678(1,4)
0.28	2.399(1,4)	1.845(1,4)	1.866(1,4)	1.579(1,4)	1.796(1,4)	1.525(1,4)	3.386(1,4)	2.257(1,4)



Şekil 3. Farklı KNT örüntüleri için silindirik kabukların kritik eksenel yükünün L/R oranına bağlı olarak dağılımı

4 Sonuçlar

Eksenel basınç yüküne maruz KNT örüntülü silindirik kabukların burkulma analizi kayma deformasyon teorisi çerçevesinde sunulmaktadır. KNT örüntülü kompozit silindirik kabukların malzeme özelliklerinin konuma bağlı olduğu varsayılmaktadır. Nanokompozit silindirik kabukların temel denklemleri Donnell tipi kabuk teorisi kullanılarak türetilmiş ve Galerkin yöntemi uygulanarak çözülmüştür. KNT örüntülü silindirik kabuklar için kritik eksenel yük ifadesi KDT çerçevesinde bulunmuştur. KNT örüntüleri ve hacim kesir oranları, kabuk karakteristikleri değiştirilerek enine kayma deformasyonlarının FD nanokompozit silindirik kabukların kritik eksenel basınç yükü üzerindeki etkileri detaylı olarak araştırılmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 19

Kaynaklar

- [1] W. Khan, R. Sharma and P. Saini, Carbon nanotube-based polymer composites: Synthesis, properties and applications. In Carbon Nanotubes Current Progress of their Polymer Composites; Intech Open: London, UK, 2016.
- [2] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon. Nature, 354, 56–58, 1991. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- [3] E.T. Thostenson, Z. Ren and T.W. Chou, Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. Composites Science and Technology, 61, 1899-1912, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)
- [4] A.M.K. Eswai and M.M. Farag, Carbon nanotube reinforced composites: potential and current

- challenges. *Materials & Design*, 28, 2394-2401, 2007. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)
- [5] P.M. Ajayan, L.S. Schadler, C. Giannaris and A. Rubio, Single-walled nanotube-polymer composites: strength and weaknesses. *Advanced Materials*, 12(10), 750-753, 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:10<750::AID-ADMA750>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:10<750::AID-ADMA750>3.0.CO;2-6)
- [6] Y.J. Liu and X.L. Chen, Evaluation of effective material properties of carbon nanotube-based composites using a nanoscale representative volume element. *Mechanics of Materials*, 35, 69-81, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(02\)00200-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00200-4)
- [7] Y. Han and J. Elliott, Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites. *Computational Materials Science*, 39, 315-323, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2006.06.011>
- [8] H. S. Shen, Postbuckling of nanotube-reinforced composite cylindrical shells in thermal environments, Part I: Axially-loaded shells. *Composite Structures*, 93, 2096-2108, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.02.011>
- [9] Z.X. Lei, K.M. Liew and J.L. Yu, Buckling analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates using the element-free kp-Ritz method. *Composite Structures*, 98, 160-168, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.006>
- [10] S. Chakraborty, T. Dey and R. Kumar, Stability and vibration analysis of CNT-Reinforced functionally graded laminated composite cylindrical shell panels using semi-analytical approach. *Composites Part B-Engineering*, 168(209), 1-14, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.051>
- [11] V.H. Nam, N.T. Phuong and V.M. Duc, Nonlinear buckling of orthogonal carbon nanotube-reinforced composite cylindrical shells under axial compression surrounded by elastic foundation in thermal environment. *International Journal of Computational Materials Science and Engineering*, 8(4), Article Number: 1950016, 2019. [https://doi: 10.1142/S204768411950016](https://doi:10.1142/S204768411950016)
- [12] P.T. Hieu and H.V. Tung, Buckling of shear deformable FG-CNTRC cylindrical shells and toroidal shell segments under mechanical loads in thermal environments. *Zamm-Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 100 (11), Article Number: 201900243, 2020. <https://doi:10.1002/zamm.201900243>
- [13] J.N. Reddy, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells. Theory and Analysis*, Boca Raton, CRC Press, 2004.
- [14] E. Viola, F. Tornabene and N Fantuzzi, General higher-order shear deformation theories for the free vibration analysis of completely doubly-curved laminated shells and panels. *Composite Structures*, 95, 639-666, 2013. <https://doi:10.1016/j.compstruct.2012.08.005>
- [15] Avey M., Fantuzi N., Sofiyev AH. Mathematical modeling and analytical solution of thermoelastic stability problem of functionally graded nanocomposite cylinders within different theories. *Mathematics*, 10, 1081, 2022. <https://doi.org/10.3390/math10071081>
- [16] A.S. Volmir, *Stability of Elastic Systems*. Moscow, Nauka. English Translation: Foreign Tech. Division, Air Force Systems Command. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, AD 628508, 1967.





Al 6061/B₄C/GNP hibrit kompozitlerde B₄C ve GNP takviye miktarlarının abrasif aşınma davranışına etkisi

The effect of B₄C and GNP reinforcement amounts on abrasive wear behavior in Al 6061/B₄C/GNP hybrid composites

Muharrem Pul^{1,*} 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

Öz

Bu deneysel çalışmada aşınma davranışlarının incelemek amacıyla, vorteks yöntemi kullanılarak Al 6061 matrisli B₄C ve GNP takviyeli hibrit kompozitler üretilmiştir. Daha sonra pin-on disk yöntemiyle, aşındırıcı zımpara kullanılarak abrasif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yapı içerisindeki B₄C kompozit numunelerin sertlik değerlerini ve aşınma dayanımları yükselmiştir. GNP oranının artmasıyla, sertlik değerleri ve aşınma kayıplarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum grafenin kuru yağlayıcı özelliği ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca kompozit yapı içerisindeki takviye topraklanmasına bağlı olarak oluşan porozitenin mekanik özellikler üzerinde olumsuz yönde etki yaptığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, deneyler sırasında kompozit yapı içerisinde kopan B₄C parçacıklarının, zımparayla birlikte ikinci bir aşındırıcı gibi davranarak, aşınma kayıplarının artmasında etkili olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hibrit kompozit, Al 6061, B₄C, GNP, Abrasif aşınma

1 Giriş

Günümüz teknolojisinde kullanılan mühendislik malzemelerinin yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, hafiflik, yüksek korozyon dayanımı, yüksek aşınma direnci, ve ekonomiklik gibi özellikleri bir arada taşınması istenmektedir. Mevcut monolitik malzemelerin bu özelliklerin tümünü karşılaması çok zordur. Bu sebepten dolayı son yıllarda kompozit malzemelerin kullanımı hızla artmaktadır. Kompozit malzemeler neredeyse tüm endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle havacılık, savunma, otomotiv, spor aletleri, marine, tıp ve inşaat sektöründe çok farklı özelliklerde kompozit malzemeler her geçen gün giderek artan miktarlarda kullanılmaktadır. Kompozitler genel olarak metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli olmak üzere üç ana grupta toplanmıştır. Metal matrisli kompozitler temel malzemeyi metalin oluşturduğu ve içerisine genellikle seramik özellik taşıyan malzemelerin ilave edildiği kompozit türüdür. Temel matriseden ikiden fazla malzemenin takviye edildiği kompozitler ise hibrit olarak adlandırılmaktadırlar. Matris malzemesi takviye elemanlarını bir arada tutan ve kompozit yapının esas özelliğini taşır. Takviye elemanları ise kompozit yapıya

Abstract

In this experimental study, B₄C and GNP reinforced hybrid composites with Al 6061 matrix were produced using the vortex method to examine the wear behavior. Then, abrasive wear tests were carried out using the pin-on disc method, using abrasive sandpaper. According to the test results, the hardness values and wear resistance of the B₄C composite samples in the structure increased. The hardness values and wear losses decreased with the increase of the GNP ratio. This situation has been associated with the dry lubricating property of graphene. In addition, it was evaluated that the porosity formed due to agglomeration of the reinforcement in the composite structure had a negative effect on the mechanical properties. In addition, it was evaluated that the B₄C particles, which were separated from the composite structure during the experiments, acted as a second abrasive together with the sandpaper and were effective in increasing the wear losses.

Keywords: Hybrid composite, Al 6061, B₄C, GNP, Abrasive wear

daha yüksek ve gelişmiş teknik özellikler kazandırmakla görevlidir.

Metal matrisli kompozitlerde alüminyum, magnezyum ve çinko en popüler malzemelerdir [1]. Bu matris malzemelerinin tercih edilmesindeki en önemli sebep, üstün mekanik özelliklerinin yanında düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Alüminyum alaşımları, özellikle havacılık, otomotiv, denizcilik ve yapısal uygulamalar alanında, hafiflik, iyi ısıl iletkenlik ve korozyonun büyük ölçüde gerekli olduğu çeşitli ileri mühendislik uygulamalarında kullanılan matris malzemelerdir. Ancak düşük aşınma direncine sahip olması alüminyum alaşımlarının önemli bir dezavantajıdır [2]. Dolayısıyla yüksek performanslı tribolojik uygulamalarda alüminyum ve alaşımlarının kullanımı sınırlanmaktadır. Ancak Al₂O₃, TiB₂, SiC, B₄C ve Si₃N₄ gibi sert takviye partikülleri içeren alüminyum matrisli kompozitler (AMK'ler), geleneksel alüminyum alaşımlarına göre daha iyi aşınma direncine sahiptir [3]. Yapılan çalışmalarda özellikle kuru kayma koşulları altında, AMC içerisindeki SiC, Al₂O₃, TiC ve B₄C gibi seramik partiküllerin, alüminyum matristedeki plastik deformasyon miktarını sınırlayan etki yaptığı ve aşınma dayanımını arttırmak için kullanıldığı ifade edilmektedir [4]. Ancak

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mpul@kku.edu.tr (M. Pul)

Geliş / Received: 08.07.2022 Kabul / Accepted: 19.08.2022 Yayınlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngmuh.1142512

takviye fazının oranı, şekli, boyutu ve türü, bu tür malzemelerin direncini artırmak için oldukça önemlidir. Takviye fazının özellikleri, üretilen AMK'lerin kullanım amacı ile doğrudan ilişkilidir. Çoğu sürtünmeye maruz kalan AMK'ler başta otomotiv sanayi olmak üzere makine parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [5].

Alüminyum matrisli ve seramik takviyeli kompozitler (AMK), monolitik malzemelere göre daha üstün teknik özellikler gösterse de her geçen gün artan teknolojik ihtiyaçlar karşısında bazı uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir. Bu ihtiyaçlar nedeniyle, hibrit metal matrisli kompozitler üzerine, yapılan araştırmalar son zamanlarda ilgi çekmekte ve giderek artmaktadır [6]. Özellikle otomotiv endüstrisi ve diğer yapısal uygulamalarda kullanılmak üzere Al_2O_3 , TiC, TiB_2 , B_4C , TiN, Si_3N_4 , grafit ve endüstriyel atık gibi çeşitli partikül takviyeli alüminyum bazlı hibrit kompozitler, çeşitli potansiyel uygulamalar için tasarlanmış ve geliştirilmiştir [7]. Yapılan çalışmalarda ikinci takviye elemanı olarak kullanılan malzemelerde daha çok grafit, grafen, karbon nanotüp gibi nano malzemelerin tercih edildiği görülmektedir [8-10]. Özellikle tribolojik performansın geliştirilmesi istenen uygulamalarda grafen partiküllerinin katı yağlayıcı olarak hareket ettiği ve içinde bulunduğu kompozit malzemenin kendi kendini yağlayan özelliğe olduğu bildirilmektedir. Nanometrik partiküllerle takviye edilen kompozitlerin, daha kaba partiküllerle takviye edilenlerden daha üstün olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle, nano parçacıklar içeren hibrit kompozitler, yeni nesil AMK'ler olarak kabul edilmektedir [3].

AMK'ler çok farklı teknikler ile üretilmektedirler. Üretim yöntemleri arasında karıştırmalı döküm, alüminyum matrisli kompozitlerin üretilmesi için ilgi çekici bir işleme yöntemidir. Karıştırmalı döküm genellikle, önemli arayüz reaksiyonuna neden olabilen uzun süreli sıvı takviye temasını içerir. Bu yöntemde oksit yüzdesi %4'e kadar artırılarak kompozit yapının sertlik artırılabilir [11]. Karıştırmalı döküm işlemi, eriyiğe karışma performansı nedeniyle, metal matrisin takviye partiküllerini en iyi şekilde ıslatarak matris-takviye bağlanmasını sağlar. Son araştırmalarda karıştırma hızı, karıştırma süresi, erimiş metalin sıcaklığı, kalıbın ön ısıtma sıcaklığı ve parçacıkların tutarlı birleşmesi gibi uygun parametrelerin seçilmesiyle iyi ıslatma ve standartlaştırılmış karıştırmanın gerçekleştirilebileceği belirtmektedir [12]. Ayrıca kompozit üretim yöntemleri arasında karıştırmalı döküm diğer yöntemlere göre nispeten ucuz ve uygulanabilirliği yüksek olduğu için tercih edilmektedir.

Bu deneysel çalışmada takviye elemanı olarak kullanılan ve karbür seramikler grubunda yer alan B_4C , elmas ve CBN'den sonra en sert üçüncü malzeme olarak bilinmektedir. Özellikle savunma sanayiinde koruyucu zırh plakalarında, ulaştırma sektöründeki fren balatalarında, havacılık ve savunma sektöründe yüksek aşınma dayanımı istenen parçaların yapımında tercih edilmektedir. Dolayısıyla yapılan çalışmada alüminyum gibi yumuşak ve sünek bir metalle bir araya getirilen B_4C 'ün oluşturduğu kompozit malzemenin aşınmaya karşı gösterdiği davranışın incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmada karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak Al 6061 matrisli,

B_4C ve nano grafen plaka (GNP) takviyeli hibrit kompozitler, farklı takviye oranlarında üretilmiştir. Üretilen Kompozit malzemelerin abrasif aşınma deneyleri, sertlik ve porozite ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler mikroskop görüntüleriyle birlikte değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metod

Bu deneysel çalışmada kimyasal bileşimi % 0.7 Fe, 0.40-0.80 Si, % 0.60-1.10 Cu, %0.15 Mn, %0.25 Zn, %0.04-0.35 Cr olan Al 6061 alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak, hibrit kompozit yapıyı oluşturmak için B_4C (Borkarbür) ve GNP (nano grafen plaka) takviye elemanları olarak kullanılmıştır. Hibrit kompozit numunelerin üretimi karıştırmalı döküm (vorteks) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Hibrit kompozitlerin üretilmesinde kullanılan malzemelere ait bazı teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel malzemelerin teknik özellikleri

Al 6061	
Yoğunluk	2.70 g/cm ³
Sertlik	120 HKN
Erime Derecesi	650°C
Çekme Dayanımı	310 MPa
B_4C	
Yoğunluk	2.52 g/cm ³
Sertlik	276 HKN
Erime Derecesi	2650°C
Tane Boyutu	40-60 µm
GNP	
Yoğunluk	1.19 g/cm ³
Çekme Dayanımı	130 GPa
Erime Derecesi	3600°C
Tane Boyutu	5 nm -18 µm

İlk etapta külçe Al 6061 matris malzemesi karıştırmalı döküm ünitesindeki potaya konularak 750°C'de eritme işlemi yapılmıştır. Alüminyum ile B_4C arasındaki ıslatmayı iyileştirmek amacıyla %1 ağırlık oranındaki saf magnezyum (Mg) pota içerisine eklenmiştir. Daha sonra sıvı haldeki Al 6061 matris malzemesi için 900 rpm hızda karıştırma işlemi başlatılarak ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş olan takviye elemanları B_4C ve GNP kontrollü olarak pota içerisine ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi 10 min süreyle devam ettirilerek tamamlanmış ve kompozit sıvı karışım çelik kalıplara dökülmüştür. Bu işlemler tüm takviye oranındaki kompozit malzemeler için ayrı ayrı tekrarlanarak 13 farklı kompozit deneysel numunesi üretimi tamamlanmıştır. Hibrit kompozitlerin üretimine esas olan deneysel tasarımı ve kullanılan matris malzemesi Al 6061 ile takviye elemanları B_4C ve GNP'nin ağırlıkça karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Üretimi tamamlanan kompozit malzemelerin mikroyapılarını incelemek amacıyla dijital mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri çekilmiştir. Üretilen kompozit numunelerden yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü ve abrasif aşınma deneyleri için numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra üretilen tüm kompozit numunelerin deneysel yoğunluğu 0.001 g hassasiyetindeki elektronik terazi ile belirlenmiştir.

Tablo 2. Hibrit kompozit karışım oranları

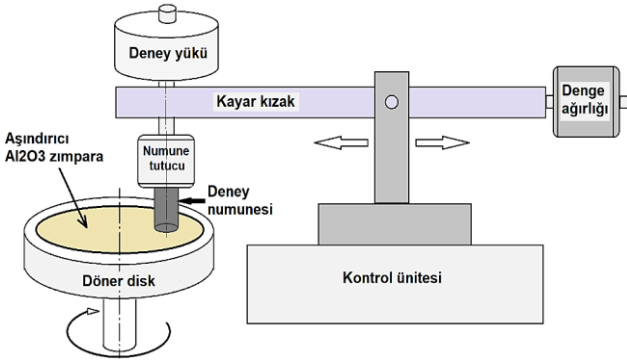
	Numune	% wt Al	% wt B ₄ C	% wt GNP
		6061	B ₄ C	GNP
1	Al 6061	100	-	-
2	5 B ₄ C	95	5	-
3	7 B ₄ C	93	7	-
4	10 B ₄ C	90	10	-
5	5 B ₄ C+0,5 GNP	94,5	5	0,5
6	5 B ₄ C+1,0 GNP	94	5	1,0
7	5 B ₄ C+2,0 GNP	93	5	2,0
8	7 B ₄ C+0,5 GNP	92,5	7	0,5
9	7 B ₄ C+1,0 GNP	92	7	1,0
10	7 B ₄ C+2,0 GNP	91	7	2,0
11	10 B ₄ C+0,5 GNP	89,5	10	0,5
12	10 B ₄ C+1,0 GNP	89	10	1,0
13	10 B ₄ C+2,0 GNP	88	10	2,0

Deney numunelerinin teorik yoğunluğu karışım kuralına göre Eşitlik 1'e kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_{th} = \rho_m V_m + \rho_r V_r \quad (1)$$

ρ_m matrisin yoğunluğu, V_m matrisin hacim oranı, ρ_r donatı yoğunluğu ve V_r donatının hacim oranıdır.

Sertlik ölçümlerinde *Brinell* yöntemi kullanılmıştır. Sertlik değerleri her numunenin 5 ayrı bölgesinden yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Abrasif aşınma deneylerinde pin on disk yöntemi kullanılmış olup, aşındırıcı olarak 240 mesh tane boyutundaki Al₂O₃ zımpara kağıdı kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada esas amaç kompozit yapı içerisindeki takviye elemanlarının aşınma davranışı üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu sebepten abrasif aşınma deneylerinde sabit tük ve sabit kayma hızının kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak kayma mesafesinde iki farklı mesafenin kullanılması kararlaştırılmıştır. Buna göre abrasif aşınma deneyleri 40 N sabit yük altında, 1,0 ms⁻¹ aşınma hızında 100 m ve 200 m aşınma mesafelerinde yapılmıştır. Abrasif aşınma deney düzeneğinin şematik gösterilişi Şekil 1'de verilmiştir.

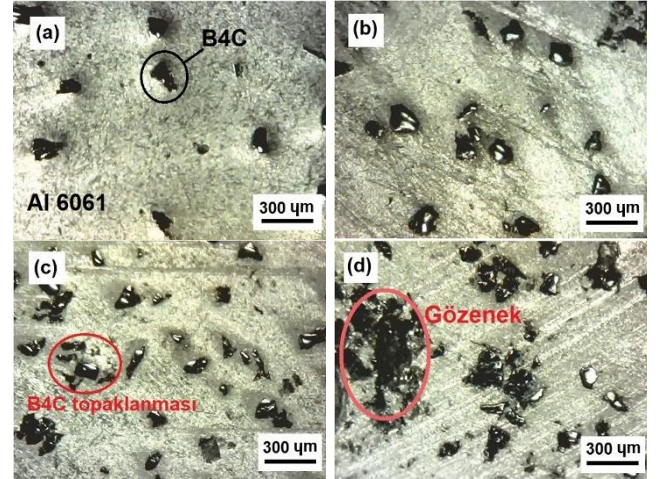


Şekil 1. Pin-on disk abrasif aşınma deney düzeneğinin şematik gösterilişi

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mikroyapılar

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B₄C/GNP takviyeli kompozitlerin mikroyapılarının ve takviye dağılımını incelemek amacıyla çekilen dijital mikroskop görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.

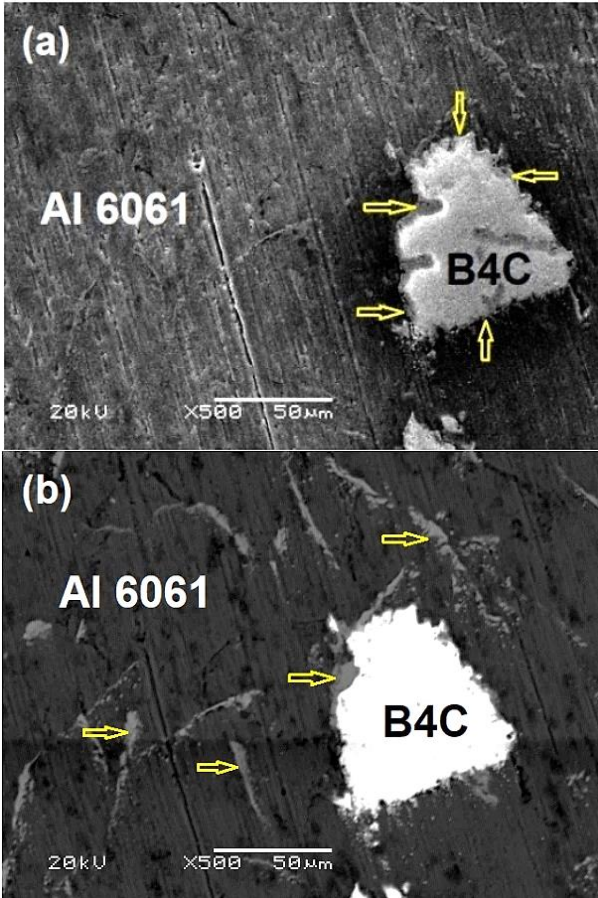


Şekil 2. Al 6061/B₄C kompozitlerin mikroyapıları (a) %5 B₄C takviyeli, (b) %7 B₄C takviyeli, (c) %10 B₄C takviyeli

Şekil 2'de yer alan dijital mikroskop görüntülerine bakıldığında kompozit yapı içerisindeki takviye elemanı B₄C parçacıklarının dağılımı görülmektedir. B₄C takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin giderek iyileştiği söylenebilir. Ancak Al 6061 matris malzemesi içerisindeki B₄C parçacıklarının miktarındaki artışla birlikte yer yer takviye topaklanmalarının meydana geldiği anlaşılmaktadır (Şekil 2-c). Takviye topaklanması aynı zamanda kompozit yapı içerisinde gözeke bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 2-d). B₄C takviye topaklanmasının bu tür parçacık takviyeli kompozitlerde meydana gelen yapısal durum olduğu literatürde yer almaktadır [13]. AMK malzemelerin üretiminde kullanılan karıştırmalı döküm yönteminin bazı avantajlarının yanında, düşük yapısal homojenite ve düzensiz takviye dağılımı gibi bazı dezavantajları da olmaktadır. Özellikle karıştırma sırasında ve potadan kalıplara dökülmesi sırasında sıvı matris içerisindeki takviye parçacıklarının belli bir yöne doğru hareket etmesi sebebiyle yığılma veya topaklanma oluşmaktadır.

Topaklanmanın daha çok küçük B₄C partiküllerinin bir araya gelmesiyle oluştuğu dikkat çekmektedir. Kompozit yapıyı oluşturan takviye elemanı B₄C partiküllerinin eşit boyutta olmaması ve boyut aralığının geniş olması nedeniyle küçük B₄C partiküllerinin sıvı matris içerisinde daha kolay sürüklenerek bir araya geldiği ve gözenekli bölgeleri oluşturduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca partikül boyutunun küçülmesiyle birlikte partikül toplam yüzey alanı artmakta olup gözenekliliğin artmasında ayrıca etki yapmaktadır [14]. Literatürde yer alan ve farklı partikül boyutlarının etkisinin incelendiği çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir [15]. Bu malzeme davranışı aynı zamanda kompozit yapı içerisinde gözenekli bölgelerin oluşmasına neden olarak kompozit yapının mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Takviye partiküllerinin homojen olmayan dağılımı, ıslanabilirlik, gözeneklilik ve eriyik ile takviye arasındaki kimyasal afinite, karıştırmalı döküm uygulamasında karşılaşılan önemli zorluklardır. Parçacıkların düzgün olmayan dağılımı, takviye parçacıkları

ile matris alaşımı eriyiği arasındaki yoğunluk farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Parçacıkların bir matris içinde düzgün dağılımı aynı zamanda dökme hızından, dökme sıcaklığından ve döküm yolluğunun biçiminden de etkilenir [16]. Kompozit yapıdaki gözeneklilik sertlik ölçümlerinde, çekme veya eğme deneylerinde kararsız veya sıradışı test sonuçlarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu tür metal matrisli ve seramik esaslı partikül takviyeli kompozitlerde karşılaşılan en önemli zorluklardan birisi de matris-takviye arasındaki düşük ıslatmadır. Yetersiz veya hiç olmayan ıslatma sonucunda kompozit yapının mekanik özelliklerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir. Islanabilirlik, sıvı eriyiğin katı bir yüzey üzerinde yayılma yeteneğidir. Düşük ıslanabilirliğe katkıda bulunan nedenlerden bazıları, yüzey alanının partiküllerin ortalama çapına oranının yüksek olmasıdır. Karıştırma, hidrojen oluşumu ve büzülme sırasında gaz sıkışması nedeniyle gözeneklilik ortaya çıkar [16]. Takviye ve matris malzemesinin yüzey enerjisi ve seramik parçacıkların yüzey temizliği, matris malzemesi ile takviye fazı arasındaki ıslanabilirliği etkileyen iki önemli faktördür. Ayrıca B₄C takviye partikülleri yüzeyinde oluşabilecek sert oksit tabakasının temizlenerek ıslatmanın iyileştirilebileceği rapor edilmektedir [17]. Şekil 3'te B₄C takviye elemanı ile Al 6061 matris malzemesi arayüzünü incelemek üzere çekilen SEM ve BSE görüntüleri verilmiştir.

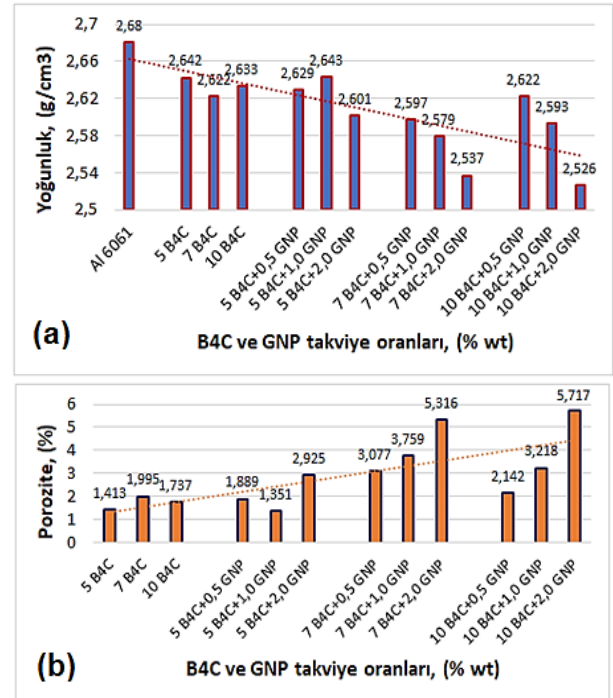


Şekil 3. Matris-takviye ara yüzeyi (a) SEM görüntüsü, (BSE) görüntüsü

Şekil 3'teki görüntüler incelendiğinde, Al 6061 matris ile B₄C takviye elemanı arasında iyi sayılabilecek bir ıslatmanın olduğu söylenebilir. Zira matris-takviye arayüzünde gözle görünür seviyede boşluk veya çatlak oluşmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 3-a). Karıştırmalı döküm işlemi sırasında sıvı alüminyum içerisine Mg eklenmesi ile matris-takviye arasındaki ıslatmanın iyileştirildiği değerlendirilmektedir. Literatürdeki çalışmada magnezyum ilavesinin, katının yüzey enerjisini arttırdığı, sıvı matris alaşımının yüzey gerilimini azalttığı ve parçacık matrisinde katı-sıvı ara yüzey enerjisini azaltarak ıslatmayı arttırdığı ifade edilmektedir. Aynı çalışmada Mg ilavesinin ağırlıkça %1'in üzerine çıkarılması halinde kompozit bulamacın vizkozitesinin artacağı, bununla parçacık dağılımını zorlaştıracak rapor edilmektedir [18]. Ancak kompozit yapıyı oluşturan malzemelerin çok farklı termal davranışları sebebiyle, soğuma sırasında ara yüzeyde meydana gelen dislokasyonların daha açık renkte alüminyum fazlarını ve oksit tabakalarını oluşturduğu ifade edilebilir (Şekil 3-b).

3.2 Yoğunluk ve porozite

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B₄C/GNP takviyeli kompozitlerin yoğunluk ölçümleri ve buna göre belirlenen porozite miktarlarına ait grafikler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. (a) Al 6061/B₄C+GNP kompozitlerin yoğunluğu, (b) Al 6061/B₄C+GNP kompozitlerin porozite miktarı

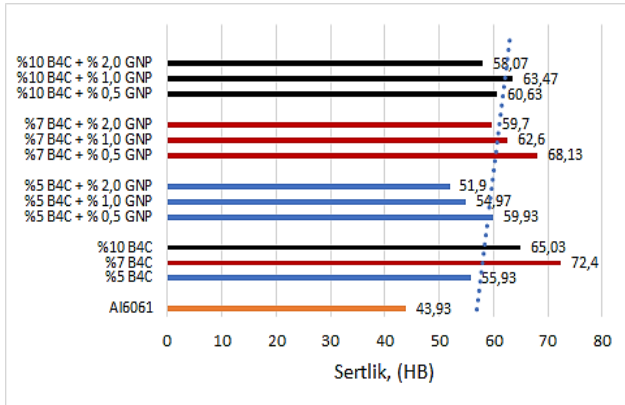
Şekil 4'teki grafiklere birlikte bakıldığında iki grafik arasındaki değerlerde ters orantı olduğu, yoğunluk düşerken porozitenin (gözeneklilik) yükseldiği dikkat çekmektedir. Kompozit yapı içerisinde oluşabilen gözeneklilik, yoğunlukla doğrudan ilişkilidir [19]. Bu beklenen bir malzeme davranışı olup literatürde benzer çalışmalarda benzer sonuçlar ifade edilmektedir [14, 15, 20, 21].

Kompozit yapı içerisindeki B₄C oranının artmasıyla yoğunluk değerleri azalırken, gözenek miktarlarının artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Literatürdeki bir çalışmada, artan B₄C hacim fraksiyonu ile artan miktarda gözeneklilik görüldüğü ve B₄C yüzey temas alanı arttıkça, gözenekliliğinde artış gösterdiği belirtilmiştir. Bu durum B₄C partikül bölgelerindeki gözenek çekirdeklenmesine ve daha fazla partikül kümelenmesi nedeniyle engellenen sıvı metal akışına atfedilmiştir [19].

Grafiklerde göze çarpan diğer önemli husus ise hibrit yapının oluşmasının sağlayan GNP oranının artmasıyla gözenek miktarlarının önemli ölçüde yükselmiş olmasıdır. Yapı içerisine takviye edilen GNP yoğunluk değerlerini azaltırken aynı zamanda poroziteyi arttırmıştır. Literatürdeki çalışmada, grafen Al ile daha az ıslanabilirliğe sahip olduğundan ve daha büyük fraktal yüzeylere yol açan nanoparçacıkların topaklanmasından dolayı, kompozitin gözenek miktarını yükseldiği rapor edilmektedir [22].

3.3 Sertlikler

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B₄C/GNP takviyeli kompozitlerin Brinell yöntemiyle yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilen değerlere göre oluşturulan grafik Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Al 6061/B₄C+GNP kompozitlerin sertliği

Şekil 5'te yer alan grafiğe bakıldığında, saf Al 6061 malzemeye göre tüm kompozit malzemelerin sertlik değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Kompozit malzemeler içinde en yüksek sertlik değeri sade %7 B₄C takviyeli numunede 72,4 HB olarak ölçülürken, en düşük sertlik değeri sade %5 B₄C takviyeli numunede ölçülmüştür. Kompozit yapı içerisinde çok sert fazda bulunan B₄C partikülleri kompozitin sertlik değerini yükseltmiştir. Kompozit yapının sertliğindeki artış, esas olarak B₄C parçacıkların termal genleşme katsayısının (CTE) Al 6061 alaşımından daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, katılma işlemi sırasında parçacık-matris ara yüzeyinde çok büyük miktarda dislokasyon oluşur ve bu da alüminyum matrisin sertliğini artırır. Parçacık-matris ara yüzünün miktarı ne kadar yüksekse yani kompozit yapı içerisindeki takviye miktarı ne kadar fazlaysa, dislokasyonlardan kaynaklanan sertleşme de o kadar fazla olmaktadır [21]. Literatürdeki benzer çalışmada, Al2024 matris alaşımına göre MMK'lerin sertliğinin daha yüksek

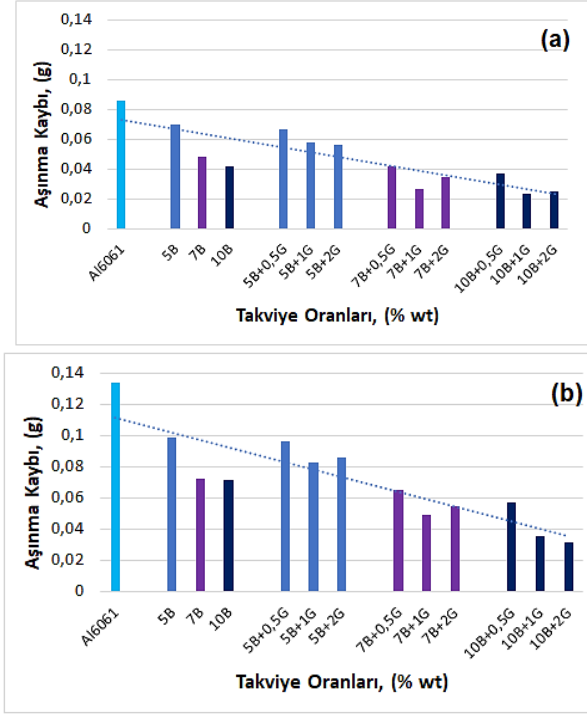
olduğu ve B₄C partiküllerinin eklenmesiyle sertliğin arttığı ifade edilmektedir [13]. Literatür araştırıldığında benzer sonuçların rapor edildiği çok sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir [14-16, 23, 24]. Ancak en yüksek takviye oranı olan %10 B₄C takviyeli numunenin sertliği %7 B₄C takviyeli numuneden daha az değerde gerçekleşmiştir. Normal şartlarda kompozit yapı içerisindeki sert takviye fazının oranını artmasına bağlı olarak sertlik değerinin de %7 takviyeli numuneye göre daha yüksek çıkması beklenirken durum böyle olmamıştır. Bu sıra dışı sertlik davranışına kompozit yapı içerisindeki yüksek gözenekliliğin sebep olduğu değerlendirilmektedir. B₄C takviye oranını %10' yükselmesiyle yapı içerisindeki topaklanmaya bağlı olarak daha fazla gözenekli bölgelerin oluştuğu mikroyapı değerlendirmesinde ifade edilmişti. Dolayısıyla artan gözenek kompozit yapının yoğunluğunu azaltarak beraberinde sertlik değerinin de azalmasına neden olmuştur. Kompozit içerisindeki B₄C takviye oranının belli bir değere kadar çıkmasıyla sertlik değerini giderek yükselttiği, ancak belli bir değerden sonra B₄C oranı yükselmeye devam ettiğinde sertlik değerinin düşmeye başladığı çalışmalar literatürde yer almaktadır [17, 25].

İkinci eleman olarak GNP'nin takviye edildiği hibrit kompozitlerde de benzer sertlik davranışı meydana gelmiş olup en yüksek sertlik değerleri %7 B₄C+GNP takviyeli kompozitlerden elde edilmiştir. Bu değerler sertlik ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Hibrit kompozitler içerisindeki GNP takviye oranının %0,5'ten %2,0'ye çıkmasına bağlı olarak, her takviye oranında kendi içerisinde sertlik değerleri azalma eğilimine girmiştir. Benzer sonuç literatürdeki bir çalışmanın sonuçlarında ifade edilmiştir [18]. Yumuşak bir dispersoid olan grafit, kompozitin sertliğine olumlu katkıda bulunmadığından, sertlikteki bu azalma beklenebilir. Etkili bir katı yağlayıcı olan grafit, malzemeyi sertlik test cihazının probuna bağlı olarak daha kolay deforme edilebilir hale getirir. Bu da sertlik değerinin düşük ölçülmesine neden olur [21]. Burada grafenin yağlayıcı etkisiyle birlikte, kompozit yapı üzerindeki yumuşatıcı etkisinin de ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

3.4 Abrasif aşınmalar

Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen Al 6061 matrisli ve B₄C/GNP takviyeli kompozitlerin pin-on disk yöntemiyle 100 m ve 200 m kayma mesafelerinde yapılan abrasif aşınma deneylerinden elde edilen aşınma kaybı değerlerine göre oluşturulan grafikler Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6'daki grafiklere bakıldığında, B₄C/GNP takviyeli kompozit malzemelerin aşınma kayıplarının takviyesiz Al 6061 alaşımına göre oldukça azaldığı ilk olarak göze çarpmaktadır. Elmas ve kübik bor nitrür (CBN)'den sonra en sert üçüncü malzeme olarak bilinen B₄C takviye elemanı partiküllerin, kompozit yapının aşınma dayanımını arttırdığı kesin olarak ifade edilebilir. Literatür araştırıldığında, alüminyum esaslı ve B₄C takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve aşınma davranışlarının incelendiği pek çok çalışmada benzer sonuçlara işaret edildiği görülmektedir [3, 20, 26, 27].

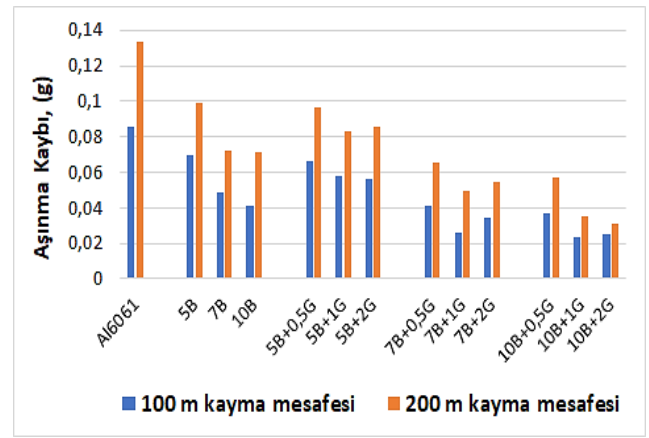


Şekil 6. Al 6061/B₄C+GNP kompozitlerin abrasif aşınmaları (a) 100 m kayma mesafesi, (b) 200 m kayma mesafesi

Şekil 6 incelenmeye devam edildiğinde, hibrit kompozit içerisinde bulunan GNP takviye elemanının aşınmayı azaltıcı etkisi de dikkat çeken diğer önemli husustur.

Bor karbür ilavesi kompozitlerin hem mukavemetini hem de aşınma direncini artırır, ancak B₄C'nin tek başına daha yüksek miktarlarda eklenmesi kompoziti kırılmalı hale getirir ve işlemeyi zorlaştırır. Bu dezavantajı azaltmak amacıyla B₄C'ün yanına ikinci bir eleman olarak takviye edilen grafen ile kompozitlerde mukavemet azalması probleminin üstesinden gelmek amaçlanmıştır. Bu durum hibrit kompozitlerin ortaya çıkmasıyla yol açmıştır. Hibrit kompozitler, alüminyum alaşımına kıyasla daha iyi aşınma özellikleri sergiler [28]. Bu çalışmada da %5, %7, %10 B₄C takviyenin yanında yapı içerisine ilave edilen GNP'nın oranı arttıkça aşınma kayıplarının da azalma başladığı grafiklerdeki eğilim çizgisinden de anlaşılmaktadır. Literatürdeki çalışmada grafit ağırlık yüzdesindeki artışla birlikte kompozitin aşınma direnci de arttığı ifade edilmiştir [16]. Bunun en önemli sebebinin grafenin katı yağlayıcı özelliği göstererek, deneyler sırasında sürtünme katsayısını azaltıp beraberinde aşınma kayıplarının azalmasını sağlamasıdır. Literatürdeki çalışmada 6061 alüminyum alaşımının tribolojik davranışı, katı yağlayıcı olarak grafit parçacıklarının eklenmesiyle iyileştiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada Al-Gr kompozitinin sürtünme katsayısının da grafit parçacıklarının eklenmesiyle azaldığı ve baz alaşımdan 2.5 kat daha düşük bir değer kaydettiği rapor edilmiştir [29]. Grafit ve grafen birbiriyle ilişkili karbon esaslı malzemelerdir. Çok sayıdaki grafen tabakası bir araya gelerek grafiti oluşturmaktadır. Veya grafitten alınan bir tabaka ile grafen oluşturulmaktadır. Dolayısıyla yapılan

çalışmalarda hem grafit hem de benzer amaçlar için kullanılmaktadır. Her iki malzemede bir karbon allotropudur ve aşınma deneyleri sırasında teması azaltan veya kısmen önleyen bir tribolojik tabaka oluşturarak aşınmayı azaltıcı etki yapar. Yapılan bir çalışmada, Gr partiküllerinin kompozitlerin aşınma direncini önemli ölçüde iyileştiren ince bir yağlayıcı film oluşturduğu rapor edilmiştir [18]. Literatürde yer alan ve aynı takviye elemanları kullanılan alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin aşınma davranışlarının incelendiği çalışmalarda, benzer sonuçlar ifade edilmiştir [15, 17]. Yapılan bu çalışmada aynı yük ve aşınma hızı ile iki farklı aşınma mesafesi uygulanmıştır. Şekil 7'de 100 m ve 200 m mesafede yapılan abrasif aşınma deneylerinde elde edilen aşınma kayıpları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



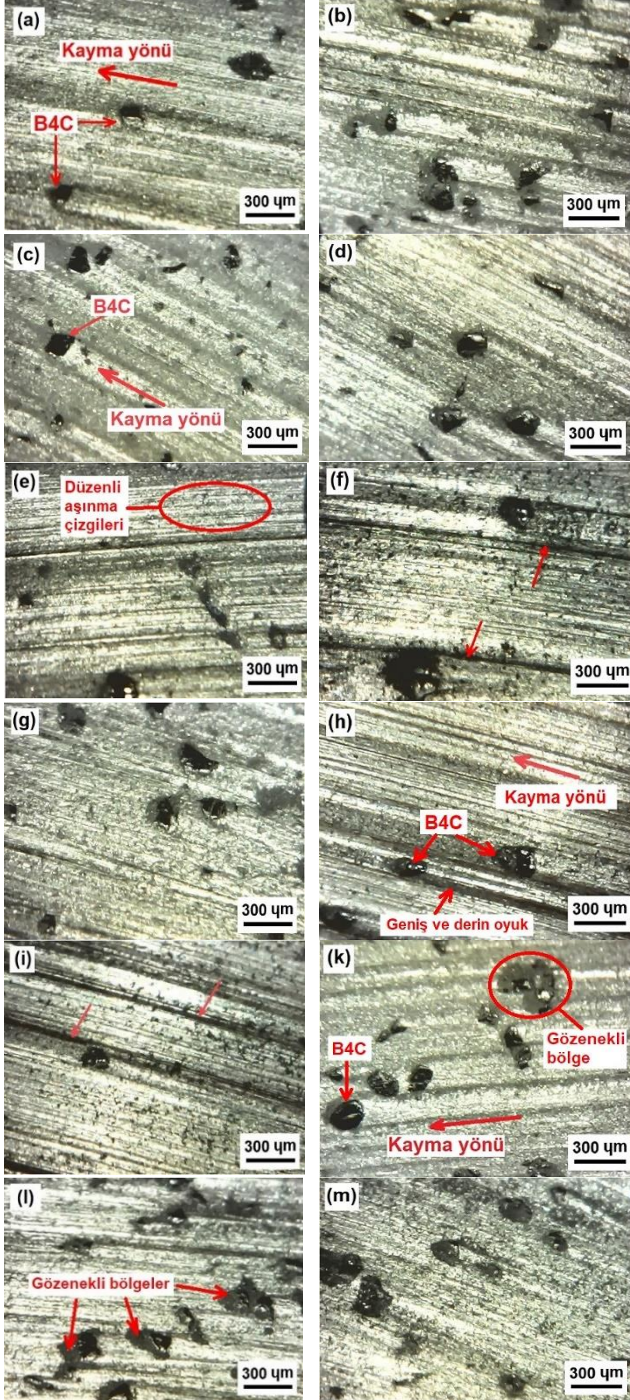
Şekil 7. Al 6061/B₄C+GNP kompozitlerin abrasif aşınmaları

Abrasif aşınma deneylerinde 100 m ve 200 m olmak üzere iki farklı kayma mesafesi uygulanmıştır. Ancak kayma/aşınma mesafesinin %100 artmasına rağmen aşınma kayıpları aynı oranda artış göstermemiştir. Aşınma mesafesinin dolayısıyla da süresinin artmasıyla numune yüzeyindeki sürtünmeye bağlı sıcaklığın artmasıyla birlikte yumuşak fazdaki alüminyum matrisin daha da yumuşayarak malzeme yüzeyindeki aşınma yarıklarına ve koparak ayrılan B₄C takviyelerin geride bıraktığı boşluklara sıvandırdığı değerlendirilmektedir. Böylece aşındırıcı zımpara tanelerinin yüzeyden kaldırdığı ve çok ince talaş formundaki alüminyum partiküllerin bir kısmı uzaklaşmadan tekrar yüzeye yapışarak aşınma kayıplarının daha az ölçülmesine neden olduğu kanaatine varılmıştır. Aşınma kayıplarının artan sürtünme mesafesine bağlı olarak aynı oranda artmamasının ikinci önemli sebebi ise, uygulanan deney yöntemi ve aşındırıcı olarak zımpara kağıdının kullanılmasıdır. Aşınma deneylerinin her birinde yeni ve hiç kullanılmamış zımpara kağıdı kullanılmıştır. Ancak aşınma deneyleri sırasında kompozit malzemeden koparak ayrılan alüminyum matris malzemesi ve takviye elemanlarının yanında, aynı zamanda zımpara kağıdındaki Al₂O₃ taneciklerinin de bir kısmı kopmakta veya aşınmaktadır. Bu durumda zımpara kağıdı üzerinde yapılan deneydeki süre uzadıkça, zımpara kağıdı körelmekte ve aşındırma performansı giderek azalmaktadır. Dolayısıyla aşınma

mesafesi yani süresinin artışıyla aynı oranda aşınma kaybı meydana gelmemektedir.

3.5 Yüzey morfolojisi

Abrasif aşınma deneyine tabi tutulan kompozit numunelerin yüzey hasarını ve aşınma davranışını gözlemlemek amacıyla çekilen dijital mikroskop görüntüleri Şekil 8’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 8. Hibrit kompozitlerin aşınmış yüzeylerine ait dijital mikroskop görüntüleri; (a) %5 B₄C, (b) %7 B₄C, (c) %10 B₄C - (d) %5 B₄C+%0,5 GNP, (e) %5 B₄C+%1,0 GNP, (f) %5 B₄C+%2,0 GNP - (g) %7 B₄C+%0,5 GNP,

(h) %7 B₄C+%1,0 GNP, (i) %7 B₄C+%2,0 GNP - (k) %10 B₄C+%0,5 GNP, (l) %10 B₄C+%1,0 GNP, (m) %10 B₄C+%2,0 GNP

Kompozit yapıdaki abrasif aşınma davranışını daha iyi görebilmek için aşınma miktarı daha fazla olan ve 200 m mesafede yapılan aşınma deneyi numunelerinin yüzey görüntüleri seçilmiştir.

Şekil 8’deki aşınmış yüzey görüntülerine bakıldığında aşınma çizgileri veya oyuklarının varlığıyla birlikte kompozit yapı içerisindeki B₄C takviye partikülleri de göze çarpmaktadır. Aşınma deneyleri sırasında uygulanan yük ve sürtünme kuvvetinin etkisiyle alüminyum matris içerisinden kopan B₄C taneciklerinin derin aşınma oyuklarına yol açtığı anlaşılmaktadır (Şekil 8-h, 8-k). Ayrıca deneyler sırasında yerinden oynayan ancak kompozit yapıdan ayrılmayan bazı B₄C tanelerinin etrafında oluşan gözenekli bölgelerde dikkat çekmektedir (Şekil 8-k, 8-l). Hibrit kompozit yapı içerisindeki GNP oranının artmasıyla aşınmış yüzey görüntülerinin koyulaştığı anlaşılmaktadır. GNP oranının %2’ye çıktığı hibrit numunelerin yüzeylerindeki aşınma çizgilerinin renginin diğerlerine göre daha koyu ve siyaha yakın olduğu görülmektedir. Bu durumu, deneyleri sırasındaki sürtünme ve aşınma yükünün etkisiyle grafitin yüzeye sıvanması ve boyaması olarak değerlendirmek mümkündür (Şekil 8-f, 8-i).

Hibrit kompozit yüzeyler incelenmeye devam edildiğinde, aşınma hasarını ifade eden çizgi veya oyukların oluşmasında aşındırıcı zımpara tanelerinin etkisi de çok net olarak anlaşılmaktadır. Yüzey üzerindeki düzenli ve aynı formdaki aşınma çizgilerinin zımpara üzerindeki Al₂O₃ aşındırıcı taneleri tarafından oluşturulduğu ifade edilebilir (Şekil 8-e). Yapılan bu abrasif aşınma deneyinde asıl aşındırıcı etkenin zımpara olduğu, bunun yanında kompozit yapı içerisinde yer alan çok sert fazdaki B₄C takviye taneciklerinin de koparak yüzeyi çizdiği ve ikinci bir aşındırma etkisi yarattığı değerlendirilmektedir. Dolayısıyla meydana gelen ana aşınma mekanizmasının mikro kesme, mikro sabanlama (ploughing) ve mikro çizme etkileriyle oluşan plastik deformasyon olduğu anlaşılmaktadır [30]. Hibrit yapı içerisindeki grafitin yağlayıcı etkisiyle yüzeyden ayrılan alüminyum talaşlarının doğrudan yüzeye temasın bir miktar önlendiği ve bunun sabanlama etkisini azalttığı da literatürde rapor edilmektedir [18]. Ayrıca yapı içerisindeki grafitin aşınma deneylerindeki sürtünme katsayısını azalttığı ve aşınma direncini arttırdığı ifade edilmektedir [29, 31, 32].

4 Sonuçlar

Al 6061 matrisli, B₄C ve GNP takviyeli hibrit kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarının araştırıldığı çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Hibrit kompozit malzemeler başarılı olarak üretilmiş olmasına rağmen yapı içerisinde yer yer takviye topraklanması ve buna bağlı olarak oluşan gözenekli bölgeler gözlenmiştir. Bu tür kompozit yapılarda yer yer matris ve takviye malzemeleri arasındaki çok farklı termal özellikler nedeniyle matris-takviye ara yüzeyinde ıslatma zorlukları yaşanabilmektedir.

B₄C oranının artmasına bağlı olarak kompozit yapının yoğunluk değerleri azalırken, gözenekli bölgeler ve porozite miktarı artış göstermiştir. Yoğunluk-porozite ilişkisinde ters orantı oluşmuştur.

B₄C takviye elemanının ilave edilmesiyle birlikte, saf Al 6061 malzemeye göre tüm kompozit numunelerin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Ancak %10 B₄C takviyeli numunenin sertlik değeri %7 B₄C takviyeli numuneye göre bir miktar azalmıştır. Bu sıra dışı mekanik davranış, artan B₄C takviye fazıyla birlikte kompozit yapıdaki gözenekli bölgelerin daha fazla artış göstermesi ve gözenekliliğin sertlik ölçümünde daha baskın olması ile açıklanmıştır.

Hibrit yapı içerisindeki GNP oranının artmasına bağlı olarak tüm B₄C takviye oranlarındaki numunelerde kendi içerisinde sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum grafenin yağlayıcı etkisiyle birlikte, hibrit yapı üzerinde yumuşatıcı etki yapmasına atfedilmiştir.

B₄C takviye elemanının ilave edilmesiyle birlikte, saf Al 6061 malzemeye göre tüm kompozit numunelerin aşınma dayanımları artmıştır. Aynı şekilde, hibrit yapı içerisindeki GNP oranının artmasına bağlı olarak tüm B₄C takviye oranındaki numunelerde kendi içerisinde aşınma direnci yükselmiştir. Bu durum grafenin kuru yağlayıcı etkisine atfedilmiştir.

Aşınma deney mesafesi ve süresinin iki kat arttırılmasına rağmen aşınma kayıplarında aynı oranda artış olmamıştır. Bu durum artan aşınma süresiyle birlikte, aşınma yüzeyindeki sürtünme nedeniyle artan sıcaklığına bağlı olarak alüminyum matris malzemesinin yüzeye sıvanmasına bağlanmıştır. Ayrıca kullanılan aşındırıcı zımpara üzerindeki Al₂O₃ taneciklerinin giderek körelmesi ve daha az sabanlama yapabilmesi de aşınma kayıplarını azaltan başka bir sebep olarak değerlendirilmiştir.

Aşınan yüzeylerde abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu görülmüştür. Aşındırıcı zımparayla birlikte kompozit yapı içerisinde kopan B₄C partiküllerinin de ikinci bir aşındırıcı gibi davrandığı ve yüzeylerdeki deformasyonu arttırıcı etki yaptığı anlaşılmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] M. R. Prakash, R. Saravanan and M. Nagal, Fabrication and Wear Behavior of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-An Overvie IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 14 (1), 10-20, 2017. <https://doi.org/10.9790/1684-1401041020>
- [2] S. Mosleh-Shirazi, F. Akhlaghi, n and D.Y. Li, Effect of graphite content on the wear behavior of Al/2SiC/Gr hybrid nano-composites respectively in the ambient environment and an acidic solution. Tribology International, 103, 620-628, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.08.016>
- [3] R. İpek, Adhesive wear behaviour of B4C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/B4C-

- Al/SiC). Journal of Materials Processing Technology, 162-163, 71-75, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.207>
- [4] M. Yıldırım and D. Özyürek, An Investigation of Wear Behaviors of AA7075 Al Hybrid Composites. High Temp. Mater. Proc. 37 (7), 619-624, 2018. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0016>.
- [5] Ajith Arul Daniela, S. Murugesana, Manojkumara and S. Sukkasamya, Dry Sliding Wear Behaviour of Aluminium 5059/SiC/MoS2 Hybrid Metal Matrix Composites. Materials Research, 20 (6), 1697-1706, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0009>
- [6] G. Pitchayapillai, P. Seenikannan, K. Raja and K. Chandrasekaran, Al6061 Hybrid Metal Matrix Composite Reinforced with Alumina and Molybdenum Disulphide. Advances in Materials Science and Engineering, ID 6127624, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6127624>).
- [7] L. Rajeshkumar, R. Kamalakannan, K. Arun Kumar and T. Abineesh, Dry Sliding Wear Behavior of AA2219 Reinforced with Magnesium Oxide and Graphite Hybrid Metal Matrix Composites. International Journal of Engineering Research & Technology, 6 (7), 2018.
- [8] S. Nallusamy and A. Karthikeyan, Analysis of Wear Resistance, Cracks and Hardness of Metal Matrix Composites with SiC Additives and Al2O3 as Reinforcement. Indian Journal of Science and Technology, 9 (35), 2016. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i35/100149>
- [9] M. Khan, R. U. Din, M. A. Basit, A. Wadood, S. W. Husain, S. Akhtar and R. E. Aune, Study of microstructure and mechanical behaviour of aluminium alloy hybrid composite with boron carbide and graphene nanoplatelets. Materials Chemistry and Physics, 271, 124936, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124936>
- [10] N. Kaushik and S. Singhaal, Mechanical and Metallurgical Examinations of Stir Cast Aluminum Matrix Composites: A Review Study. International Journal of Engineering and Technology, 9 (4), 3203-3217, 2017. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i4/170904135>
- [11] B. Bihari and A. K. Singh, An Overview on Different Processing Parameters in Particulate Reinforced Metal Matrix Composite Fabricated by Stir Casting Process, Int. Journal of Engineering Research and Application, 7 (1), 42-48, 2017. <https://doi.org/10.9790/9622-0701034248>
- [12] P. Jadhav, B. R. Sridhar, M. Nagal, M. Vijay Kumar, & Jayasheel. I. Harti, A Comparative Study On Microstructure And Mechanical Properties Of A356-B4C and A356-Graphite Composites, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 8(2), 273-282, 2018.
- [13] A. Canakci, F. Arslan and T. Varol, Physical and mechanical properties of stir-casting processed AA2024/B4Cp composites. Sci Eng Compos Mater.,

- 21(4), 505-515, 2014. <https://doi.org/10.1515/secm-2013-0118>
- [14] M. Nagaral, Attar S, H. N. Reddappa, V. Auradi, S. S. Kumar and S. Raghu, Mechanical Behavior of Al7025-B4C Particulate Reinforced Composites, *Journal of Applied Mechanical Engineering. J Appl Mech Eng.*, 4 (6), 1000186, 2015. <https://doi.org/10.4172/2168-9873.1000186>
- [15] R. Banchhor and P. S. Sahu, Effect of different reinforcement on mechanical properties of aluminium metal matrix composites. *Research Journal of Engineering*, 6 (7), 39-45, 2017.
- [16] G. Sivakaruna and P. S. Babu, A Survey On Effects Of Reinforcement On Aluminium Metal Matrix Composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8 (9), 112-131, 2017.
- [17] R. S. Bhatia and Kudlipsingh, An Experimental Analysis of Aluminium Metal Matrix Composite using Al₂O₃/B₄C/Gr Particles. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8 (4), (Special Issue) 83-90, 2017.
- [18] P. Sharmaa, D. Khanduja and S. Sharma, Dry sliding wear investigation of Al6082/Gr metal matrix composites by response surface methodology. *Jmaterres technol*, 5 (1), 29-36, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.05.001>
- [19] 19. A. Mazahery, M. O. Shabani, E. Salahi, M. R. Rahimpour, A. A. Tofigh and M. Razavi, Hardness and tensile strength study on Al356-B4C composites, *Materials Science and Technology*. 28 (5), 634-638, 2012. <https://doi.org/10.1179/1743284710Y.0000000010>
- [20] A. Canakci and F. Arslan, Abrasive wear behaviour of B4C particle reinforced Al 2024 MMCs, *Int J Adv Manuf Technol*, 63, 785-795, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3931-8>
- [21] P. Jadhav, B. R. Sridhar, M. Nagaral, V. Kumar. M & Jayasheel. I. Harti, A Comparative Study On Microstructure And Mechanical Properties Of A356-B4C and A356-Graphite Composites, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8 (2), 273-282, 2018,
- [22] Arnav Shil, Sandipan Roy, P. S. Balaji, Jitendra Kumar Katiyar, Sumit Pramanik and Anuj Kumar Sharma, Experimental analysis of mechanical properties of stir casted aluminium-graphene nanocomposites IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 653, 012021, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/653/1/012021>
- [23] B. Rebba and N. Ramanaiah, Studies on Mechanical Properties of 2024 Al-B4C Composites, *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, 4 (1), 42-46, 2014. <http://dx.doi.org/10.11127/ijammc.2014.03.06>
- [24] K. Ch. K. Kumar, T. N. Raju and Y. N. Laxmi, Studies on Al6061-B4c Metal Matrix Composites Fabricated By Stir Casting Process. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering, Special Issue*, 296-299, 2017.
- [25] E. S. Rao and N. Ramanaiah, Intermetallic-reinforced boron carbide (B4C) composites produced through stir casting processing, *Composite Materials : An International Journal*, 1 (2), 058-066, 2016.
- [26] A. Baradeswaran, S. C. Vettivel, A. E. Perumal, N. Selvakumar and R. F. Issac, Experimental investigation on mechanical behaviour, modelling and optimization of wear parameters of B4C and graphite reinforced aluminium hybrid composites. *Materials and Design*, 63, 620-632, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.054>
- [27] A. Baradeswaran and A. E. Perumal, Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites, *Composites Part B: Engineering*, 54, 146-152, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.012>
- [28] T. Thirumalai, R. Subramanian, S. Kumaran, S. Dharmalingam and S. S. Ramakrishnan, Production and characterization of hybrid aluminum matrix composites reinforced with boron carbide (B4C) and graphite. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 73 (10), 667-670, 2014.
- [29] A. Baradeswaran and A. Elayaperumal, Effect of Graphite Content on Tribological behaviour of Aluminium alloy - Graphite Composite, *European Journal of Scientific Research*, 53 (2), 163-170, 2011.
- [30] M. Kök and K. Özdin, Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al₂O₃ particles, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 301-309, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.02>
- [31] S. O. Adeosun, L. O. Osoba and O. O. Taiwo, Characteristics of Aluminum Hybrid Composites, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 8(7), 731-738, 2014.
- [32] C. Velmurugan, Experimental Study On The Wear Characteristics Of Heat Treated Aluminium Hybrid Composites. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(9), 191-200, 2017.





Süperkapasitör performansını artırmak için grafitik karbon nitrür /grafen hibrit yapılarının kullanılması

Using graphitic carbon nitride/graphene hybrid structures to improve supercapacitor performance

Buse Sert¹ , Ersan Harputlu^{2,*} 

¹ Tarsus Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus Türkiye

² Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 33400, Tarsus, Türkiye

Öz

Uygun morfolojiye ve mükemmel iletkenliğe sahip yüksek verimli, düşük maliyetli hibrit nanoyapılar tasarlamak, elektrokimyasal depolama cihazlarında kullanılan elektrotlar için umut vericidir. Bu çalışma, süperkapasitör (SK) uygulamaları için grafitik karbon nitrür ($g-C_3N_4$) ve indirgenmiş grafen oksit hidrojel (rGOH) yapılarından oluşan üç boyutlu (3B) hibrit yapının üretimi ve elektrokimyasal çalışmalardan elde edilen sonuçları içermektedir. Bilindiği üzere, süperkapasitörde spesifik kapasitans miktarının artırılması yapıda kullanılan elektrot-elektrolit arasındaki temas yüzeyi ile doğru orantılıdır. Bu yüzden, rGOH yapısının yüksek yüzey alanı ve termal stabiliteye sahip olması, $g-C_3N_4$ 'ün de süperkapasitörlerde elektrokimyasal aktiviteyi arttırmasından dolayı, mevcut yapılar bir araya getirilerek elde edilen elektrotun spesifik kapasitans değeri ölçülmüştür. Süperkapasitör olarak kullanılacak bu elektrotun üretilmesiyle, yüksek spesifik kapasitans değeri elde edilmiştir. Elektrokimyasal çalışmalar sonucunda, $g-C_3N_4@rGOH$ hibrit yapısının 5 mVs⁻¹ tarama hızında 157.4 F/g yüksek kapasitans değeri elde edilmiştir. Ayrıca 1000 döngüde %112'lik benzersiz bir döngüsel stabilite performansı sergilemiştir.

Anahtar kelimeler: Grafitik karbon nitrür, Enerji depolama, Süperkapasitör, Hibrit elektrot

1 Giriş

Son zamanlarda süperkapasitörler, hızlı şarj-deşarj olmaları, mükemmel çevrim kararlılığı, yüksek güç yoğunluğu ve düşük maliyet gibi özelliklerinden dolayı geleneksel dielektrik kapasitörlere göre oldukça dikkat çekmektedir [1,2]. Elektrokimyasal süperkapasitörler, enerji depolama sistemleri olarak üç farklı şekilde sınıflandırılabilir; elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC), psödokapasitörler (faradaik) ve hibrit kapasitörlerdir. EDLC'ler performanslarını çift katmanlı kapasitanstan alır ve enerjiyi elektrostatik olarak depolamaktadır. Faradaik ultrakapasitörler, hızlı yüzey redoks reaksiyonları yoluyla enerjiyi depolar [3]. Çok daha verimli enerji depolama ve dönüştürme cihazlarına duyulan ihtiyaç, araştırmacıları, benzersiz enerji depolama cihazlarının geliştirilmesi için yeni malzemeleri araştırmaya

Abstract

Designing high-efficiency, low-cost hybrid nanostructures with suitable morphology and excellent conductivity is promising for electrodes used in electrochemical storage devices. This study includes the results obtained from electrochemical studies and the production of a three-dimensional (3D) hybrid structure consisting of graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) and reduced graphene oxide hydrogel (rGOH) structures for supercapacitor (SC) applications. As it is known, increasing the amount of specific capacitance in the supercapacitor is directly proportional to the contact surface between the electrode and the electrolyte used in the structure. Therefore, since the rGOH structure has a high surface area and thermal stability, and $g-C_3N_4$ increases the electrochemical activity in supercapacitors, the specific capacitance value of the electrode obtained by combining the existing structures was measured. By producing this electrode to be used as a supercapacitor, a high specific capacitance value was obtained. As a result of electrochemical studies, a high capacitance value of 157.4 F/g was obtained at 5 mVs⁻¹ scanning speed of the $g-C_3N_4@rGOH$ hybrid structure. It also demonstrated an unmatched cyclic stability performance of 112% at 1000 cycles.

Keywords: Graphitic carbon nitride, Energy storage, Supercapacitor, Hybrid electrode

ve tasarlamaya teşvik etmektedir. Mn_2O_3 [4], Cu_3P [5], FeP [6] vb. gibi farklı birçok yarı iletken malzeme elektrot olarak hazırlanmış ve önemli ölçüde yüksek enerji depolama performansı gösteren süperkapasitörlerde kullanılmıştır. Fakat süperkapasitör çalışmalarında kullanılan en popüler malzemelerden biri, geniş yüzey alanı, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek mekanik mukavemet gibi yapısal esneklik sergilemesi nedeniyle grafen ve grafen bazlı hibrit yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır [7].

İki boyutlu (2B) grafen yapısına ve özelliklerine sahip olan grafitik karbon nitrür ($g-C_3N_4$), yüksek termal ve kimyasal stabiliteleri nedeniyle fotokatalist uygulamalarda, süper kapasitör, lityum iyon piller, katı elektrolitler ve lityum metal anotlar gibi fotoelektrokimya alanında büyük ilgi görmüştür [8, 9]. $g-C_3N_4$, çoğu karbon tabanlı malzeme ile karşılaştırıldığında, elektron açısından zengin özelliklere

sahiptir [10]. Grafen bazlı türevlerle karşılaştırıldığında ise, tipik bir metal içermeyen polimerik yarı iletken olan g-C₃N₄, fizikokimyasal kararlılık özellikleri, çevreye zarar vermemesi gibi benzersiz diğer avantajlarda sahiptir [11]. Yüksek azot içermesi sebebiyle de tercih edilen g-C₃N₄, bazı elektrokimyasal aktif malzemelerle birleştirilip iletkenliğini arttırmak amacıyla, hibrit yapılarda sıklıkla kullanılmıştır [12]. g-C₃N₄ içeren kompozitlerin, saf g-C₃N₄'e göre daha iyi elektriksel iletkenlik gösterdiği, daha iyi yapı bütünlüğüne sahip olduğu, yüksek yüzey alanı ve gelişmiş elektrokimyasal stabilite gibi avantajları olduğu bilinmektedir. Hamed Soltani vd [13] MnO₂/g-C₃N₄ heteroyapılı elektrotların süper kapasitif performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. MnO₂/g-C₃N₄ elektrotlarının elektrokimyasal kapasitif performansları, döngüsel voltametri (CV), galvanostatik şarj/deşarj testleri ve elektrokimyasal empedans spektrumları (EIS) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hazırlanan tüm MnO₂/g-C₃N₄ kompozit elektrotların SC performansının saf MnO₂ ve saf g-C₃N₄ elektrotlardan daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Sentezlenen MnO₂/g-C₃N₄ elektrotlarının spesifik kapasitesinin en yüksek 87.6 F/g olarak bulunmuşlardır. Ghulam Nabi vd [14] araştırmasında ise, elektrokimyasal performansı iyileştirmek amacıyla g-C₃N₄, TiS₂ ve TiS₂/g-C₃N₄ kompozitini kolay bir hidrotermal yöntemle sentezlemiştir. TiS₂ ve TiS₂/g-C₃N₄ kompozitlerinin elektrokimyasal performansı, 2M KOH elektrolitinde üçlü elektrot sistemi kullanılarak çalışılmıştır. 2500 döngüden sonra kapasitesinin %87 döngüsel stabilite göstererek, süperkapasitörlerde kullanılabilecek bir elektrot aday olduğunu ispatlamışlardır.

Bu çalışmada, rGOH tabanlı, yüksek verimli, düşük maliyetli 3B'lu g-C₃N₄ katkılı rGOH hibrit nanoyapılar üretilmiş ve elektrokimyasal çalışmaları yapılmıştır. g-C₃N₄, süperkapasitörlerin elektrokimyasal aktivitesini arttırmada önemli bir rol oynaması sebebiyle seçilirken, süperkapasitörlerindeşarj kapasitesini arttırmanın yanı sıra geniş yüzey alanı ve iyi iletkenliği sebebiyle de rGOH tercih edilmiştir. g-C₃N₄'ün yapısal ve morfolojik analizi sırasıyla; XRD ve SEM ile yapılırken, bu nanokompozit malzeme üzerindeki fonksiyonel gruplar FTIR spektroskopisi ile incelenmiştir. g-C₃N₄@rGOH hibrit yapısının yüzey alanı BET analiziyle belirlenirken, elde edilen elektrotların elektrokimyasal performansı döngüsel voltmetre (CV) kullanılarak ölçülmüştür.

2 Materyal ve metot

2.1 Kullanılan kimyasallar

Üre (Ph.Eur., >99.5%), Etanol, Doğal grafit, Sülfürik asit (H₂SO₄), Nitrik asit (HNO₃), Potasyum permanganat (KMnO₄), Potasyum Hidroksit (KOH), Hidrojen peroksit (H₂O₂), Askorbik asit, NMP (N-metil piroolidon).

2.1.1 Grafen oksit sentezi, g-C₃N₄ sentezi

GO, modifiye Hummers (Kovtyukhova vd., 1999) yöntemi ile sentezlenmiştir. g-C₃N₄ 58 g üre'nin kül fırını içerisinde 580 0C'de (5 0C/dk) 3 saatlik sıcaklığa maruz bırakılarak Şekil 1'deki gibi elde edildi. Oluşan g-C₃N₄'ün saflandırma işlemi, fırından çıkan ürünün 0.1M nitrik asit

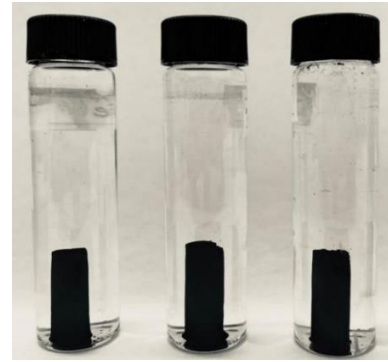
(HNO₃) çözeltisi ile yıkanarak yapılmıştır. Ortamdaki asiti uzaklaştırmak için g-C₃N₄ en az üç kez saf su ile yıkanmış, ortam pH'ı 5-6 arasında gelene kadar bu işlem devam etmiştir. Son olarak, g-C₃N₄ 70 0C etüvde kurumaya bırakılmıştır [15].



Şekil 1. g-C₃N₄'ün sentez şeması

2.1.2 g-C₃N₄@rGOH nanokompozit yapısından hidrojel hazırlanması

Öncelikle sabit miktarda alınan GO (30 mg), saf su (15 mL) içerisinde iyice dağılına kadar (1 saat), oda sıcaklığında ultrasonikasyonda bekletildi. Farklı oranlarda alınan g-C₃N₄ miktarları (30 mg/ 60 mg/ 15 mg) 10 mL saf su içerisinde ayrı bir yerde karıştırılmıştır. Her iki karışımda iyice dağıldıktan sonra birleştirilmiştir. Farklı oranlardaki g-C₃N₄/GO karışımına askorbik asit (60 mg) eklenerek 1 saat daha ultrasonikasyonda bekletilmiştir. Sonuçta, hazırlanan malzemeler otoklavda, 180 0C'de 24 saat ısıtılması ile Şekil 2'de görüldüğü gibi g-C₃N₄@rGOH oluşmuştur.



Şekil 2. g-C₃N₄@rGO hidrojeller

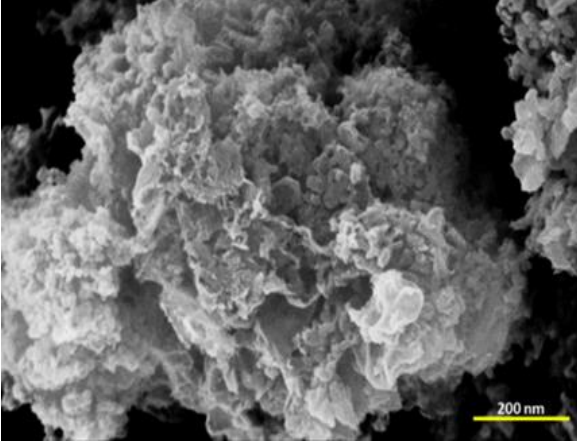
2.1.3 Kompozit elektrotun hazırlanması

Bu çalışmada elektrotun elektrokimyasal davranışı döngüsel voltametri (CV) cihazında yapılmıştır. CV ölçümünde kullanılacak çalışma elektrotu (g-C₃N₄@rGOH) ağırlıkça % 90 aktif malzeme (10 mg), ağırlıkça % 10 PVDF, N-metil prolidon (NMP) (1 mL) çözgeni içinde hazırlanmıştır. Bu karışım, hidrotermal yöntemle karbon kaplı nikel köpük üzerine düzgünce kaplanmış, vakumlu etüvde 24 saat 80 0C'de kurutulmuştur. Ölçüm için hazırlanan CV hücresi çalışma elektrotu, karşıt elektrot ve referans elektrotu 6 M KOH elektrolit içerisine daldırılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 $g-C_3N_4$ karakterizasyon yöntemleri

$g-C_3N_4$ 'ün SEM görüntülerinden ise yüzey morfolojisine ait detaylar görülmüştür. Bu nano yapı, tipik katmanlı ve yığılmış yapılar ile birlikte üst üste binen katmanlar, düzensiz ve çıkıntılı bir yapı göstermiştir (Şekil 3) Nano boyutlu parçacık benzeri bir yapı gösteren $g-C_3N_4$ eşit olmayan sıcaklık dağılımından dolayı homojen dağılım sergilenmemiştir.



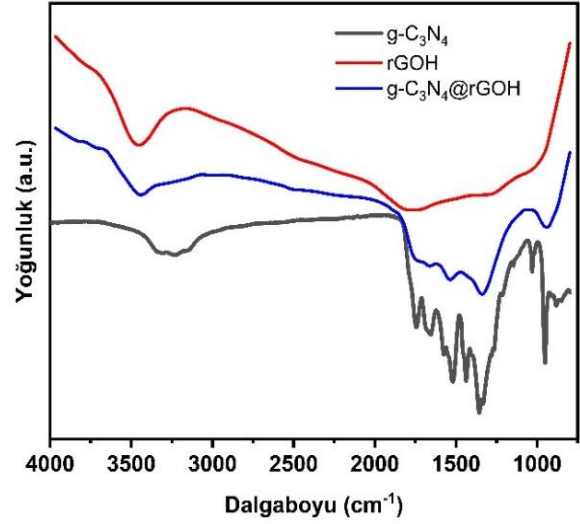
Şekil 3. $g-C_3N_4$ 'ün SEM görüntüsü

Şekil 4' de, $g-C_3N_4$, rGOH ve $g-C_3N_4@rGOH$ 'ın FTIR spektrumlarını göstermektedir. $g-C_3N_4$ yapısındaki C-N bağlarının gerilme titreşimleri $1200-1650\text{ cm}^{-1}$ 'de ortaya çıkmaktadır. $806-885\text{ cm}^{-1}$ aralığında değişen pikler, sırasıyla triazin halka germe ve N-H bant deformasyon modlarına atfedilmektedir [16]. rGOH için; 1450 cm^{-1} 'deki zirve, oksitlenmemiş grafit alanların iskelet titreşiminden kaynaklanmaktadır [17]. $3300-3445\text{ cm}^{-1}$ 'deki tepe noktası ise OH gerilme titreşimlerinden kaynaklanan yoğun bir tepe noktasıdır [18,19] ve $1800-1000\text{ cm}^{-1}$ arasında çok daha düşük yoğunluktaki diğer tepe noktaları görülmektedir. Bu durum FT-IR verilerinde, hidrotermal indirgemeden sonra artık oksijen içeren fonksiyonel grupların hidroksil ve epoksi grupları olarak görülmektedir [20]. $g-C_3N_4@rGOH$ 'ın FTIR spektrumlarını tespit edilen pikler neredeyse ortak olup, 3445 cm^{-1} deki rGOH'a ait pikin biraz daha genişlediği görülmektedir [21]. Açıkça, $\sim 1231\text{ cm}^{-1}$ 'deki C-O-C tepe noktası, araştırılan tüm $g-C_3N_4@rGOH$ nanokompoziti için gözlemlenebilir. Ayrıca bu durum rGOH yüzeyindeki çıkarılmamış -OH gruplarının çapraz olarak kullanılabilmesini gösterir. Bu nedenle, rGOH ve $g-C_3N_4$ 'ü birbirine bağlayan bağlayıcılar, nanokompozitin bant aralığının daralmasına neden olur [22].

3.2 $g-C_3N_4@rGOH$ hibrit yapısının karakterizasyonu

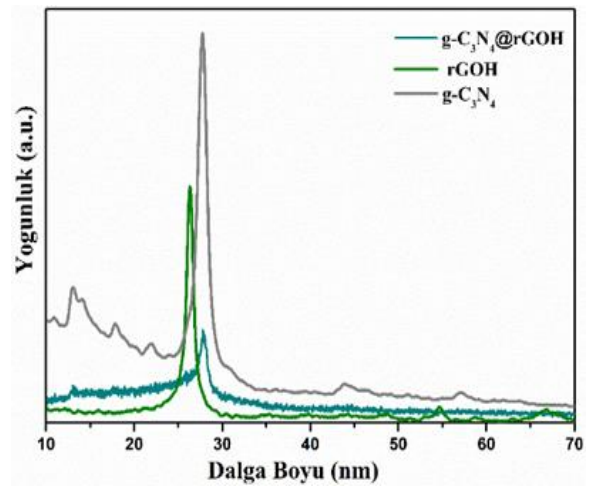
Ürenin $580\text{ }^\circ\text{C}$ 'de termal polimerizasyonu sonucunda sentezlenmesiyle oluşan $g-C_3N_4$ 'ün kristal yapısı, toz XRD analizi kullanılarak incelenmiştir. (JCPDS Card No. 87-1526). Saf $g-C_3N_4$ $27,5\text{ }^\circ$ 'de güçlü bir karakteristik pik göstermiştir. Tüm bu pikler, düşük kristallik derecesine sahip bir malzemeye karşılık gelmektedir [23]. Aynı zamanda bu güçlü tepe, konjuge aromatik sistemlerin ara katman istifini

de göstermektedir. Ek olarak $13,5^\circ$ 'de başka karakteristik tepe noktası ise saf $g-C_3N_4$ 'ün tri-s-triazin birimlerinin düzlem içi sıralanmasına karşılık gelmektedir [24]. rGOH'ın XRD spektrumuna bakıldığında 2 Teta (2θ) açısı $\approx 26^\circ$ elde edilmiş ve rGOH yapıları arasındaki mesafenin ise 3.60 \AA olduğu Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 5'de görüldüğü gibi $g-C_3N_4$, rGOH ve $g-C_3N_4@rGOH$ 'ın XRD modeli için, tüm XRD tepe noktaları, malzemenin hibrit yapıda olduğunu ispatlamaktadır. Özetle, $g-C_3N_4$ 'ün rGOH'a başarıyla katkılındığını görülmektedir [25].

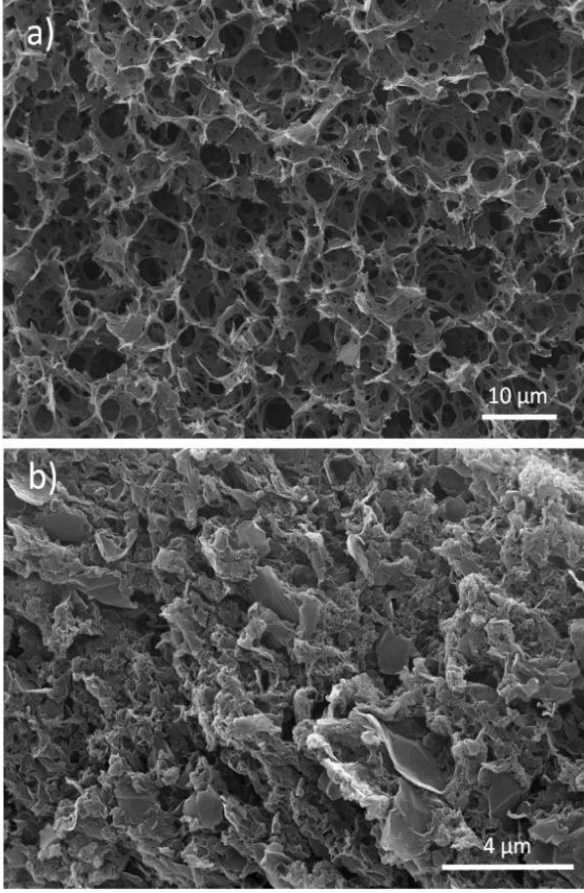


Şekil 4. $g-C_3N_4$, rGOH ve hibrit yapıya ait FTIR spektrumları

rGOH'a $g-C_3N_4@rGOH$ hibrit yapılarının morfolojik olarak incelenmesi Şekil 6'da verilen SEM analizi ile gerçekleşmiştir. rGOH yapısına neredeyse homojen bir dağılım sergileyen mikron çaplarda gözenekli yapıların olduğu rahatlıkla görülmektedir. Fakat $g-C_3N_4$ tabakaları, rGOH tabakası ile birleştiğinde rGOH yapısına göre daha kalın katmanların meydana geldiği ve gözenek boyutlarında bir düşüş olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. $g-C_3N_4@rGOH$ XRD spektrumları $g-C_3N_4@rGOH$ 'ın yüzey morfolojisine ait görüntü



Şekil 6. rGOH (a) ve g-C₃N₄@rGOH (b) SEM görüntüleri

Hazırlanan hibrit yapının ve rGOH'ın yüzey alanı ve gözenekliliği için BET (Brunauer-Emmett-Teller) analizi yapılmıştır. BET analizinde, Tablo 1'de görüldüğü gibi partikül boyutu küçüldükçe yüzey alanı-hacim oranında bir artış olmuştur. BET sonuçları, SEM sonuçlarıyla güçlü bir şekilde ilişkilidir, çünkü her ikisi de yapıdaki boşlukların varlığını gösterir. rGOH'ın hibrit yapıya kıyasla daha yüksek yüzey alanına sahip olduğu açıkça görülmektedir. Aşağıda verilen Tablo 1'de rGOH yapısına katılan g-C₃N₄ miktarındaki artış hibrit yapının BET yüzey alanında

bir azalışa neden olmuştur. Bu azalışın sebebi ise; rGOH yüzeyinin daha fazla g-C₃N₄ ile sarılmasına ve böylece aktif bölgelerin bazı kısımlarının engellenmesine karşılık gelmiştir [26].

3.3 g-C₃N₄@rGOH üzerine yapılan elektrokimyasal çalışmalar

Hazırlanan hibrit elektrotun elektrokimyasal ölçümleri için kullanılan CV cihazı, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve galvanostatik yük-deşarj (GCD) ile ölçülmüştür. CV eğrileri farklı tarama hızlarında alınmış olup (5, 10, 20, 30, 40, 50 ve 100 mVs⁻¹), GCD ölçümleri ise farklı akım yoğunluklarında (1, 2, 3, 4, 5 ve 10 A g⁻¹) ve EIS verileri ise, 0.01 Hz ila 100 kHz frekans aralığında toplanmıştır. Üç elektrotlu bir cam hücre (çalışma elektrotu, platin levha karşı elektrotu, doymuş kalomel elektrot referans elektrotu) kullanılan bu çalışmada, 6M'lık KOH elektrolit çözeltisi içerisinde ölçümler tamamlanmıştır. g-C₃N₄@rGOH için uygulanacak potansiyel aralık ise -1 ila 0 V olarak belirlenmiştir. İlk yapılan elektrokimyasal çalışmadaki oranlar g-C₃N₄@rGOH (15 mg/ 30 mg) olarak belirlenmiş olup (0.5:1 oranından) hazırlanan bu kompozit malzeme üzerinden ölçümlere başlanmıştır.

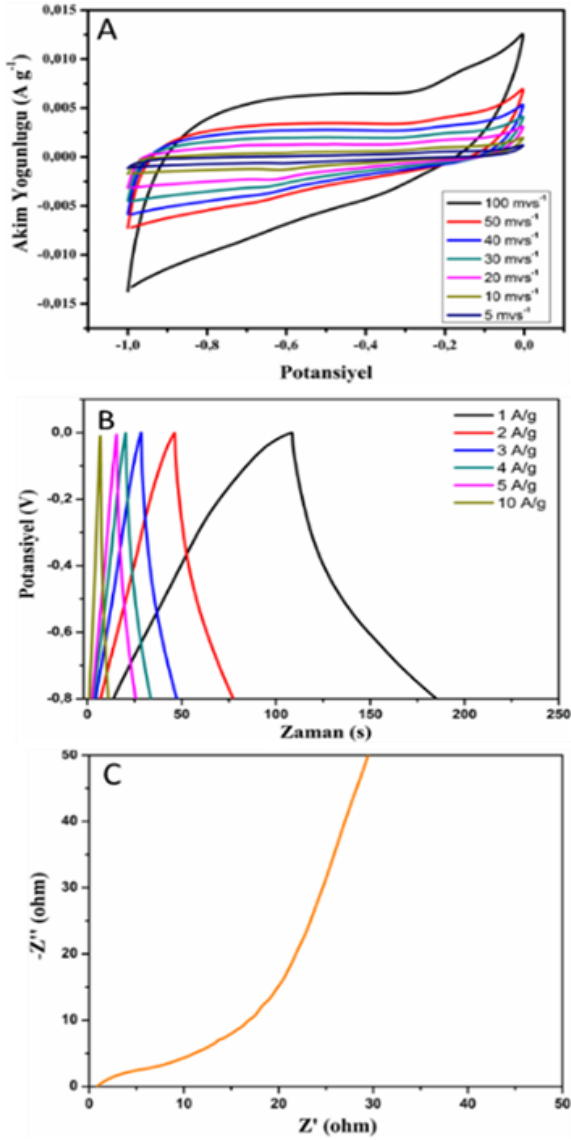
Spesifik kapasitans değerlerini (C_s) hesaplamak için; her tarama hızındaki CV eğrilerinde oluşan alanlar bulunup, Denklem (1) kullanılarak sonuç elde edilmiştir [27]. Burada m, V ve v sırasıyla aktif elektrot malzemesinin toplam ağırlığı, tek elektrot üzerindeki tarama hızı ve voltaj tarama aralığıdır. ∫Idv ise uygulana potansiyel aralığında elde edilen CV alanıdır.

$$C_s = \frac{\int_{v_i}^{v_f} Idv}{mv\Delta v} \quad (1)$$

g-C₃N₄@rGOH elektrotu Şekil 7'de görüldüğü gibi farklı hızda ve farklı akım yoğunluklarında taranmış olup elde edilen en yüksek C_s 5 mvs⁻¹'de 157.4 F/g olarak bulunurken, empedans değeri ise 0.8 ohm ölçülmüştür. Diğer tarama hızlarındaki kapasitans değerleri ise sırasıyla; 140 F/g, 145 F/g, 136.6 F/g, 135 F/g, 134 F/g, 120 F/g olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Farklı oranlarda birleştirilmiş g-C₃N₄@rGOH ve rGOH'ın yüzey ve gözenek boyut dağılımı

Örnek	BET yüzey alanı	Langmuir yüzey alanı	Maksimum gözenek hacmi (p/p ⁰)	BJH Adsorpsiyon ortalama gözenek genişliği (4V/A): (Å)	BJH Desorpsiyon ortalama gözenek genişliği (4V/A) (Å)
rGO	150.86 m ² /g	193.02 m ² /g	0.58 cm ³ /g	227.98	285.43
30/15 mg rGO/gC ₃ N ₄	120.74 m ² /g	154.87 m ² /g	0.32 cm ³ /g	141.87	161.11
30/30 mg rGO/gC ₃ N ₄	94.66 m ² /g	125.13 m ² /g	0.12 cm ³ /g	65.81	73.46



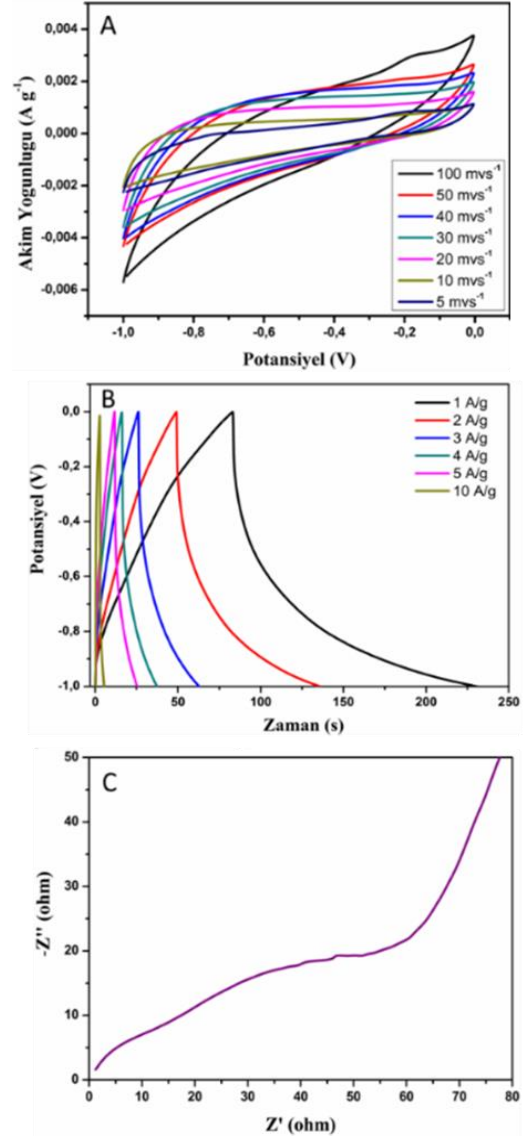
Şekil 7. A) 0.5:1 Oranından hazırlanan g-C₃N₄@rGOH elektrotunun farklı tarama hızlarındaki cv eğrileri, B) Farklı akım yoğunluklarında şarj-deşarj eğrileri, C)Empedans grafiği

1:1 oranında katılan g-C₃N₄@rGOH nanokompozit elektrotunda ise elde edilen CV eğrileri, empedans grafiği ve şarj/deşarj eğrileri Şekil 8’de verilmiştir. Elde edilen en yüksek CS değeri 146.2 F/g olarak bulunmuştur. Empedans değeri ise 1.2 ohm olarak kaydedilmiştir.

Son olarak alınan ölçümlerde ise, g-C₃N₄@rGOH nanokompozitinde g-C₃N₄ miktarını iki katına çıkartarak (60 mg) yapılan elektrokimyasal ölçümlerden elde edilen elektrokimyasal ölçümler Şekil 9’da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Yapılan ölçümler doğrultusunda elde edilen en yüksek C_s de 81.2 olarak bulunmuştur. Bu hibrit yapının empedans değeri de 1.6 ohm olarak ölçülmüştür.

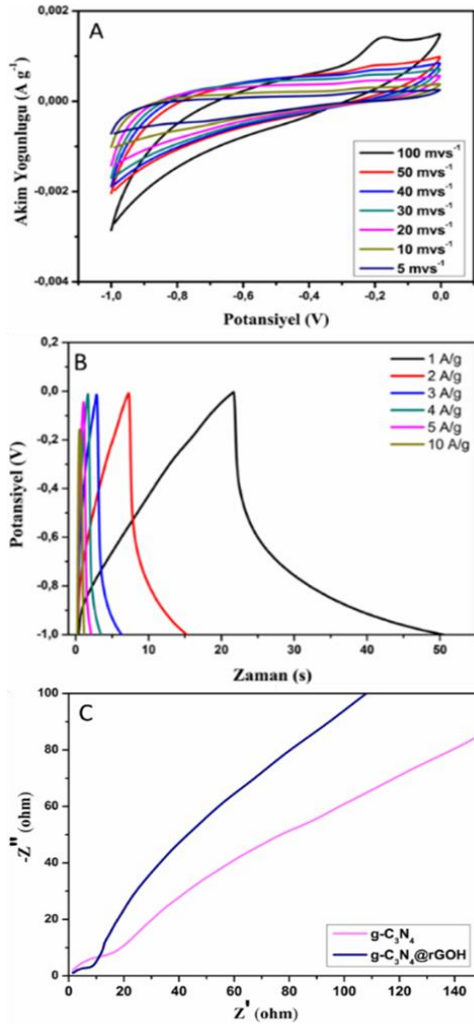
Bu çalışmalar sonucunda, g-C₃N₄@rGOH hibrit yapılarını içeren elektrotların CV eğrileri 5 mVs⁻¹’in üzerindeki artan tarama hızlarıyla genişlemiştir. Bu durum, hibrit yapının daha hızlı şarj/deşarj olduğunu ve geri dönüş

kararlılığını göstermektedir. Yüksek tarama hızlarında, yük dağılımı elektrik alanındaki farkı koruyamadığı için CV eğrisindeki alan azalmış ve daha düşük C_s elde edilmiştir. Ayrıca, g-C₃N₄@rGOH elektrotunun döngü kararlılığı için yapılan çalışmada, en yüksek kapasitans özelliği gösteren 0.5:1 katkılı elektrotun 1000 döngüden sonra % 112 kapasitans tutma eğilimine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10.).

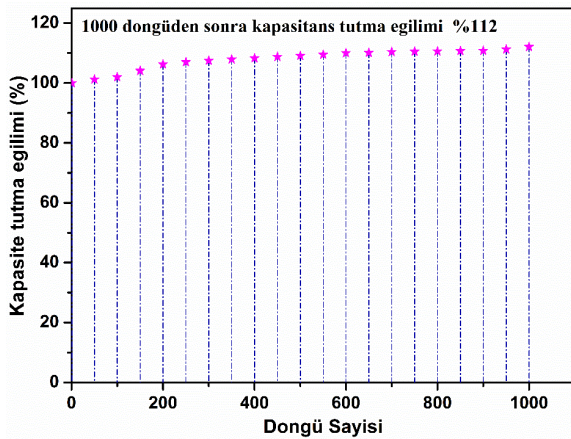


Şekil 8. A) 1:1 Oranından hazırlanan g-C₃N₄@rGOH elektrotunun farklı tarama hızlarındaki cv eğrileri, B) Farklı akım yoğunluklarında şarj-deşarj eğrileri, C)Empedans grafiği

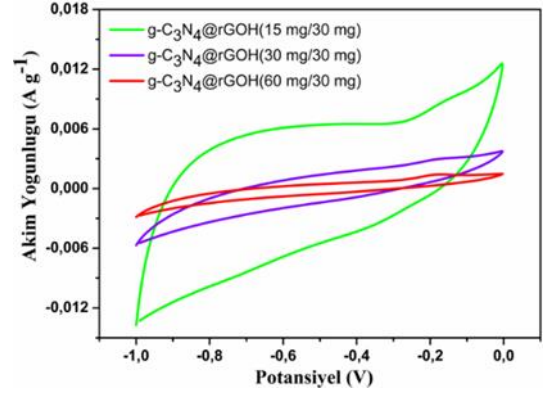
Sonuç olarak, Şekil 11’de elde edilen değerlere bakıldığında, elektrot yüzeyinde oluşan redox potansiyellerindeki azalma sonucunda, nanokompozit malzeme miktarını arttırdıkça kapasitans değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, kompozit nanomalzemenin rGOH üzerindeki yüzey alanını olumsuz yönde etkilemesidir.



Şekil 9. A) 2:1 oranından hazırlanan g-C₃N₄@rGOH elektrotunun farklı tarama hızlarındaki cv eğrileri, B) Farklı akım yoğunluklarında şarj-deşarj eğrileri, c) Empedans grafiği



Şekil 10. 0.5:1 oranında katkılan g-C₃N₄@rGOH elektrotuna ait 1000 döngü içerisinde elde edilen kapasite tutma eğilim grafiği



Şekil 11. Farklı oranlardaki g-C₃N₄@rGOH elektrotunun 100 mV/s tarama hızlarında cv eğrileri

4 Sonuçlar

Düşük maliyetle sentezlenen, iyi bir fizikokimyasal kararlılığa sahip g-C₃N₄ yapısının süperkapasitör çalışmalarında kullanılması ve rGOH ile hibrit bir yapının oluşturulabilmesi için g-C₃N₄@rGOH yapısı termal polimerizasyonu yöntemi ile sentezlenmiştir. g-C₃N₄ yapısının hidrotermal yöntemle rGO katmanları arasına homojen olarak dağılımı başarılı bir şekilde gerçekleştirilerek üç boyutlu hidrojel oluşumu sağlanmıştır. Hibrit yapı üzerinde yapılan elektrokimyasal çalışmalarda, g-C₃N₄@rGOH elektrotunun en yüksek Cs değeri (157.4 F/g), 5 mVs⁻¹ tarama hızlarında tespit edilmiştir. Bu kapasitans değerinin, diğer GO tabanlı hibrit yapılar göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca katkılanan g-C₃N₄ oranı arttıkça, kapasitans değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise, BET analiz sonucundan da görüleceği üzere kompozit malzemedeki g-C₃N₄ miktarının artması rGOH üzerindeki yüzey alanını olumsuz yönde etkilemesidir. Böylelikle elektrot-elektrolit arasındaki temas yüzeyindeki azalış elde edilen spesifik kapasitans değerinde bir düşüşe neden olmuştur. Kısaca bu çalışmada, süperkapasitör performansını artırmak için grafitik karbon nitür / grafen hibrit yapılarının basit bir yöntemle hazırlanışı ve elektrokimyasal ölçümleri üzerine yapılmış çalışmalar sunulmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] N. S. Shaikh, S. B. Ubale, V. J. Mane, J. S. Shaikh, V. C. Lokhande, S. Praserthdam, C. D. Lokhande, P. Kanjanaboos, Novel electrodes for supercapacitor: Conducting polymers, metal oxides, chalcogenides, carbides, nitrides, MXenes, and their composites with graphene. Journal of Alloys and Compounds, 893, 161998, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161998>.
- [2] Y. Zhang, L. Chang, X. Chang, H. Chen, Y. Li, Y. Fan, J. Wang, D. Cui, C. Xue, Combining in-situ sedimentation and carbon-assisted synthesis of Co₃O₄/g-C₃N₄ nanocomposites for improved

- supercapacitor performance. *Diamond and Related Materials*, 111, 108165, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108165>.
- [3] Y. Dahiya, M. Hariram, M. Kumar, A. Jain, D. Sarkar, Modified transition metal chalcogenides for high performance supercapacitors: Current trends and emerging opportunities, *Coordination Chemistry Reviews*, 451, 214265, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214265>.
- [4] P. Liu, Y. Zheng, H. Zhu, T. Li, Mn₂O₃ Hollow Nanotube Arrays on Ni Foam as Efficient Supercapacitors and Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction. *ACS Applied Nano Materials*, 2 (2), 744-749, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01918>.
- [5] Y. Chen, Z. Chen Y. Lin, Y. Hsu, Synthesis of Copper Phosphide Nanotube Arrays as Electrodes for Asymmetric Supercapacitors. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(5), 3863–3870 2017. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b03006>.
- [6] A. K. Yousef, Y. Kim, P. Bhanja, P. Mei, M. Pramanik, M. M. S. Sanad, M. M. Rashad, A. Y. El-Sayed, A. A. Alshehri, Y. G. Alghamdi, K. A. Alzahrani, Y. Ide, J. Lin, Y. Yamauchi, Iron phosphide anchored nanoporous carbon as an efficient electrode for supercapacitors and the oxygen reduction reaction. *RSC Advances*, 9(43), 25240–25247, 2019. <https://doi.org/10.1039/C9RA04326H>.
- [7] S. Nilforoushan, M. Ghiaci, S. M. Hosseini, S. Laurent, R. N. Muller, Selective liquid phase oxidation of ethyl benzene to acetophenone by palladium nanoparticles immobilized on a g-C₃N₄-rGO composite as a recyclable catalyst, *New Journal of Chemistry*, 43(18), 6921-6931, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8NJ06469E>.
- [8] M. Majdoub, Z. Anfar, A. Amedlous, Emerging Chemical Functionalization of g-C₃N₄: Covalent/Noncovalent Modifications and Applications, *American Chemical Society*, 14 (10), 12390–12469, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.0c06116>.
- [9] D. J. Martin, K. Qiu, S. A. Shevlin, A. D. Handoko, X. Chen, Z. Guo, J. Tang, Highly Efficient Photocatalytic H₂ Evolution from Water using Visible Light and Structure-Controlled Graphitic Carbon Nitride, *Angewandte Chemie International Edition*, 53(35), 9240–9245, 2014. <https://doi.org/10.1002/anie.201403375>.
- [10] W. Iqbal, B. Yang, X. Zhao, M. Rauf, M. Waqas, Y. Gong, J. Zhang, Y. Mao, Controllable synthesis of graphitic carbon nitride nanomaterials for solar energy conversion, and environmental remediation: The road travelled and the way forward. *Catalysis Science & Technology*, 8, 4576-4599, 2018. <https://doi.org/10.1039/C8CY01061G>.
- [11] X. Li, J. Zhang, L. Shen, Y. Ma, W. Lei, Q. Cui, G. Zou, Preparation and characterization of graphitic carbon nitride through pyrolysis of melamine, *Applied Physics A*, 94(2):387-392, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4816-4>.
- [12] R. Lin, Z. Li, D. I. Abouelamaiem, B. Zhang, D. Brett, G. He, I. P. Parkin, A general method for boosting the supercapacitor performance of graphitic carbon nitrides/graphene hybrids. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(48), 25545-25554, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7TA09492B>.
- [13] H. Soltani, H. Bahiraei, S. Ghasemi, Effect of electrodeposition time on the super-capacitive performance of electrodeposited MnO₂ on g-C₃N₄ nanosheets, *Journal of Alloys and Compounds*, 904, 163565, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163565>.
- [14] G. Nabi, K. N. Riaz, M. Nazir, W. Raza, M. B. Tahir, M. Rafique, N. Malik, A. Siddiqa, S. S. A. Gillani, M. Rizwan, M. Shakil, M. Tanveer, Cogent synergic effect of TiS₂/g-C₃N₄ composite with enhanced electrochemical performance for supercapacitor, *Ceramics International*, 46, 27601-27607, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.254>.
- [15] B. Sert, Y. Ozay, E. Harputlu, S. Ozdemir, M. S. Yalcin, K. Ocakoglu, N. Dizge, Improvement in performance of g-C₃N₄ nanosheets blended PES ultrafiltration membranes including biological properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 623, 126571, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126571>.
- [16] E. Lökçü, N. Kaçar, M. Çayirli, R. C. Özden, M. Anik, Photoassisted Charging of Li-Ion Oxygen Batteries Using g-C₃N₄/rGO Nanocomposite Photocatalysts, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14, 34583-34592, 2022. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c05607>.
- [17] F. Mindivan, M. Gökteş, Preparation of new PVC composite using green reduced graphene oxide and its effects in thermal and mechanical properties, *Polymer Bulletin*, 77, 1929, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02831-x>.
- [18] H. Ulus, The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: performance evaluating by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and short beam shear (sbs) tests, *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 10, 412-419, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.791161>.
- [19] F. Mindivan, M. Gökteş, Effects of various vitamin C amounts on the green synthesis of reduced graphene oxide, *Materials Testing*, 61, 1007-1011, 2019. <https://doi.org/10.3139/120.111416>.
- [20] H. Ulus, H. B. Kaybal, V. Eskizeybek, A. Avcı. Halloysite nanotube reinforcement endows ameliorated fracture resistance of seawater aged basalt/epoxy composites, *Journal of Composite Materials*, 54, 2761-2779, 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320902821>.
- [21] Q. Ma, B. Liu, X. Han, J. Cui, Y. Zhang, W. He, Ni(OH)₂ anchored on RGO-g-C₃N₄ carbon-based for high-performance ultracapacitor electrode, *Materials*

- Science in Semiconductor Processing, 141, 106433, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106433>.
- [22] Y. Li, H. Zhang, P. Liu, D. Wang, Y. Li, H. Zhao, Cross-Linked g-C₃N₄/rGO Nanocomposites with Tunable Band Structure and Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity, *Small*, 9, 3336-3344, 2013. <https://doi.org/10.1002/sml.201203135>.
- [23] B. Yuan, J. Wei, H. Yao, Z. Jiang, Z. Fang, Z. Chu, Simple synthesis of g-C₃N₄/rGO hybrid catalyst for the photocatalytic degradation of rhodamine B, *Chinese Journal of Catalysis*, 36, 1009- 1016, 2015. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)60844-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)60844-0).
- [24] F. Dong, L. Wu, Y. Sun, M. Fu, Z. Wu, S. C. Lee, Efficient synthesis of polymeric g-C₃N₄ layered materials as novel efficient visible light driven photocatalysts, *Journal of Materials Chemistry*, 21, 15171-15174, 2011. <https://doi.org/10.1039/C1JM12844B>.
- [25] D. Jiang, M. Zheng, Y. You, F. Li, H. Yuan, W. Zhang, L. Ma, W. Shen, β -Ni(OH)₂/ nickel-cobalt layered double hydroxides coupled with fluorine-modified graphene as high-capacitance supercapacitor electrodes with improved cycle life, *Journal of Alloys and Compounds*, 875, 159929, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159929>.
- [26] G. U. Rehman, M. Tahir, P. S. Goh, A. F. Ismail, A. Samavati, A. K. Zulhairun, R. DashtArzhandi, Facile synthesis of GO and g-C₃N₄ nanosheets encapsulated magnetite ternary nanocomposite for superior photocatalytic degradation of phenol, *Environmental Pollution*, 253, 1066-1078, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.013>.
- [27] B.Sert, Grafitik karbon nitrür ve hekzagonal bor nitrür içeren kompozit yapıların hazırlanması; çevre ve enerji uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Türkiye, 2022.





Tek ve çift katmanlı yapay damar konfigürasyonlarının Holzapfel-Gasser-Ogden hiperelastik modeli ile mekanik uyumluluk analizi

Mechanical compatibility analysis of single and double-layer artificial vessel configurations based on the Holzapfel-Gasser-Ogden hyperelastic model

Galip Yılmaz^{1,*} , Emin Uslu² 

^{1,2} Bayburt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Bayburt, Türkiye

Öz

Yaygınlaşan kalp-damar hastalıkları, yapay damarların önemini artırmıştır. Üretim şartları gereği farklı tasarımlar içeren bu damarların, doğal bir mekanik davranış göstermesi gerekmektedir. Üretim öncesi ihtiyaç duyulan analizlerin yapılması için karmaşık ve hiperelastik bir özellik gösteren damar mekaniğini modelleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlar arasından yaygın kullanımı olan Holzapfel-Gasser-Ogden (HGO) hiperelastik modeli bu çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında bir simülasyon ortamı HGO modeliyle hazırlanmış ve literatürdeki verilerle doğruluğu teyit edilmiştir. İlk numune iki katmanlı tipik bir yapıda oluşturulmuştur. Sonraki numunelerde üretimde karşılaşılan farklı yöntemlere dayanan katman konfigürasyonları denenmiştir. İkinci numune için dış katmanın normalden çok ince bir yapıda tasarlandığı durum incelenmiştir. Az bir uyumsuzluk olmasına rağmen kalınlığı azalan dış katmanın damarın mekanik özellikleri üzerinde güçlü bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Üçüncü tip numunede ise dış katmanın geometrik ve malzeme özellikleri bakımından iç katman olarak tasarlandığı bir durum denenmiştir. Mekanik özelliklerinin karmaşık ve uyumsuz olduğu gözlemlenmiştir. Son numune olarak, tek katmanlı bir yapı tasarlanmıştır. Bir miktar uyumsuzluk gösterse de bu numune sadelik açısından avantajlı bulunmuştur. Ayrıca ikinci ve üçüncü numunelerin malzeme parametreleri değişimiyle uyum analizi yapılmıştır. Üçüncü numunenin aksine ikinci numune için dış katman içindeki liflerin malzeme özelliklerinin ayarlanmasıyla kolayca referans numunesinin özelliklerinin yakalanabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sentetik yapay damarlar, Polimer malzemeler, Simülasyon, Damar mekaniği, Biyomalzemeler, HGO hiperelastik modeli

1 Giriş

Avrupa Kardiyoloji Derneği (ESC) verilerine göre modern hayat tarzının etkisiyle özellikle batı toplumlarında başlıca ölüm sebebinin kalp damar (kardiyovasküler) hastalıkları olduğu bildirilmektedir. Son 10 yılda kardiyovasküler hastalıklar Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ölümlerin en az %30'unu oluşturduğu rapor edilmiştir [1,2]. OECD'nin Health at a Glance 2021 yılı raporuna göre ise bu durum maalesef son

Abstract

Widespread cardiovascular diseases have increased the importance of artificial blood vessels. These vessels, which require different designs due to production conditions, should mimic the natural mechanical behavior of native ones. Many studies model vascular mechanics, which show a complex and hyperelastic feature. Among these, the well-known Holzapfel-Gasser-Ogden (HGO) hyperelastic model was used in this study. A simulation environment was created with the HGO model, and the experimental data from the literature confirmed its accuracy. The first sample was formed in a typical two-layer structure. In the following samples, layer configurations based on different methods encountered in production were tried. The case where the outer layer is designed in a very thin structure was examined for the second sample. Although there was a slight mismatch, it was observed that the outer layer, whose thickness decreased, did not have a substantial effect on the mechanical properties of the vessel. In the third type of sample, the outer layer is designed as the inner layer in terms of geometric and material properties is tested. It has been observed that the mechanical properties are complex and incompatible. As the final sample, a single-layer structure was designed. Although it shows some inconsistency, it was found to be advantageous in terms of simplicity. In addition, compatibility analysis was performed by changing the material parameters of the second and third samples. In contrast to the third sample, it has been shown that for the second sample, the properties of the reference sample can be easily captured by adjusting the material properties of the fibers in the outer layer.

Keywords: Artificial blood vessels, Polymer materials, Simulation, Vascular mechanics, Biomaterials, HGO hyperelastic model

yıllarda ülkemizin de içinde olduğu gelişmekte olan ülkelere de sirayet etmektedir [3].

Tedavi için yaygın bir tıbbi prosedür olarak tıkanmış veya daralmış arterler yenileriyle değiştirilmelidir. Burada birinci tercih otogreft transplantasyonu denilen, yani hastanın kendi vücudundan elde edilen damarın genelde hastalığın var olduğu kalp bölgesine aktarılması ile yapılan yöntemdir. Ancak hasta önceki operasyonlar veya yaşlılık sonucunda yeterli kalitedeki bir kan damarına sahip

olmaması durumunda, damarları değiştirmek için yapay greftler kullanılmaktadır [4]. Çeşitli malzeme ve geometrilerde üretilebilen yapay damarların en büyük dezavantajı ise tromboz (pıhtı ile tıkanma) riski nedeniyle düşük iç çap değerlerinde (genellikle 5 mm altında) kolaylıkla kullanılamamasıdır [5]. Fakat özellikle orta ve büyük çaplı damarların değiştirilmesi gerektiğinde, yapay damar greftleri pratik kullanımlarıyla hayat kurtarmaktadır [6].

Doğal damar yaşayan bir organ iken, yapay damarların hali hazırda en sık kullanılan tipi sentetik polimerlerden üretilen biyobozunur olmayan ürünlerdir. Bu ürünlerden biyoyumlu olmasının yanında doğal damarların mekanik özelliklerini taklit etmesi istenmektedir [7]. Burada ilk yaklaşım, doğal damarın mekanik olarak 2 katmanlı yapısını taklit edilmesi üzerine olmalıdır [8]. Ayrıca biyobozunur tiplerin aksine kalıcı malzemelerden elde edilen yapay damarların katman konfigürasyonunun nasıl oluşturulduğunun mekanik olarak önemi olsa da biyolojik olarak yoktur.

Arterler (atar damarlar) kalpten taze oksijenli kanı vücudun geri kalanına taşıyan kan damarlarıdır. Damarın bir kesiti alındığında en içte İntima adı verilen ve akan kanla doğrudan temas halinde bulunan en ince katman yer alır. Bu katmanı en kalın katman olan ve Media olarak adlandırılan ikinci bir katman sarar. Media'nın dışında ise üçüncü ve son katman olan Adventitia yer almaktadır.

Adventitia, kalınlık olarak Media'nın genellikle yarısı kalınlığında ve doku olarak çok daha esnek bir yapıdadır [7]. Fakat düşük basınçlarda pasif olan Adventitia kan basıncının artmasıyla genişlemenin çok olduğu durumlarda içinde barındırdığı liflerin yüksek deformasyonlara direnmesi nedeniyle bir koruyucu ceket görevi görerek damarın yapısal hasarını engeller. Media'nın yapısı Adventitia'ya göre serttir. Ayrıca içindeki lifler damar çevresine göre daha düşük açılarda sarıldığı için her zaman aktif bir görev üstlenmektedir. Adventitia'nın lifleri ise damar çevresinde daha dik bir açıda yer alır ve damar genişledikçe dönerek damarın çevresiyle olan açılarını azaltmakta ve gerinim sertleşmesinin doğru bir oranda artışında çok kritik bir görev üstlenmektedir. Sağlıklı ve genç bir damarda ise en içteki en ince İntima katmanının mekanik bir etkinliği yoktur [9].

Hiperelastik malzeme özelliği gösteren damar yapıları, "toe" bölgesi denilen ve artan basınç ile kolayca genişleyen bir yumuşak karakteristik sergiler. Fakat gerinim arttıkça özellikle Adventitia'nın devreye girmesiyle güçlü bir gerinim sertleşmesi gözlenmektedir [10].

Bu alandaki yapılan çalışmalar birçok hiperelastik malzeme modeli sunmuştur [11]. Bunlar Neo-Hookean modeli ve Mooney-Rivlin modeli olarak adlandırılan gerinim enerjisi yoğunluğu fonksiyonunun sol Cauchy-Green deformasyon tensörünün değişmezlerinden yapıldığı hiperelastik malzeme modelleridir. Bir diğer yaygın kullanılan model ise Ogden modelidir. Bu modelde gerinim enerji yoğunluğu fonksiyonu temel gerilme oranı ile ifade edilir. Bu üç model farklı alanlardaki uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Yazarlarının soy isimleriyle yazılan Holzapfel-Gasser-Ogden (HGO) modeli günümüzde binlerce atf almış bir

makaleyle tanıtılmıştır [10]. En yaygın anizotropik hiperelastik modellerden biri olan bu model, biyomalzemeler, lif takviyeli kauçuklar, plastikler ve kompozitler için uygulanabilmektedir [13]. Esasında HGO modeli, anizotropik arterler için geliştirilmiş ve bu modelde malzeme doğası, bir izotropik matris içine gömülü 2 kolajen lif ailesi kullanılarak temsil edilmektedir [10].

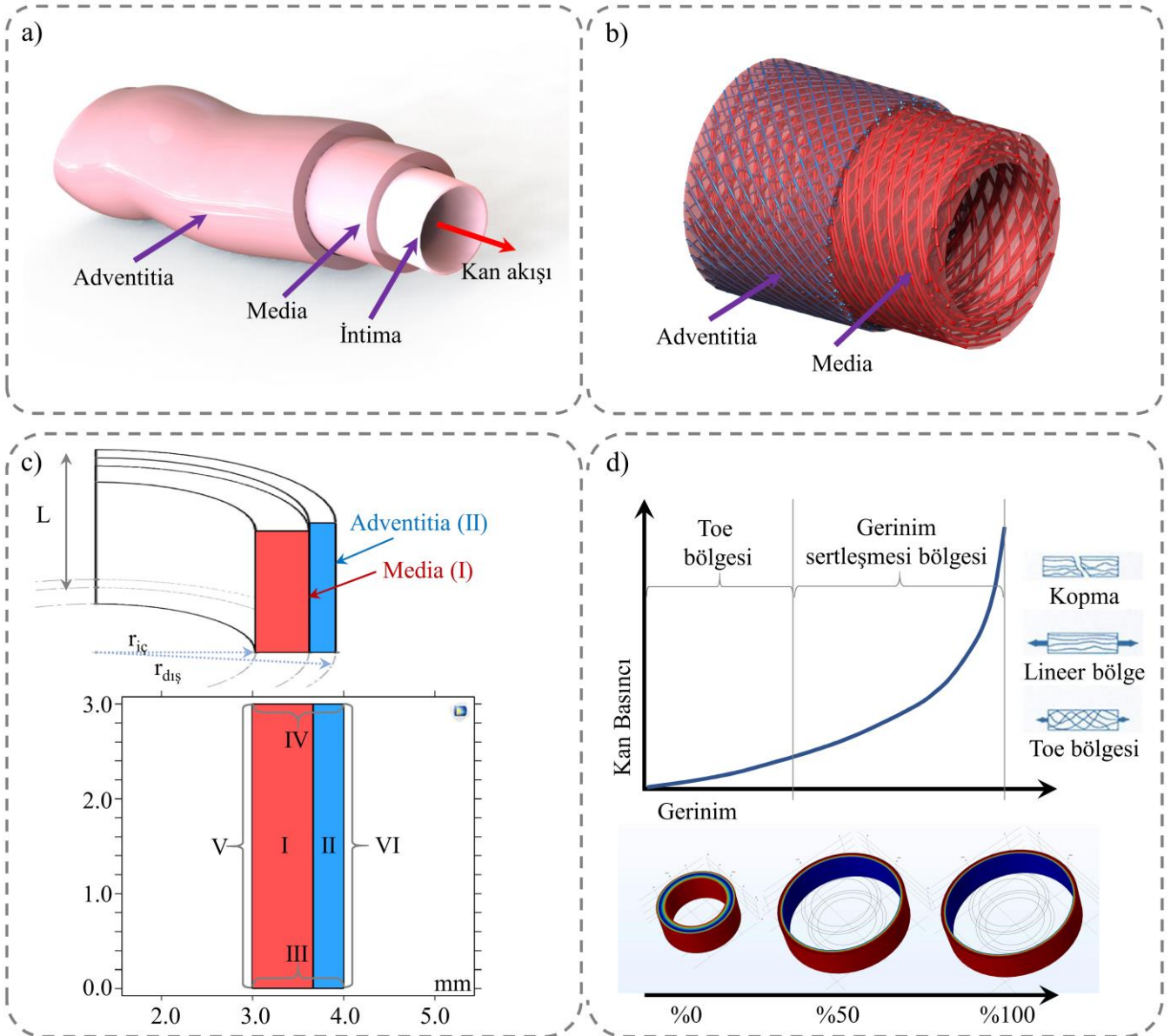
Yapay damarların imalatında çeşitli malzemeler farklı damar uygulamaları için kullanılmaktadır [7,8,14]. Temel tasarım kriterlerinden bir tanesi, mekanik özelliklerin gerçek damarlarla uyumlu olmasıdır. Fakat yapay damar imalatı; aynı zamanda doğru biyolojik fonksiyonların sağlanması, doğru yüzey özelliklerinin elde edilmesi ve güvenilir bir şekilde üretilebilme imkanlarının da içinde olduğu çoklu bir görevler bütünü içerir [7]. Burada özellikle seçilen malzeme tiplerine göre uyumlu mekanik özelliğin sağlanmasının ötesinde çok farklı ihtiyaçlar doğabilir. Örneğin Adventitia katmanı için seçilmiş bir malzemenin kanla teması daha uygun ise, görece ince olan bu tabaka dış yerine iç katmana yerleştirilmek istenebilir. Ya da tam aksine katmanlarının nasıl dizildiğinin ve hatta kaç adet katmana sahip olduğunun vücudun damarla biyolojik uyumu açısından güçlü bir önemi olmayabilir. Değişik konfigürasyonların denendiği durumlar için önemli olan ise makul geometrik sınırlar içerisinde kalarak yapay damarın doğal insan damarının mekanik özelliklerini taklit etmesini sağlamak olacaktır. Fakat literatür incelendiğinde bütün bu bahsedilen farklı üretim yöntemlerini sistematik olarak tek bir çalışmada inceleyen ve mekanik özelliklerini araştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu nedenle bu çalışma kapsamında güçlü HGO malzeme yapısal modeli baz alınarak bir sonlu elemanlar simülasyonu hazırlanmıştır. Doğruluğu literatürdeki datalar ile kontrol edilen bu simülasyon vasıtası ile orta çaplı arterlerin doğal yapısını baz alan bir ana numune tasarlanmıştır. Bu numenin geometrik özelliklerini referans olarak çok ince bir Adventitia durumu, Adventitia'nın dış yerine iç katmanda olma durumu ve son olarak Adventitia'nın tamamen kaldırıldığı tekli Media durumu için toplamda üç numune daha hazırlanarak mekanik özelliklerinin ana numuneye göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca ana numuneden mekanik olarak farklılaşan bazı numuneler için Adventitia'yı oluşturan liflerin özelliklerinin değişimi ile ana numunenin mekanik özelliklerinin tekrar yakalanabileceği de bu çalışmada gösterilmiştir.

2 Metot

2.1 Yapay damar modeli

Şekil 1a'da yapay damarın ana katmanları ve Şekil 1b'de ise iki katmandaki liflerin dizilimi bir CAD paket programı kullanılarak görselleştirilmiştir. Bu katmanlardan kan ile temas halinde en iç katman olan İntima'nın mekanik etkisi çok zayıf olduğundan HGO modelinde bu katmanın varlığı ihmal edilmiştir.



Şekil 1. İki katmanlı damarların yapısal modelinin ve mekanik davranışının şematize görüntüleri; a) doğal yapay damarın ana katmanları b) iki katmandaki liflerin diziliminin bir görseli c) HGO yapısal modeli için iki katmanlı damar modeli ve simülasyon sınır şartları, d) hiperelastik davranış şeması ve simülasyondan elde edilen örnek damar deformasyonları

Ayrıca Şekil 1c'de matematiksel olarak iki katmanlı damar modeli gösterilmiştir. Şekil 1d'de tipik bir hiperelastik davranış bu çalışmanın sonuçlarının analizine yardımcı olması açısından şematize edilmiştir. Bu çalışmada, damar yarıçapının basınç değeri değişimine göre nasıl bir eğilimde olduğunu türevsel olarak izah edebilmek için eksen seçimi yapılmıştır. Yani bağımsız (simülatif) değişken olan basınç, yatay eksen ve buna bağlı olarak damar iç yarıçapı (bağımlı değişken), dikey eksende konumlandırılmıştır.

Bu çalışmada genel kabul görmüş HGO hiperelastik malzeme modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu modelin detayları için orijinal yayın incelenebilir [10]. HGO modeli temelde iki katmanlı anizotropik arterler için geliştirilmiştir. Burada malzeme, bir izotropik matris içine

gömülü 2 kolajen lif ailesi kullanılarak temsil edilmektedir. Bu modelde katman matris değeri bir c katsayısı, içindeki lifler ise k_1 ve k_2 katsayıları ile temsil edilmektedir. Bu sayede her bir katman sadece 3 adet malzeme katsayısı ile modellenebilmektedir. Aşağıda HGO hiperelastik malzeme modelinin temel denklemleri verilmiştir. Denklem (1)'de depolanan toplam gerinim enerjisi formülü gösterilmiştir.

$$W_{toplam} = W_{izo} + W_{anizo} \quad (1)$$

Her bir katmanın izotropik davranışını modellemek için klasik neo-Hookean modeli Denklem (2)'deki gibi kullanılmıştır. Burada c kayma modülünü ifade etmektedir.

$$W_{izo}(I_1) = \frac{c}{2}(I_1 - 3) \quad (2)$$

Yüksek basınçlarda liflerin güçlü gerinim sertleşmesi etkisini temsil etmek için **Denklem (3)**'teki gibi bir üstel fonksiyon kullanılarak gerinim enerjisi fonksiyonu türetilmiştir. Sıfırdan büyük olmak şartıyla k_1 ve k_2 parametreleri liflerin malzeme özelliklerini temsil etmektedir. k_1 daha çok liflerin modülünü temsil ederken birimsiz k_2 ise gerinim sertleşmesi kabiliyetini temsil etmektedir.

$$W_{anizo}(I_4, I_6) = \frac{k_1}{2k_2} \sum_{i=4,6} \{ \exp [k_2(I_i - 1)^2] - 1 \} \quad (3)$$

Denklem (3)'te verilen sabitlerin açıklamaları ise **Denklem (4)**'te gösterilmiştir. Bu denklemlerdeki a_1 ve a_2 , iki lif ailesinin başlangıç yönlerini temsil etmektedir. Burada I_1 Cauchy-Green gerilme tensörünü, I_4 ve I_6 ise lif yönleriyle tensör çarpımlarını temsil etmektedir.

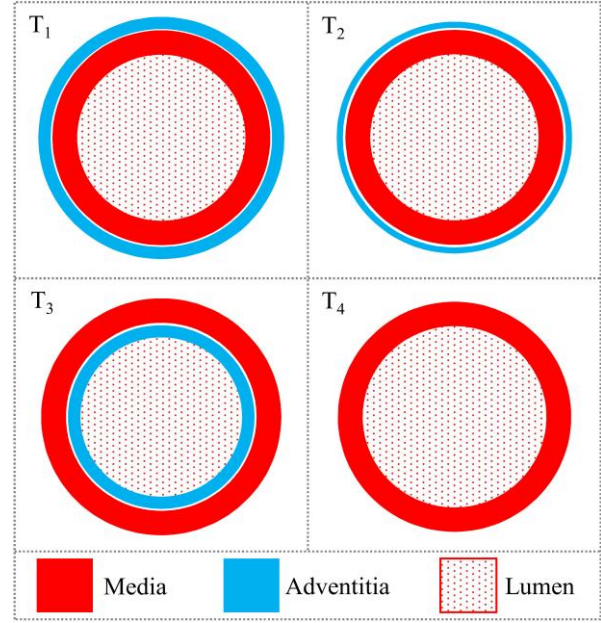
$$I_1 = \text{tr}[C], I_4 = C:(a_1 \otimes a_1) \text{ ve} \quad (4)$$

$$I_6 = C:(a_2 \otimes a_2)$$

2.2 Numune tipleri

Şekil 2'de numune tipleri ve bu numunelere ait ilgili parametreler **Tablo 1**'de gösterilmektedir. **Şekil 2**'deki kırmızı alanlar Media'yı, mavi alanlar Adventitia'yı ve noktalı kırmızı alan Lumen'i göstermektedir. T_1 numunesi orta çap damarlar için 6 mm iç çap ve 1 mm duvar kalınlığıyla temel tipik bir numune [7] olarak dizayn edilmiştir. Bu numune ve ondan türetilen diğer numunelerin malzeme parametreleri ilgili yayından alınmıştır [11]. Lif açıları ise ortalama değerler [10] baz alınarak türetilmiştir. T_2 numunesi ise Adventitia'nın çok ince üretilme ihtiyacı olan durumlar için tasarlanmıştır. Örneğin elektrospinning yöntemiyle üretilen termoplastik poliüretan polimer lifleri literatürde en dış katman olarak uygulanmaktadır [14]. Nano ölçekteki bu lifler dış katmana çok ince bir katman olarak serilmek istenebilir. T_3 numunesi ise Adventitia'nın dış yerine iç katman olarak yerleştirildiği durumlar için tasarlanmıştır. Örneğin literatürde ipek elyafından sert bir iç katmanın yer aldığı durumlarla karşılaşılmaktadır [8]. Son olarak T_4 numunesi görece daha basit bir yaklaşımla tek katmanlı bir yapıyı baz alarak tasarlanmıştır. Burada Adventitia kaldırılmıştır. Literatürde arterlerin tek bir katmanmış gibi HGO modeliyle temsil edildiği durumlar [15] baz alınarak bu numune tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan simülasyon çok fazla parametre içerdiğinden yanlış sonuçlar verme veya yüksek hata paylarına sahip olma riski barındırmaktadır. Bu nedenle tasarlanan numuneler denenmeden önce, oluşturulan simülasyonun doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol etmek gerekmektedir. Literatürde HGO modelinin ilk defa ortaya atıldığı yayından [10] T_0 numunesi için parametreler toplanmıştır. HGO modelinin geliştirildiği yayın tarafından, bu değerleri esasında Prof. Fung'un deneysel çalışmalar içeren ilgili yayınlarından alınmıştır [16,17]. Grafik üzerinden veri elde etme işlemi bir tür Plot Digitizer

programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler Excel programına aktarılmıştır.



Şekil 2. Numune tiplerini gösteren şematik çizimler

Tablo 1. Numunelerin ilgili parametreleri

Parametre adı	Sembolü ve [birimi]	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4
Media'nın kalınlığı	H_M [mm]	0.26	0.67	0.67	0.67	1.00
Adventitia'nın kalınlığı	H_A [mm]	0.13	0.33	0.05	0.33	-
İç yarıçap	r_i [mm]	0.71	3.00	3.00	3.00	3.00
Dış yarıçap	r_o [mm]	1.10	4.00	3.72	4.00	4.00
Damar ilk boy	L [mm]	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Eksenel uzama oranı	λ_z [-]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Media'nın c değeri	c_M [kPa]	3.0	3.8	3.8	3.8	3.8
Media'nın k_1 değeri	k_{1M} [kPa]	2.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Media'nın k_2 değeri	k_{2M} [-]	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4
Media'nın lif açısı	β_M [Deg]	29	33	33	33	33
Adventitia'nın c değeri	c_A [kPa]	0.3	0.4	0.4	0.4	-
Adventitia'nın k_1 değeri	k_{1A} [kPa]	0.6	0.8	0.8	0.8	-
Adventitia'nın k_2 değeri	k_{2A} [-]	0.7	1.0	1.0	1.0	-
Adventitia'nın lif açısı	β_A [Deg]	62	65	65	65	-

2.3 Hata payı hesabı

Karşılaştırılan basınç ve iç yarıçap grafiklerinin birbirlerine ne kadar yakın değerlerde olduklarını hesaplamak için bir enerji formülü kullanılmıştır. Bu formül grafiğin altında kalan alanın damarın hacimsel genişlemesine bağlı enerji depolaması prensibine dayandırılmıştır. Burada referans eğri baz alınarak yüzde hesabı yapılmıştır. Hesaplamalar Excel programında grafiklerin ham verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. **Denklem (5)**'te verilen E (grafiğin integrali) depolanan enerjiyi [18], r_{ort} ortalama yarıçapı, $P_{iç}$ iç basıncı ve L ise damarın uzunluğunu temsil etmektedir.

$$E = (2\pi r_{ort})(\Delta r P_{iç} L) \quad (5)$$

Denklem (6)'da ise enerji farkının yüzde hesabı verilmiştir. Burada E_1 , T_1 numunesinden baz alınan grafiğin integralini temsil ederken E_2 ise diğer numunelerden elde edilen grafiklerin integralini temsil etmektedir.

$$\% \Delta E = 100 \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (6)$$

2.4 Simülasyonun hazırlanması

Bu çalışmada COMSOL Multiphysics 5.5 programı kullanılmıştır. Simülasyon içindeki katı mekanik fiziği ve HGO için geliştirilmiş kütüphane beraber kullanılmıştır. Modelin kurulumu ile ilgili verilen kaynak incelenebilir [19]. Ayrıca geometrinin basitliği nedeniyle 2 boyutlu bir model tercih edilmiştir. Bu sayede daha az mesh kullanarak simülasyon süresinden tasarruf edilmiştir. Şekil 1c'de oluşturulan geometrinin kesiti ve sınır şartları görülmektedir. Media (I) ve Adventitia (II) iki katmanlı silindirik bir tüp olarak modellenmiştir. Model simetrisi, 2B eksenel simetrik modelin kullanımı ile tanımlanmıştır. Simetri sınır koşulu (III), arterin alt ucunun radyal yönde serbestçe genişlemesine izin verir şekilde tanımlanmıştır. Üst yüzeye ise eksenel yöndeki öngörülen yer değiştirmeleri kısıtlayıcı bir sınır koşulu girilmiştir (IV). İç yüzey üzerine (V), kan basıncını temsilen bir basınç sınır yükü tanımlanmıştır. Dış yüzey ise serbest olarak tanımlanmıştır. Bu modeldeki önemli hususlardan biri, kullanıcı tanımlı gerinim enerji fonksiyonunun manuel olarak girilmesiyle HGO malzeme modelinin uygulanmasıdır. İlk lif yönleri, kullanıcı tanımlı değişkenler olarak girilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

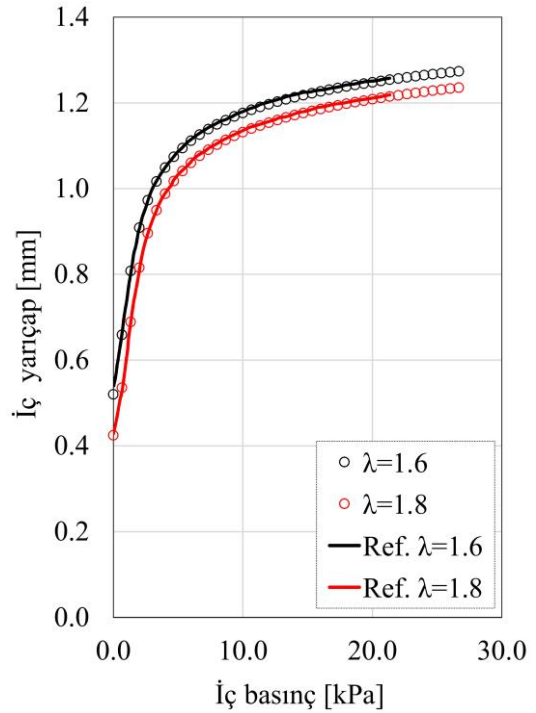
3.1 Kontrol numunesi

Literatürden elde edilen deneysel verilerle oluşturulan T_0 numunesi, malzeme parametreleri bakımından tipik HGO model değerlerini içerirken geometri olarak düşük çapa sahiptir. İç yarıçap 0.71 mm olarak elde edilmiştir. Bütün numuneler için bir ön gerilim yüklemesi kolaylık açısından uygulanmazken iç basınç artışından önce numunelere tipik eksenel bir boy uzama yüklemesi yapılmıştır. 1.6 oranın literatürde sıklıkla kullanıldığı tespit edilmiştir [11]. T_1 'den başlayarak diğer numunelere ise eksenel uzamanın olmadığı 1.0 oranı değeri ve ardından 1.6 ve 1.8 eksenel uzama oranı değerleri uygulanmıştır. Fakat T_0 numunesi için literatürde 1.0 değeri tespit edilemediğinden bu ilk karşılaştırmada istisna olarak sadece 1.6 ve 1.8 değerleri kullanılmıştır.

Şekil 3'te literatürden ve simülasyondan elde edilen veriler birlikte verilmiştir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere bu çalışma için oluşturulan simülasyon numunesi literatür değeri ile örtüşmektedir. Bu durum simülasyonun doğru bir şekilde oluşturulduğu ve hata paylarının minimize edildiği anlamına gelmektedir. Düşük çaplı T_0 numunesinden farklı olarak, T_1 'den T_4 'e kadar bütün numune tipleri için yapay damarların pratikte çok daha sık kullanıldığı orta-çap büyüklüğündeki geometri test edilmiştir.

3.2 Orta-çap yapay damar numuneleri

Orta-çap yapay damar konfigürasyonlarının iç basınç ile yarıçap genişlemeleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4a'da T_1 numunesinin 1.0, 1.6 ve 1.8 eksenel uzama oranı değerlerine göre basınç artışıyla iç yarıçap davranışı görülmektedir. Damar yapısının tipik mekanik davranışı olan "toe" bölgesi [20] düşük basınç değerlerinde ve sonrasında gerinim sertleşmesi ise yüksek basınç değerlerinde saptanmıştır. Şekil 4b, Şekil 4c ve Şekil 4d'de sırasıyla T_2 , T_3 ve T_4 numunelerinin grafikleri görülmektedir. Karşılaştırma kolaylığı açısından bu grafiklere birincil T_1 numunesinin verisi de eklenmiştir.

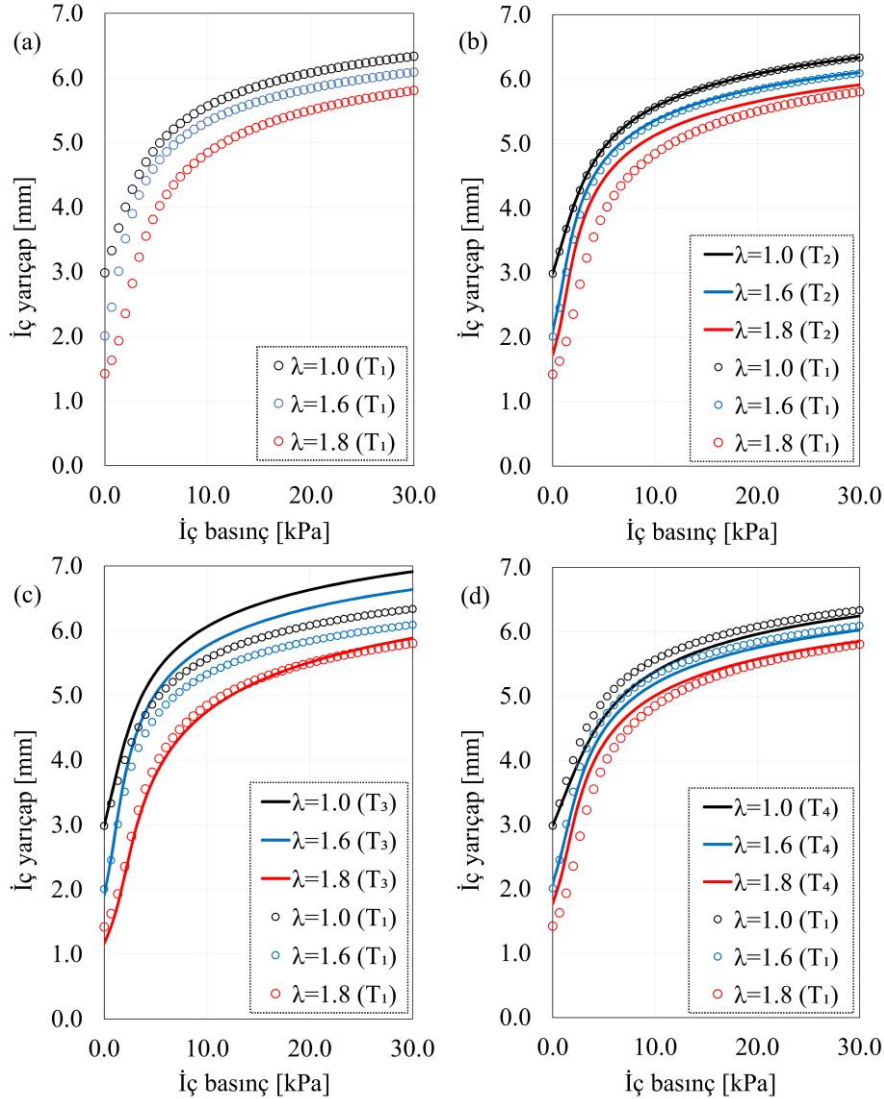


Şekil 3. Simülasyon değerlerinin literatürdeki [11] verileri ile karşılaştırılması

T_2 numunesinin (Şekil 4b) gerinim sertleşmesi değerleri T_1 numunesine göre benzerlik sergilemektedir. Adventitia'nın çok daha ince bir katman halinde oluşturulmasının, yapay damarın mekanik özellikleri açısından ciddi bir yan etkisinin olmadığı ve daha ince üretilse bile literatürde tarif edilen Adventitia'nın esas fonksiyonun [20] korunduğu sonucuna varılabilir. Gözle görülür etki 1.8 eksenel uzama oranı değerinde gerçekleşmiştir. T_2 numunesinden elde edilen sonuç özetlenebilirse; yapay damarlarda Adventitia'nın kalınlığı azaldıkça ve eksenel uzama oranı değeri arttıkça gerinim sertleşmesi gecikmekte ve ancak daha büyük çaplarda etkin olmaktadır. Ayrıca, eksenel uzama oranının artması ince olarak üretilen Adventitia'nın artan boy uzamasıyla daha da incelmeye ve böylece mekanik özelliklere (gerinim sertleşmesi) katkısının tümünden azalmasına sebep olduğu yorumu yapılabilir. Fakat bu davranışın nedeninin detaylı olarak açıklanabilmesi için gelecek dönem çalışmaları yapılmalıdır.

T₃ numunesi, normal şartlarda dışta olan Adventitia'nın içeri ve iç katman olan Media'nın ise dışarı alınmasıyla oluşturulmuştur. Bu numune, literatürdeki [8] ipek örgü gibi lifli yapısı olan ve iç katman olarak tasarlanan numuneleri temsil etmektedir. Şekil 4c'de T₃ numunesinin T₁'e göre mukavemeti görülmektedir. T₃ numunesi T₁ ve T₂'ye göre farklı bir karakter sergilemektedir. Eksenel uzama oranının fazla olduğu durumlar (1.8) için Adventitia'nın içte veya dışta olmasının önemi yok iken, eksenel uzama oranının orta seviyeden başlayarak (1.6) uzamanın olmadığı (1.0) değerine çekilmesi gerinim sertleşmesinin gecikmesine sebep olmuştur. Adventitia'nın kalınlığı aynı kalsa da dış yerine iç katmana yerleştirilmesi, onun çevre uzunluğunu azaltmaktadır. Bu da gerinim sertleşmesine katkıda bulunacak lif sayısının azalması anlamına gelmektedir. Bu azalma ile T₃ numunesinin kendine özgü karakteristiği açıklanabilir. Ayrıca doğal (natif) damarlarda yaşlılıkla kalınlaşan iç katmanın [21] damarın mekanik karakterini T₃ numunesine benzer şekilde değiştirme potansiyeli olduğu yorumu yapılabilir.

T₄ numunesinde ise Adventitia'nın tamamen kaldırılıp, sadece Media'dan oluşan tek katmanlı bir tasarım oluşturulmuştur. T₄ numunesinin iç ve dış çapları T₁ numunesiyle aynı tutulmuştur. Şekil 4d'de T₄ numunesinin T₁'e göre karşılaştırıldığı grafik verilmiştir. T₄ numunesi genel olarak T₁'den çok farklı bir davranış sergilememektedir. Fakat değişen eksenel uzama oranı değerlerine daha az hassasiyet göstererek 1.6 değerine yakın bir bantta gerinim sertleşmesi sergilemiştir. T₄ numunesi tasarımı gereği daha basit bir yapıya sahiptir ve sadeliğinden dolayı tek katmanlı yapay damar tasarımları için tercih edilebilir bir potansiyele sahiptir. Literatürden de görüleceği üzere [22,23,24] özellikle orta-çap damar uygulamalarında çeşitli malzemelerden (Polytetrafluoroethylene, Dacron ve Polylactic acid gibi) üretilen tek katmanlı yapı sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yapının bir dezavantajı ise, kontrol parametre sayısı azaldığı için mekanik özellikleri ayarlamak çift katmanlılara göre daha kısıtlı olmasıdır.



Şekil 4. Numune tiplerinin iç basınç ile yarıçap genişlemeleri; a) T₁ numunesi, b) T₂ numunesi, c) T₃ numunesi ve d) T₄ numunesi

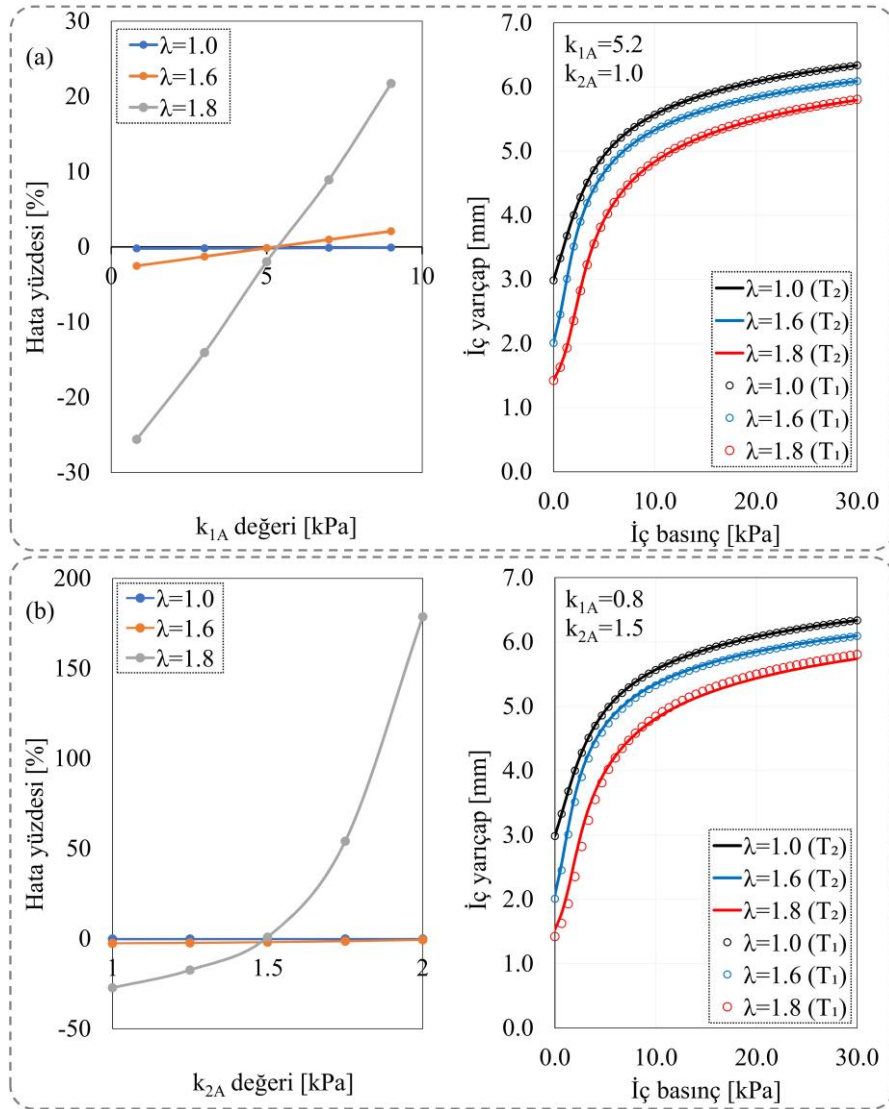
3.3 Optimizasyonlar

Bu bölümde, T_2 ve T_3 numuneleri için model malzeme parametre değişimleri ile referans olan T_1 numunesine yakın bir gerinim sertleşmesi karakteristiği sağlanabilirliği analiz edilmiştir. T_4 numunesi ise görece uyumlu olduğundan analiz dışı bırakılmıştır. Model içerisindeki k_{1A} ve k_{2A} katsayıları, pratikte üretim yöntemini ve malzeme kompozisyonunu değiştirerek rahatlıkla artırılıp azaltılabilir.

T_2 numunesi için literatürdeki Adventitia'nın çok ince olduğu benzer durumlarda da görüldüğü gibi [8], malzeme türünün ve üretim parametrelerinin kontrollü seçimi ile katman içindeki liflerin karakteristiği değiştirilebilir. Şekil 4b'deki grafik tekrar incelendiğinde liflerin uzama sertleşme karakteristiğinin artırılması sonucuna varılabilir. Bu amaçla, k_{1A} ve k_{2A} değerlerinin artırılması denenmiştir. Ayrıca bu işlemin normal aksenal uzama oranı değerinde (1.6)

yakalanan uyumun kaybedilmeden yapılması çok önemlidir. Kolaylık açısından k_{1A} ve k_{2A} değerleri ayrı ayrı kademeli olarak artırılıp Şekil 5'teki grafikler elde edilmiştir.

Şekil 5a'daki hata oranları ve yanlarında sadece k_{1A} ve k_{2A} değişimi ile elde edilen grafikler verilmiştir. Hata yüzdeleri incelendiğinde bütün numuneler için k_{1A} değerinin hata paylarına etkisinin lineer bir ilişkiye sahip olduğu saptanmıştır. Bu etki ayrıca HGO yapısal modeli [10] incelendiğinde de tahmin edilebilir. k_{1A} 'nın Denklem (3)'teki gerinim enerjisini lineer etkilediği görülmektedir. Denklemdaki lineer karakteristik ile simülasyon sonuçlarının doğrudan bağlantısı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca T_2 numunesinde k_{1A} katsayısını artırmakla referans T_1 numunesi ile çok güçlü bir benzerlik yakalanabileceği sonucuna varılmıştır. Fakat Şekil 5a'da görüldüğü üzere 5.2 değerinin üzerindeki artışlar benzerliği bozmaktadır.



Şekil 5. k_{1A} ve k_{2A} değerlerinin farklı aksenal uzama oranı değerleri için basınç iç yarıçap grafiklerine etkileri; a) k_{1A} değeri ve b) k_{2A} değeri ile elde edilen grafikler

k_{2A} parametresinin etkisi ise Şekil 5b’de görülmektedir. k_{1A} parametresinde lineer olan hata yüzdesi k_{2A} için nonlineer olduğu açıkça görülebilir. Bu etkiyi de benzer bir şekilde HGO modeline [10] bakarak anlamak mümkündür. k_{2A} parametresinin bir üstel fonksiyon içinde olduğu görülebilir. k_{1A} ve k_{2A} parametrelerini ayrı ayrı artırmak suretiyle T_2 numunesinin mekanik davranışı T_1 numunesine kolaylıkla çok düşük hata yüzdeleriyle benzeşmiştir. Bu iki parametrenin simultane değiştirilmesi durumu ise gelecek dönem çalışmalarında incelenmelidir.

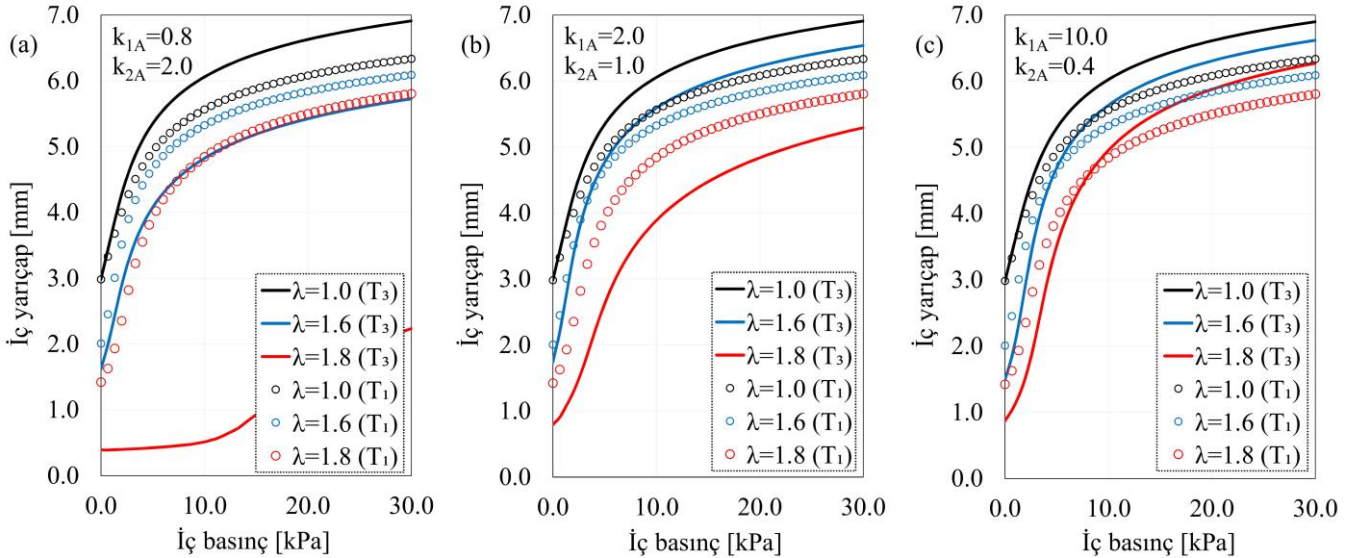
T_2 numunesinde olduğu gibi T_3 numunesi için de k_{1A} ve k_{2A} parametrelerinin artırılması yöntemi denenmiştir. Şekil 6’da T_3 numunesi için deneme yanılma yöntemiyle gerçekleştirilen 3 tip durum gösterilmiştir. Şekil 6a’da ilk olarak k_{1A} parametresi artırıldığında aksel uzama oranının 1.0 ve 1.6 olduğu değerlerin T_1 numunesine göre benzerliğinin arttığı gözlemlenmesine rağmen ilk zamanın 1.8 olduğu durum için bu durum söz konusu değildir. Dolayısıyla sadece k_{1A} parametresinin artırılması T_3 numunesi için geçerli bir çözüm yöntemi değildir. Şekil 6b’de k_{2A} parametresinin tek başına artırılması k_{1A} parametresinde de olduğu gibi olumsuz bir etki oluşturmuştur. Dolayısıyla T_3 numunesinin farklı aksel uzama oranları ile ayrı ayrı T_1 numunesine benzer bir karakter sergilemesi mümkün görünmemektedir.

Son olarak Şekil 6c’de görüldüğü üzere k_{1A} parametresi artırılırken k_{2A} parametresi azaltılarak bu iki parametrenin beraber çalışmasının etkisi denenmiştir. Numunelerin aksel uzama oranlarına göre T_1 numunesinin değerlerine yaklaşmasına rağmen, T_1 numunesinin karakterine yakın bir davranış bulunamamıştır. Dolayısıyla T_3 numunesi için Adventitia içindeki liflerin k_{1A} ve k_{2A} parametrelerinin değiştirilmesi yeterli olmamaktadır sonucuna varılabilir. Bu tip bir numune için ileri dönem detaylı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

4 Sonuçlar

Holzapfel-Gasser-Ogden (HGO) yapısal modeli kullanılarak iki katmanlı bir yapay damar türü için bir simülasyon ortamı oluşturulmuştur. Literatürden elde edilen deney sonuçları ile kurulan simülasyon modelinin doğruluğu ispatlanmıştır. Referans numunesi olan birinci numune bir orta çaplı yapay damar geometrisi ve iki katmanlı bir yapı ile oluşturulmuştur. Ardından literatürde karşılaşılan üç ayrı üretim durumunu baz alan ilave numuneler de oluşturularak toplamda dört ayrı numune elde edilmiştir. İlave üç numunenin ilk numune ile mekanik özellikler bakımından karşılaştırılması sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Dış katmanın inceltilmesinin, damarın mekanik özelliklerine ciddi bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Fakat aksel uzama oranlarının fazla olduğu durumlar için, dış katmanın inceltilmesi gerinim sertleşmesini geciktirmiştir. Bu sorunun çözümü için dış katman içindeki liflerin k_{1A} ve k_{2A} malzeme parametrelerinin ayrı ayrı artırılması başarılı sonuçlar vermiştir.
- Normalde dış katman olan Adventitia’nın, iç katman olarak tasarlandığı durum için genel olarak gerinim sertleşmesinin geciktiği gözlemlenmiştir. Bu numune için k_{1A} ve k_{2A} lif malzemesi parametrelerinin artırılmasının fayda etmediği ve Adventitia’nın iç katman olarak tasarlanmasının damarın mekanik özelliklerini kontrol etmeyi zorlaştırdığı gözlemlenmiştir.
- Çift yerine tek katman kullanımının, damarın genel mekanik özelliklerine ciddi bir etkisi olmamıştır. Tek katmanlı tasarımın tercih edilebilir ve üretimi daha kolay bir tasarım olduğu sonucuna varılmıştır.
- Fakat bu tek katman tercihinin, malzeme parametrelerinin azalması nedeniyle hassas durumlar için damarın mekanik özelliklerinin kontrolünü kısıtlayabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. T_3 numunesinin farklı k_{1A} ve k_{2A} değeri ile T_1 numunesi ile karşılaştırılması; a) k_{2A} değerinin artırılması b) k_{1A} değerinin artırılması ve c) k_{2A} azaltılırken k_{1A} değerinin artırılması durumu

Teşekkür

HGO modelinin simülasyon kurulumu ve kullanımı noktasında yardımlarından dolayı Dr. Li Wang'a teşekkürü bir borç biliriz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %3

Kaynaklar

- [1] D. Mozaffarian, E.J. Benjamin, A.S. Go, D.K. Arnett, M.J. Blaha, M. Cushman, S.R. Das, S. de Ferranti, J.-P. Després and H.J. Fullerton, Executive summary: heart disease and stroke statistics—2016 update. *Circulation*, 133, 447–454, 2016. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000366>
- [2] A. Timmis, P. Vardas, N. Townsend, A. Torbica, H. Katus, D. de Smedt, C.P. Gale, A.P. Maggioni, S. E. Petersen and R. Huculeci, Cardiovascular disease statistics 2021. *European Heart Journal*, 43, 716–799, 2022. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab892>
- [3] OECD Health at a Glance 2021. Health at a Glance, OECD, 2021. ISBN 9789264961012.
- [4] J. Chlupáč, E. Filová and L. Bačáková, Blood vessel replacement: 50 years of development and tissue engineering paradigms in vascular surgery. *Physiological Research*, 58, 119–140, 2009. <https://doi.org/10.33549/physiolres.931918>
- [5] D. Wang, Y. Xu, L. Wang, X. Wang, S. Yan, G. Yılmaz, Q. Li and L.S. Turng, Long-term nitric oxide release for rapid endothelialization in expanded polytetrafluoroethylene small-diameter artificial blood vessel grafts. *Applied Surface Science*, 507, 145028, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145028>
- [6] A. Lichota, E.M. Szewczyk and K. Gwozdziński, Factors affecting the formation and treatment of thrombosis by natural and synthetic compounds. *International Journal of Molecular Sciences* 21, 7975, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijms21217975>
- [7] D. Wang, Y. Xu, Q. Li, and L.S. Turng, Artificial small-diameter blood vessels: materials, fabrication, surface modification, mechanical properties, and bioactive functionalities. *Journal of Materials Chemistry B*, 8, 1801–1822, 2020. <https://doi.org/10.1039/C9TB01849B>
- [8] H.Y. Mi, Y. Jiang, X. Jing, E. Enriquez, H. Li, Q. Li, and L.S. Turng, fabrication of triple-layered vascular grafts composed of silk fibers, polyacrylamide hydrogel, and polyurethane nanofibers with biomimetic mechanical properties. *Materials Science and Engineering: C*, 98, 241–249, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.126>
- [9] M. Loukas, C. Groat, R. Khangura, D.G. Owens and R.H. Anderson, The normal and abnormal anatomy of the coronary arteries. *Clinical Anatomy*, 22, 114–128, 2009. <https://doi.org/10.1002/ca.20761>
- [10] G.A. Holzapfel, T.C. Gasser and R.W. Ogden, A new constitutive framework for arterial wall mechanics and a comparative study of material models. *Journal of Elasticity*, 61, 1–48, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1010835316564>
- [11] G.A. Holzapfel, T.C. Gasser and R.W. Ogden, Comparison of a multi-layer structural model for arterial walls with a fung-type model, and issues of material stability. *Journal of Biomechanical Engineering*, 126, 264–275, 2004. <https://doi.org/10.1115/1.1695572>
- [12] B. Kim, S.B. Lee, J. Lee, S. Cho, H. Park, S. Yeom and S.H. Park, A comparison among neo-hookean model, mooney-rivlin model, and ogden model for chloroprene rubber. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13, 759–764, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0099-y>
- [13] M.R. Mansouri, P.F. Fuchs, J.C. Criscione, B. Schritter and J. Beter, The contribution of mechanical interactions to the constitutive modeling of fiber-reinforced elastomers. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 85, 104081, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104081>
- [14] E. Yu, H.Y. Mi, J. Zhang, J.A. Thomson and L.S. Turng, Development of biomimetic thermoplastic polyurethane/fibroin small-diameter vascular grafts via a novel electrospinning approach. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 106, 985–996, 2018. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36297>
- [15] J.L. Gade, J. Stålhand and C.J. Thore, An in vivo parameter identification method for arteries: numerical validation for the human abdominal aorta. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 22, 426–441, 2019. <https://doi.org/10.1080/10255842.2018.1561878>
- [16] C.J. Chuong and Y.C. Fung, Three-dimensional stress distribution in arteries. *Journal of Biomechanical Engineering*, 105, 268–274, 1983 <https://doi.org/10.1115/1.3138417>
- [17] Y.C. Fung, K. Fronek and P. Patitucci, Pseudoelasticity of arteries and the choice of its mathematical expression. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 237, H620–H631, 1979. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1979.237.5.H620>
- [18] Y. Z. Wang, W. A. Luo, J. W. Huang, C. H. Peng, H. C. Wang, C. H. Yuan, G. R. Chen, B. R. Zeng, L. Z. Dai, Simplification of Hyperelastic Constitutive Model and Finite Element Analysis of Thermoplastic Polyurethane Elastomers. *Macromol. Theory Simul.* 29, 2000009, 2020. <https://doi.org/10.1002/mats.202000009>.
- [19] COMSOL Arterial Wall Mechanics Available online: <https://www.comsol.com/model/arterial-wall-mechanics-14499> (accessed on 25 March 2022).
- [20] J. E. Wagenseil and R. P. Mecham, Vascular extracellular matrix and arterial mechanics. *Physiological Reviews*, 89 (3), 957–989, 2009. <https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2008>
- [21] M. de Lucio et al., On the importance of tunica intima in the aging aorta: a three-layered in silico model for computing wall stresses in abdominal aortic

- aneurysms. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 24 (5), 467–484, 2021. <https://doi.org/10.1080/10255842.2020.1836167>
- [22] D. Wang, Y. Xu, Y.J. Lin, G. Yılmaz, J. Zhang, G. Schmidt, Q. Li, J. A. Thomson, and L-S. Turng, Biologically Functionalized Expanded Polytetrafluoroethylene Blood Vessel Grafts. *Biomacromolecules*, 21(9), 3807-3816, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00897>
- [23] M. Amabili, P. Balasubramanian, G. Ferrari, G. Franchini, F. Giovanniello, and E. Tubaldi, Identification of viscoelastic properties of Dacron aortic grafts subjected to physiological pulsatile flow. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 110, 103804, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103804>
- [24] A. T. İnan ve M. M. Şeker, Elektrospinning yöntemiyle üretilmiş farklı çaplardaki yapay damarların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33 (4), 687-693, 2021. <https://doi.org/10.7240/jeps.993582>

