



GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Gümüşhane University Journal of Science

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ YAYINI

PUBLISHED BY GÜMÜŞHANE UNIVERSITY

ISSN 2146 - 538X

CİLT/VOLUME: 13

SAYI/NUMBER : 4

YIL/YEAR : 2023

$$\text{Arf}(q) = \sum_{i=1}^n q^{(a_i) q(b_i)} \in \mathbb{Z}_2$$

$a_i, b_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$



EBSCO



TÜBİTAK

ULAKBİM
TRIZIN



Sahibi / Owner

Prof. Dr. Halil İbrahim ZEYBEK

Gümüşhane Üniversitesi Adına / *On the behalf of Gümüşhane University*

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Editor in Chief

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI

Baş Editörler / Executive Editors

Doç. Dr. Mehmet Ali GÜCER

Öğr. Gör. Salih TÜRK

Editörler / Editors

Prof. Dr. Ferkan SİPAHİ

Prof. Dr. Enver AKARYALI

Prof. Dr. Selçuk ALEMDAĞ

Prof. Dr. Necati ÇELİK

Prof. Dr. Fatih DÖNER

Prof. Dr. Mehmet MERDAN

Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ

Prof. Dr. Serkan ÖZTÜRK

Prof. Dr. Halil YOLCU

Doç. Dr. Onur ARAZ

Doç. Dr. İlhan ÇELİK

Doç. Dr. Serhat DAĞ

Doç. Dr. Nihan GÜNGÖR

Doç. Dr. Osman KOMUT

Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU

Doç. Dr. Fevzi TOPAL

Doç. Dr. İbrahim TURAN

Dr. Öğr. Üyesi. Bülent AKAR

Dr. Öğr. Üyesi Lale CONA

Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇAKMAK

Dr. Öğr. Üyesi Yasin OĞUZ

Dr. Öğr. Üyesi Samet TONYALI

Dr. Şener ALİYAZICIOĞLU

Dr. İlker ERKAN

Dr. Berna GENÇ

Dr. Şeyda Merve KARATAŞ

Dr. Merve Tuğçe TUNÇ ODABAŞ

Yazım ve Dil Editörü / Layout Editor

Dr. İlker ERKAN

Dergi Sekreteryası / Secretary

Arş. Gör. Kadir SÜNNETCİ

Arş. Gör. Murat ŞAN

Arş. Gör. Ahmet YAVUZDOĞAN

Yayın Türü / Publication Type

Yaygın süreli ve hakemli/ Common term and refereed

Yayın Tarihi / Publication Date

15 / 10 / 2023

Hakemli bir dergi olan Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi üç ayda bir çevrimiçi olarak yayımlanmaktadır. Akademik usullere uygun atıf yapmak suretiyle dergide yapılan çalışmalardan yararlanılabilir. Bu dergide yayımlanan çalışmaların tüm sorumluluğu yazarlara aittir.



Gümüşhane University Journal of Science
Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

Published by Gümüşhane University

Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 4 Yıl/Year: 2023

Üç ayda bir yayımlanır/ Published four times a year

ISSN 2146-538X

Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board

- Prof. Dr. Jose Francisco Gomez Aguilar-Cenidet
Prof. Dr. Vecihi AKSAKAL-Bayburt Üniversitesi
Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Gökhan APAYDIN- Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Zafer ASLAN-Balıkesir Üniversitesi
Prof. Dr. Charyyar Ashryalyev- Bahçeşehir Üniversitesi
Prof. Dr. Fetullah ARIK-Konya Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet ARSLAN-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Abdon ATANGANA-Free State University
Prof. Dr. Hasan BALTAŞ-Recep Tayyip Erdoğan Üni.
Prof. Dr. Bilge BAHAR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Bahri BAYRAM-Atatürk Üniversitesi
Prof. Dr. Fikri BULUT-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Kamil COŞKUNÇELEBİ-Karadeniz Teknik Üni
Prof. Dr. Çetin CÖMERT- Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Günay ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Tufan ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Hüseyin DEMİR-Samsun Üniversitesi
Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN-Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Abdurrahman DOKUZ-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Çiğdem SAYDAM EKER-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Murat EKİNCİ-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Abdelhai ELAZZOZI-Sidi Mohamed Ben Abdellah U.
Prof. Dr. Saffet ERDOĞAN-Harran Üniversitesi
Prof. Dr. Yener EYÜBOĞLU-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Ertan GÖKALP-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Candan GÖKÇEĞLU-Hacettepe Üniversitesi
Prof. Dr. Levent GÜMÜŞEL-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK-Fırat Üniversitesi
Prof. Dr. Zakia HAMMOUCH-Moulay Ismail University
Prof. Dr. Cahit HELVACI-Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Muazzez ÇELİK KARAKAYA-Selçuk Üniversitesi
Prof. Dr. Necati KARAKAYA-Selçuk Üni.
Prof. Dr. Hakan KARSLI-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Elif Çelenk KAYA-Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Abdullah KAYGUSUZ-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Cemal KÖSE-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa KUMRAL-İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Birgül KURAL-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Murat KÜÇÜK-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU-Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Nafiz MADEN-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Halim MUTLU-Ankara Üniversitesi
Prof. Dr. Salim Serkan NAS-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Kolade M. OWOLABI-Federal Uni. of Technology
Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Sunil PROHIT- Rajasthan Technical University
Prof. Dr. Abedallah RABABAH-Jordan Uni. Sci. and Tech.
Prof. Dr. M. Burhan SADIKLAR-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. S. Beyza Ö. SARIKAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Müdahir ÖZGÜL-Atatürk Üniversitesi
Prof. Dr. İsmet SEZER-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Zehra ŞAHİN- Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Selim ŞEN-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet TUTUŞ-Kahramanmaraş Sütçü İmam Üni.
Prof. Dr. Osman ÜÇÜNCÜ-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Coşkun ÜLSER-Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Prof. Dr. Mualla YALÇINKAYA-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Şükrü YETGİN-Gümüşhane Üniversitesi
Prof. Dr. Keewook YI-Korea Basic Science Institute
Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ Karadeniz Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Yong WANG- University of Manchester
Prof. Dr. Emel ABDİOĞLU YAZAR-Karadeniz Teknik Üni.
Prof. Dr. Özcan YİĞİT-Çanakkale 18Mart Üniversitesi
Doç. Dr. Hazan ALKAN AKINCI Artvin Çoruh Üniversitesi
Doç. Dr. Cemalettin BALTACI-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Zafer ÇAKIR-Alaaddin Keykubat Üniversitesi
Doç. Dr. Okay ÇİMEN-Munzur Üniversitesi
Doç. Dr. İbrahim DÜZGÜN-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Aşin Ahmet KAYA-Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Doç. Dr. Ayberk KAYA- Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Doç. Dr. Abdurrahman LERMİ-N. Ömer Halisdemir Üni.
Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI- Karadeniz Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Selami KESLER-Pamukkale Üniversitesi
Doç. Dr. Melih OKÇU-Atatürk Üniversitesi
Doç. Dr. Emre ÖZKOP-Karadeniz Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Birol ŞAHİN- Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Doç. Dr. Uğur ŞİMŞEK-Iğdır Üniversitesi
Doç. Dr. Yener TOP-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Ayhan TOZLUOĞLU-Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Alaaddin VURAL-Ankara Üniversitesi
Doç. Dr. Hilal YILDIZ-Neveşehir Hacı Bektaş Veli Üni.
Doç. Dr. Sefa YALVAÇ-Gümüşhane Üniversitesi
Doç. Dr. Cem YÜCEL-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK-Atatürk Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AŞIK-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hacı Alim BARAN-Batman Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ÇAVUŞOĞLU-Gümüşhane Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Kemal ÇELİK-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet M. KAHRAMAN-İstanbul Teknik Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Selim KAYA-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nurçin KÜÇÜK KENT-Gümüşhane Üni.
Dr. Öğr. Üyesi Kemal KUVVET- Recep Tayyip Erdoğan Üni
Dr. Öğr. Üyesi Zuhale OKCU-Atatürk Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Abdulveli SİRAT-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Nuri URAL-Gümüşhane Üniversitesi
Dr. Ilyas KHAN- Majmaah University
Dr. Rizwan Ul HAQ-Bahria University
Dr. Chokka RAVICHANDRAN-Bharathiar University



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

Iman Abdulqader Younis AL-SARHAN Sedat ÇAM	Antibiotic resistance of Escherichia coli isolates obtained from burn patients <i>Yanık hastalarından elde edilen Escherichia coli izolatlarının antibiyotik direnci</i>	780
Konuralp SİVRİ Kemal KÖSEOĞLU	Olivin esaslı refrakter tuğlanın karakterizasyonu <i>Characterization of olivine based refractory brick</i>	790
Atilla MUTLU	Balıkesir il merkezinde PM₁₀ seviyelerinin COVID-19 pandemi sürecinde analiz edilmesi <i>Analysis of PM10 levels in downtown Balıkesir during the COVID-19 pandemic</i>	810
Yaşar GENEL	Kavak ağacı talaşına borik asit impregnasyon ile elde edilmiş aktif karbon (KB-A) ile sulu çözümlerden ağır metal giderimi <i>Heavy metal removal from aqueous solution with activated carbon (KB-A) obtained by boric acid impregnation on poplar wood sawdust</i>	822
Engin ERÇETİN	Silyon antik kenti stadyum alanındaki olası arkeolojik kalıntıların manyetik, yer radarı ve öz direnç çalışmaları ile araştırılması <i>Investigation of possible archaeological remains in the stadium area of the ancient city of Silyon with magnetic, ground penetrating radar and resistivity studies</i>	840
Gürsel KANSUN Gülçin ÖKMEN	Kaz Dağı civarındaki Kazdağ Masifi metamorfitlelerinin metamorfizma özellikleri, Edremit - Balıkesir <i>Metamorphism characteristics of Kazdağ Massif metamorphites around Kaz Mountain, Edremit - Balıkesir</i>	859
Sinem TAPKI	Cami yapılarının ergonomik açıdan irdelenmesi: Marmara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Cami örneği <i>Examining mosque structures from an ergonomic point of view: the example of Marmara University Theology Faculty Mosque</i>	884
Yaşam KANDEMİR Temel VAROL Mustafa ASLAN	Silah gövdeleri için geliştirilen polimer kompozit malzemeler için çok kriterli karar verme yöntemleri ile doğal takviye malzemesinin seçimi <i>Selection of natural reinforcement material with multi-criteria decision-making methods for polymer composite materials developed for gun bodies</i>	911
Abdullah KARTAL Halil ANAÇ Ali OLGUN	The new numerical solutions of conformable time fractional generalized Burgers equation with proportional delay <i>Oransal gecikmeli uyumlu zaman kesirli mertebeden genelleştirilmiş Burgers denkleminin yeni sayısal çözümleri</i>	927
Sevgi ÖZEN	Kalsine edilmiş zeolit esaslı geopolimerlerin basınç dayanımına mineral katkı olarak çürüfün etkisi <i>The effect of slag as mineral admixture on the compressive strength of calcined zeolite-based geopolymer</i>	939
Mertcan NANE Halil GÖK Ömür AKYAZI Canan AKSOY	Akıllı elektrik sayacı ile enerjinin takip ve kontrolü <i>Tracing and controls of energy with smart electricity meters</i>	949
Ömer ÖZTÜRK Ömür AKYAZI Bora ÇAVDAR	Fotovoltaik sistemlerde gri kurt optimizasyon (gko) algoritması ve artımlı iletkenlik (ai) yönteminin maksimum güç noktası takibi (mgnt) için karşılaştırılması <i>Comparison of grey wolf optimizer (gwo) and incremental conductance (inc) method for maximum power point tracking (mppt) in photovoltaic systems</i>	962
Ertuğrul DEMİRELLİ Halil İbrahim SOLAK İbrahim TIRYAKIOĞLU	Makine öğrenmesi algoritmaları ile deprem katalogları kullanılarak deprem tahmini <i>Earthquake prediction using earthquake catalogs with machine learning algorithm</i>	979

Başak BIYIK Metin Mutlu AYDIN	Dijital sistemler ve nesnelerin interneti tabanlı yeni bir akıllı otopark sistemi: bir kavramsal tasarım <i>A new intelligent parking system based on digital systems and the internet of things (IoT): A conceptual design</i>	990
Cumhur KANBAK Sedat ÖZCANAN Muhammet Vefa AKPINAR Ali Osman ATAHAN	Lif takviyeli beton yol kaplamalarının dinamik yük altındaki yorulma davranışının incelenmesi <i>Investigation of fatigue behavior of fiber reinforced concrete pavements under dynamic load</i>	1009
Duygu ERTÜRKMEN Ahmad Reshad NOORI	Farklı geometrik boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile serbest titreşim analizi <i>Free vibration analysis of curved castellated beams with different geometric web openings by the finite element method</i>	1019
Harun SÜMBÜL	Deneyap kart kullanarak pozisyonel uyku apnesi tespiti ve IoT uygulaması <i>Positional sleep apnea detection and IoT application by using Deneyap card</i>	1033
Vedat AVCİ Murat SUNKAR	Jeomorfik indislerle Varto Havzası'nı (Muş) denetleyen fayların göreceli tektonik aktivitesinin belirlenmesi <i>Determination of relative tectonic activity of faults controlling Varto Basin (Muş) by geomorphic indices</i>	1046
Mahmut SARI	Detection of buried objects with different material properties by ground penetrating radar (GPR) method <i>Farklı malzeme özelliklerine sahip gömülü nesnelerin yer radarı (GPR) yöntemiyle tespit edilmesi</i>	1073
Ahmet Furkan BAYRAM Vasif NABİYEYEV	Derin öğrenme tabanlı saklanan kamufle tankların tespiti: son teknoloji YOLO ağlarının karşılaştırmalı analizi <i>Detection of hidden camouflaged tanks based on deep learning: comparative analysis of state-of-the-art YOLO networks</i>	1082
Özlem POLAT Mustafa Said KARTAL	Derin öğrenme ile pencere ayarlı görüntüler kullanılarak beyin inme segmentasyon performansının geliştirilmesi <i>Improving the performance of brain stroke segmentation using window-adjusted images with deep learning</i>	1094
Selim KARTAL Ahmet Emre DİNÇER	Tarihi çevrede eski-yeni yapı uyumunun 3 boyutlu fraktal analiz yöntemi ile incelenmesi: Safranbolu örneği <i>Examination of old-new building harmony in the historical environment with 3D fractal analysis method: Safranbolu example</i>	1110
S. Yenal VANGÖLÜ Özgü BAYRAK	The effect of boron amount in the electrolyte on the corrosion properties of Ti45Nb coated by PEO <i>Elektrolit içerisindeki bor miktarının PEO ile kaplanan Ti45Nb'nin korozyon özelliklerine etkisi</i>	1127
Bilal ÇOLAK	Determining the optimal reduction ratio in temper rolling in terms of residual stress distribution across thickness <i>Temper haddelemede kalınlık boyunca artık gerilme dağılımı açısından optimum ezme oranının belirlenmesi</i>	1140

Antibiotic resistance of *Escherichia coli* isolates obtained from burn patients

Yanık hastalarından elde edilen Escherichia coli izolatlarının antibiyotik direnci

Iman Abdulqader Younis AL-SARHAN¹ , Sedat ÇAM^{*1} 

¹Harran University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Biology, 63100, Haliliye, Şanlıurfa

• Received: 27.03.2023

• Accepted: 18.07.2023

Abstract

Bacterial resistance to widely used antibiotics is an emerging global health issue and causes a huge problem in burn patients. Despite important developments in antimicrobial treatments, the risk of infection-associated mortality rate in burn patients is comparatively high. *Escherichia coli* is one of the most common causative agents of burn wound infections. Therefore, this study aimed to identify and characterize *E. coli* isolates from burn wounds using the VITEK 2 system and to test their antibiotic resistance to the most commonly used antibiotics with the disc diffusion method. In our study, of 147 clinical samples obtained from burn patients, 25 (%17) were detected as positive for *E. coli*. All these isolates were found to be resistant to cephalothin, cephadrine, piperacillin, and rifampin antibiotics. The resistance to amoxicillin+clavulanic acid and ampicillin was 96% (\pm 8%), which was followed by amikacin and cefotaxime with a 92% (\pm 11%) resistance rate. On the other hand, imipenem (96% \pm 8%), tetracycline (88% \pm 13%), and gentamicin (76% \pm 17%) were the antibiotics that showed the highest sensitivity against *E. coli* isolates. The multidrug-resistant bacteria are one of the main issues for clinical applications, so their characterization is vital in developing a proper treatment strategy. This study concluded that *E. coli* exists in burn wounds and might cause wound infection due to its resistance to different antibiotics.

Keywords: Antibiotic, Burn wound, Identification, VITEK 2

Öz

Yaygın olarak kullanılan antibiyotiklere karşı bakteriyel direnç, gelişmekte olan küresel bir sağlık sorunudur ve yanık hastalarında büyük bir probleme neden olmaktadır. Antimikrobiyal tedavilerdeki önemli gelişmelere rağmen, yanık hastalarında enfeksiyona bağlı ölüm oranı riski nispeten yüksektir. *Escherichia coli*, yanık yaraları enfeksiyonlarının en yaygın etkenlerinden biridir. Bu nedenle bu çalışmada yanık yaralarından *E. coli* izolatlarının VITEK 2 sistemi kullanılarak tanımlanması, karakterize edilmesi ve en sık kullanılan antibiyotiklere karşı antibiyotik dirençlerinin disk difüzyon yöntemi ile test edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmamızda yanık hastalarından alınan 147 klinik örneğin 25'inde (%17) *E. coli* bakterisi saptandı. Tüm bu izolatların sefalotin, sefradin, piperasilin ve rifampin antibiyotiklere dirençli olduğu bulundu. Amoksisilin+klavulanik asit ve ampisiline direnç %96 (\pm %8), bunu %92 (\pm %11) direnç oranıyla amikasin ve sefotaksim izledi. Öte yandan *E. coli* izolatlarına karşı en yüksek duyarlılığı gösteren antibiyotikler ise imipenem (%96 \pm %8), tetrasiklin (%88 \pm %13) ve gentamisin (%76 \pm %17) olmuştur. Çoklu ilaca dirençli bakteriler, klinik uygulamalar için ana konulardan biridir, bu nedenle bunların karakterizasyonu, uygun bir tedavi stratejisi geliştirmede hayati önem taşır. Bu çalışma, *E. coli*'nin yanık yaralarında var olduğunu ve farklı antibiyotiklere direnci nedeniyle yara enfeksiyonuna neden olabileceği sonucuna varmıştır.

Anahtar kelimeler: Antibiyotik, Yanık yarası, Tanımlama, VITEK 2

* Sedat ÇAM; sedatcam@harran.edu.tr

1. Introduction

Bacteria resistant to commonly used antibiotics are becoming a global health crisis for humans, food-producing animals, and the environment worldwide (Levy & Marshall, 2004). The use of inappropriate and excessive broad-spectrum antibiotics is one of the main reasons for this global crisis, and it requires urgent action to stop its spread (Levy & Marshall, 2004; Christaki et al., 2020). Antibiotic overuse can cause bacteria to resist routinely used antibiotics and produce adverse outcomes that can result in death, even in the most specific diseases. The only way to get out of this problematic situation is to determine effective antibiotics against specific pathogens, limiting the use of unneeded antibiotics.

Commensal *E. coli* spp. lives with their human hosts in a mutual benefit manner and does not cause diseases. It may, however, induce disease if the host's immune system is impaired or when the host's natural gastrointestinal barriers are breached, consequently playing a critical role in many infections (Bunduki et al., 2021). Due to its regular nature, *E. coli* is sensitive to many antibiotics currently used. However, *E. coli* spp. can accumulate resistance-associated genes through horizontal gene transfer (Poirel et al., 2018). They can transmit their genetic material via conjugation, transformation, or transduction, allowing genetic material to propagate horizontally in an existing population. Therefore, it has gained resistance to many antibiotics today, and this process is constantly in progress. Broad β -spectrum carbapenemase, 16S rRNA methylases, β -lactamases, plasmid-mediated quinolone resistance, and *E. coli* acquiring *mcr* genes by certain pathways have all been documented as some of the most challenging circumstances (Poirel et al., 2018).

Burns can be defined as skin/organic tissue damage resulting from the contact of heat, temperature, radiation, electricity, and some chemicals with the body. Despite ongoing improvements in patient care, infection-related burn death rates remain incredibly high (Lachiewicz et al., 2017). World Health Organization (WHO) reported that burn incidences and the number of deaths due to burn cases increase yearly. Burn cases have become a global public health threat because of the reporting of approximately 180,000 deaths caused by burns in 2020 (WHO, 2020). Burned areas are relatively vulnerable areas and, therefore, susceptible to infections. The organisms may generate a localized reaction at the burn injury site as well as a systemic response away from the burn injury site, depending on the severity and location of the burn (Moins-Teisserenc et al., 2021; Mulder et al., 2021).

According to Azzopardi et al. (2014), Gram-negative infections are the most prevalent in burn surgery. *E. coli* has been found to have a significant role in infection cases in burn centers (Azzopardi et al., 2014). Clinicians and researchers need to be able to identify these bacterial species in order to select which therapy to use. The risk of infection-associated mortality is high in burn patients (Lachiewicz et al., 2017); therefore, the characterization of *E. coli* in burn wounds is of utmost importance. In clinical settings, treating *E. coli* which has gained multidrug resistance, is extremely difficult (Poirel et al., 2018). Thus, the type of antibiotic that becomes resistant to *E. coli* and the rate of antibiotic resistance/susceptibility of antibiotics will be useful in treating *E. coli* infections in cases of burn injury. As a result, antibiotic overuse and misuse can be reduced by developing new therapeutic strategies. In this instance, the death rate can be reduced while the patient's quality of life can be improved; therefore, the current investigation aimed to identify and characterize *E. coli* isolates from burn patients and test for their resistance/sensitivity against the most commonly used different kinds of antibiotics.

2. Material and method

2.1. Sample collection

A total of 147 samples were obtained from the burn patients, who applied to Azadi and Duhok Burn Hospitals in Duhok between 1/03/2021 and 10/10/2021, collected aseptically using saline-moistened transport swabs and rapidly deposited in sterile containers. The samples were randomly selected from female or male burn patients aged 10 to 70 years old.

2.2. Morphological and biochemical characterization

The initial characterization of the isolates was made based on the colony shape, Gram staining, and biochemical assays (Atlas et al., 1995; MacFaddin, 2000). Samples were cultivated on MacConkey differential

agar media (Lab M, UK) (pH 7.2) and then incubated at 37°C for 24 hours. To distinguish lactose-fermenting (pink) bacteria from non-lactose-fermenting ones, the colonies with pink color and mucous texture were subcultured onto MacConkey agar (colorless) (Holt et al., 1994). After the 24-hour incubation at 37°C, the lactose-fermenting bacteria were re-detected.

2.3. VITEK 2 system for characterization of *E. coli*

VITEK 2 system uses a fluorogenic methodology for the diagnosis of bacterial isolates. This test identifies the microorganisms based on biochemical responses and nutrient use. A sufficient level of growth must be obtained throughout a pre-determined growth period of 18-70 hours to pass the test. It is a reasonably comprehensive approach since it includes 64 biochemical and 20 antimicrobial tests and has been widely used in clinical microbiology laboratories for strain characterization and antimicrobial susceptibility.

VITEK cards (Ref#418590) with 64 wells with nutrients and biochemical tests are employed for testing. To inoculate the card, a microbe solution is prepared. A pattern of positive and negative reactions emerges when the microbe interacts with the card. This pattern is akin to a library that gives the bacterium or yeast a name. *E. coli* strains are also one of the main strains which can be detectable in this system (Espinari et al., 2011).

A pure colony of the isolates was suspended in 3 mL of physiological saline solution to make a standardized inoculum. The bacterial suspension was compared to a standard turbid static solution (Turbidity measurement equipment) to ascertain the company's turbidity supplier. The final concentration within the tube must fluctuate between 0.5 mL and 0.63 mL. The tubes were placed in their appropriate racks. The rack containing tubes and cassette was loaded into the system and positioned in the field of fillers (filler), which automatically filled the cassette with bacterial suspension and signified the procedure's completion. The second field reader received it (reader). As the tube-filled rack travels away from the device, data from each sample is transferred to a computer attached to the VITEK system. Before the results were examined for bacterial detection, the taps were left at 37°C for 24 hours.

2.4. Molecular characterization

2.4.1. DNA isolation

The protocol used by Nessa et al. (2007) was employed for DNA extraction. The bacterial colonies cultivated MacConkey agar overnight was taken in a 1.5 mL tube filled with 200 µL of sterile distilled water. After vortexing for 15 seconds, the mixture was heated at 95°C for 10 minutes; the samples were then chilled directly in ice and the chilled suspension was centrifuged. 150 µL of supernatant was stored for PCR reactions. The quality and quantity of DNA were determined using a NanoDrop (Thermo Scientific, USA).

2.4.2. Polymerase chain reaction (PCR)

PCR reactions were performed using specific F and R primers 5'-AAAACGGCAAGAAAAGCAG-3' and 5'-ACGCGTGGTTACAGTCTTGCG-3'. These primer pairs amplify the *uidA* gene (147 bp) encoding for the enzyme B-glucuronidase found in all *E. coli* spp. (Taha & Yassin, 2019). PCR mixture (25 µL) consisted of hot start premix (Genedirex, Taiwan), template DNA (30-100 ng L⁻¹), primer pairs (10 pmol each), and nuclease-free water with the desired amounts according to the protocol. The initial denaturation was at 95°C for 5 minutes, then followed by 35 cycles of 1 minute at 94°C for denaturation, 1 minute at 58°C for annealing, 1 minute at 72°C for extension, and a final cycle of 5 minutes at 72°C in a 9700 GeneAmp thermal cycler (Applied Biosystem). The amplified products were run in a 2% agarose gel prepared with 1 x Tris-acetate-EDTA buffer and visualized under UV light (Figure 1). The positive control was obtained from the Duhok Research Centre, College of Veterinary Medicine, University of Duhok, Iraq.

2.5. Antibiotic susceptibility test

Kirby-Bauer disk diffusion susceptibility test method was employed to determine the antimicrobial susceptibility of *E. coli* isolates to certain antibiotics listed in Table 1 (Hudzicki, 2009). The samples were suspended in 5 mL of sterile 0.85% sodium chloride and well-shaken. The density of the samples was adjusted based on 0.5 McFarland standards (equivalent to ~1.5 x 10⁸ CFU mL⁻¹). Using a sterile cotton swab, the

bacteria from the suspension were placed on a Mueller-Hinton agar (Difco™) plate together with certain antibiotics at well-spaced points from each other. The antibiotic discs were firmly placed over the plates to ensure contact with the agar. Following 24-hour incubation at 37°C, sensitivity/resistivity was evaluated based on the presence/absence of inhibition zones around the antibiotic disk. The zone diameter was measured and evaluated according to the standard chart of the manufacturer (Ref#418590) based on the US Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI) guidelines.

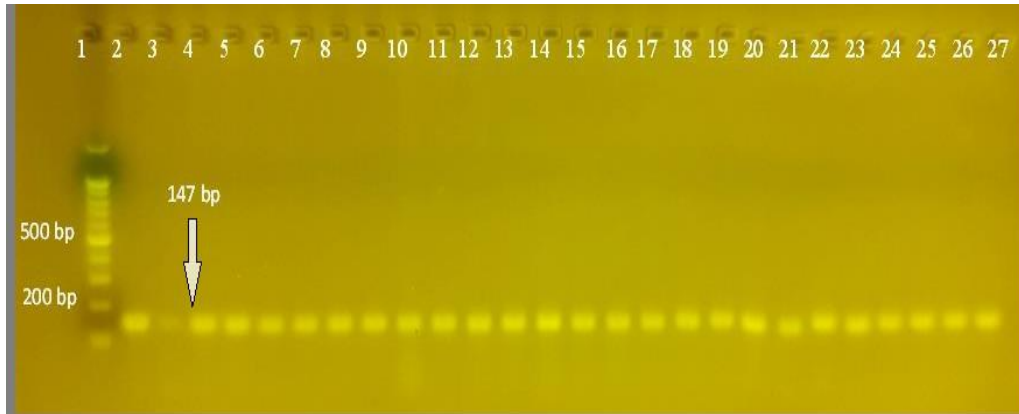


Figure 1. Confirmation of *E. coli* isolates based on *uidA* gene (147 bp). Line 1: 100 kb DNA marker (Addbio, Korea); Line 2-26 samples; Line 27: Positive control

Table 1. Antibiotics used in this study

No.	Antibiotics	Abbreviation	Disc symbol
1.	Amikacin	AK	30
2.	Amoxicillin + Clavulanic acid	AMC	20/10
3.	Ampicillin	AM	25
4.	Cefotaxime	CTX	30
5.	Ceftriaxone	CRO	30
6.	Cephalothin	KF	30
7.	Cephadrine	CE	30
8.	Ciprofloxacin	CIP	5
9.	Doxycycline	DO	30
10.	Gentamicin	GM	10
11.	Imipenem	IPM	10
12.	Piperacillin	PRL	100
13.	Rifampin	RA	30
14.	Sulfamethoxazole + Trimethoprim	SXT	1.25/23.75
15.	Tetracycline	TE	30

2.6. Statistical analysis

The percent confidence interval (CI) of the samples was calculated based on the 95% confidence level by the following formula (Hazra, 2017).

CI = Sample proportion (p) \pm z value \times Standard error of proportion

$$p \pm z \text{ value} \times \sqrt{\left[p \frac{(1-p)}{n} \right]} \quad (1)$$

3. Results and discussion

In the recent decade, Gram-negative bacteria such as *E. coli* have developed resistance against routinely used antibiotics, possibly due to antibiotic misuse. This scenario has practically reached a critical point for patients, mainly burn patients, which can result in various adverse outcomes, including death (Kakoullis et al., 2021). Infection and sepsis are considered the leading causes of death in burn cases (Vinaik et al., 2019). Bacteria can quickly infect and colonize skin wounds. According to current statistics, present antimicrobial therapies are insufficient due to bacterial resistance, necessitating the development of novel treatment approaches (Kakoullis et al., 2021). In addition, the detection of the bacterial species causing the infection and subsequent characterization of the bacteria are necessary for the development of innovative treatment techniques (Lachiewicz et al., 2017; Vinaik et al., 2019); therefore, this study characterized *E. coli* from burn patients and tested their resistance/sensitivity against commonly used antibiotics.

A total of 147 samples were taken from patients of different age groups and gender at two hospitals in Duhok. According to morphological, biochemical, and molecular analyses, of 147 samples, twenty-five (17%) were detected as positive for *E. coli*. The resistance of the *E. coli*-positive samples to 15 commonly used antibiotics was investigated using the disc diffusion method. As a result, all *E. coli* isolates were found to be resistant against cephalothin, cephradine, piperacillin, and rifampin (Table 2). 24 samples (96% \pm 8%) showed resistance against amoxicillin + clavulanic acid and ampicillin, while 23 samples (92% \pm 11%) were found to be resistance against amikacin and cefotaxime antibiotics (Table 2 and Figure 2). On the other hand, imipenem (96% of samples), tetracycline (88% of samples), and gentamicin (76% of samples) were the antibiotics that conferred the highest sensitivity against the isolates tested (Figure 2).

Despite being the first commercially available cephalosporin, the cephalothin antibiotic, often known as cephalothin, is still widely used (Nascimento et al., 2021). All *E. coli* samples in our investigation developed resistance, most likely as a result of its extensive use over many years. According to the study conducted by Raeispour & Ranjbar, (2018), *E. coli* exhibited great resistance to cephalothin. They found that the ratio of cephalothin resistance was 74% in 60 *E. coli* isolates. In another study, this ratio was 76.9-100% (Jung et al., 2021). Furthermore, cephradine, another antibiotic to show high resistance against *E. coli* in our study, is generally used to treat upper respiratory, skin, ear, and urinary tract bacterial infections. Although all cases (100%) showed resistance against cephradine in our study, this ratio was found to be lower (68.7%) in another study conducted on 85 patients with concurrent UTI and diabetes (Shill et al., 2010). This might be explained by the use of different strains isolated from different locations. Conducting complete and detailed studies can help to clarify the different results obtained by the studies.

Antibiotic development processes are known to develop through intrinsic, acquired, and adaptive pathways in general (Lee, 2019). However, horizontal gene transfer of enzymes destroying/modifying antibiotics such as β -lactamases including penicillinases, ESBL, AmpC enzymes, and carbapenemase across bacteria is the most common cause of microbial resistance. Resistance to first-generation cephalosporin antibiotics like cephalothin and cefradine has been found to develop via this mechanism (Bunduki et al., 2021; Jung et al., 2021). Another well-understood process for antibiotic resistance development is mutations in the 23S rRNA, topoisomerase IV, and RNA polymerase β subunit. When antibiotics are given to a bacterial culture, certain bacteria develop antibiotic resistance due to gene mutations, and those that grow resistant over time become the majority species in the community (Christaki et al., 2020; Bunduki et al., 2021).

Piperacillin, a broad-spectrum-lactam antibiotic, has been frequently used with beta-lactamase inhibitors like tazobactam. Piperacillin is classified as an antibiotic of essential importance to human medicine by WHO because it is so effective and widely used. Of 580 *E. coli* samples taken from wastewater treatment plants in South Africa, 246 (42.4%) were shown to have multidrug resistance, including piperacillin (Mbunga et al., 2021). However, all the isolates tested in our work were resistant to piperacillin. This difference might be due to bacterial collection from different sources. Unlike that study, we obtained samples from infected patients. Environmental and clinical samples may respond to the treatments differently. It is well-established that

increased environmental pollution leads to the enhanced selection of antimicrobial-resistant microorganisms because of the co- and/or cross-selection of antibiotic resistance genes (Buelow et al., 2021), which may explain the difference in antibiotic resistance between environmental and clinical isolates. The usage of piperacillin should be re-evaluated in light of our and similar findings to reconsider the areas of use/case and combinations. The resistance of *E. coli* against piperacillin-tazobactam antibiotic was attributed to the extensive amplification of the genes such as the S26-associated *bla*_{TEM-1} gene (Schechter et al., 2018; Hansen et al., 2019). It was suggested that *E. coli* upregulates the respective gene, increasing Bla_{TEM-1} protein levels to overcome the inactivation mechanisms of the piperacillin-tazobactam antibiotics when exposed to their subinhibitory concentrations.

Table 2. Sensitivity or resistance of *E. coli* isolates against different antibiotics

Antibiotics	Amikacin	Amoxicillin + Clavulanic acid	Ampicillin	Cefotaxime	Ceftriaxone	Cephalothin	Cephadrine	Ciprofloxacin	Doxycycline	Gentamicin	Imipenem	Piperacillin	Rifampin	Sulfamethoxazole + Trimethoprim	Tetracycline
A01	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	S	R	R	R	S
A02	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	S	R	R	R	S
A03	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	S	R	R	R	S
A04	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	S	R	R	R	S
A05	S	R	R	R	R	R	S	S	S	S	S	R	R	R	S
A06	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	S	R	R	R	S
A07	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	S	R	R	R	S
A08	R	R	R	R	S	R	R	S	R	R	S	R	R	R	S
A09	S	S	S	R	R	R	R	S	S	R	S	R	R	R	R
A10	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	R	R	S	R
A11	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	R	R	S	R
A12	R	R	R	R	R	R	R	S	R	R	S	R	R	S	S
A13	R	R	R	R	R	R	R	S	R	R	S	R	R	R	S
A14	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	R	R	R	R	S
A15	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	R	R	R	S
A16	R	R	R	R	S	R	R	R	S	S	S	R	R	R	S
A17	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	R	R	R	S
A18	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	R	R	S
A19	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	R	R	R	S
A20	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	R	R	R	S
A21	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	S	R	R	R	S
A22	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	S	R	R	R	S
A23	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	R	R	S
A24	R	R	R	R	S	R	R	R	R	S	S	R	R	R	S
A25	R	R	R	S	R	R	R	R	R	S	S	R	R	R	S
Total (R)	23	24	24	23	22	25	25	15	13	6	1	25	25	22	3
Total (S)	2	1	1	2	3	0	0	10	12	19	24	0	0	3	22

Rifampicin, another antibiotic in our study that had 100% resistance, was developed in 1965 and has been commercially accessible since the late 1960s (Grobbelaar et al., 2019). In bacterial cells, rifampicin inhibits RNA polymerase, halting mRNA production (Hamouche et al., 2021). However, resistance to rifampicin (RIF) is challenging due to the abundance of mutations in the β subunit of RNA polymerases resulting in decreased affinity for rifampicin (Goldstein, 2014). This may lead to misleading results. Especially since RNA polymerase β subunit mutations in *E. coli* are the deciding factors in resistance to rifampicin, it is critical to identify existing mutations and to continue research on this topic (Feklistov et al., 2008; Goldstein, 2014). Excessive usage of β -lactams antibiotics like rifampicin causes *E. coli* to develop resistance to rifampicin. Thus, the usage of agents with rifampicin is still being studied to solve this problem. In this connection, it was reported that using cationic polyurethane with rifampicin simultaneously diminishes *E. coli* resistance by up to 64 times (Tantisuwanno et al., 2021; Verma et al., 2021).

On the other hand, imipenem (96% \pm 8%), tetracycline (88% \pm 13%), and gentamicin (76% \pm 17%) were the antibiotics that showed a high sensitivity against *E. coli* in our investigation. Similarly, in recent works, the imipenem's sensitivity was reported to be 100% (Raeispour & Ranjbar, 2018). This high sensitivity was also confirmed by relatively comprehensive meta-analysis studies conducted from 1991–2015. In this analysis, among 35, 118 cases in total, imipenem with an 86% ratio showed the highest sensitivity against *E. coli* among widely used antibiotics worldwide (Mortazavi-Tabatabaei et al., 2019).

Tetracyclines, which have a broad spectrum of antibiotic action, are commonly used to treat skin conditions like acne, as well as infections of the intestinal, respiratory, and urinary tract. *E. coli* develops resistance to tetracycline by horizontal transfer of the efflux pump-encoding genes, enzymatic degradation genes, or the genes encoding ribosome protective proteins (Berglund et al., 2020). In a study conducted with 128 newborn babies, similar to our results, tetracycline resistance was found in 12% of the samples (Karami et al., 2006). Due to showing high susceptibility against *E. coli*, as supported by our findings, it is still routinely utilized in many infectious disorders. According to Karami et al. (2006), the fact that tetracycline resistance has not decreased in *E. coli* over the last two decades may suggest that the frequent use of tetracycline in human medicine offsets the reduced use of tetracycline in livestock. Excessive use, however, may reduce *E. coli* susceptibility in the future unless controlled.

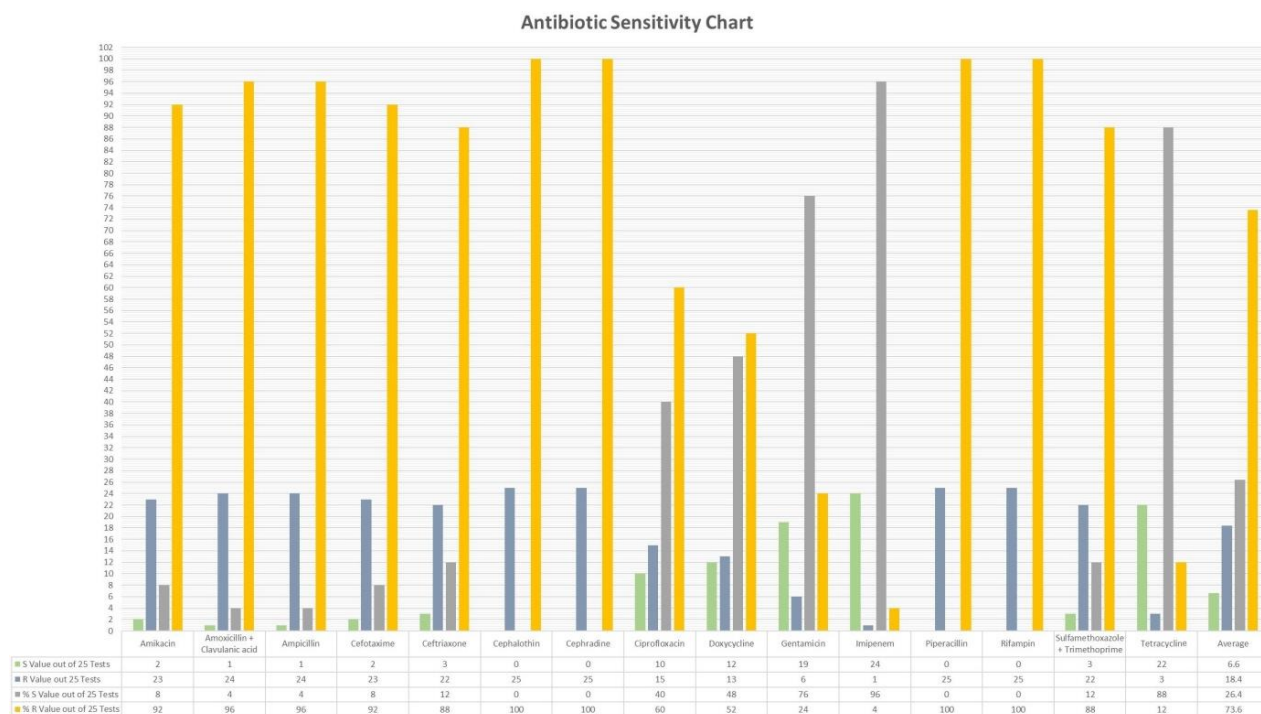


Figure 2. The ratio of the susceptibility/resistance of *E. coli* isolates against widely used antibiotics

Gentamicin has been commercially available for medical use since 1964 and is still on the WHO's List of Essential Medicines. It is commonly used to treat infections caused by a variety of bacteria, primarily *E. coli*. According to our findings, *E. coli* continues to be very susceptible to gentamicin. However, over the years, it

has been observed that this sensitivity is steadily reducing (WHO, 2019). While the rate of resistance against gentamicin was 5.36% in 2014, this rate was determined as 6.7% in 2019. This tendency indicates increasing gentamicin resistance, which in parallels with the data of WHO (Ong et al., 2021).

4. Conclusions

Bacteria resistant to routinely used antibiotics are posing a global health threat to humans. Overuse of antibiotics can result in resistance to commonly used antibiotics and harmful consequences that can lead to death. Although *E. coli* is a beneficial bacterium in its natural habitat, it has been linked to various diseases. Gram-negative infections, such as *E. coli*, are the most common in burn surgery, and their identification is critical for the development of innovative therapeutic options to prevent antibiotic usage and misuse. In our study, *E. coli*-positive samples were found to be the most resistant to cephalothin, cefradine, piperacillin, and rifampin, whereas they were the most sensitive to imipenem, tetracycline, and gentamicin. Our findings appear to be in line with those of previous long-term, comprehensive, and global investigations.

Author contribution

The authors equally contributed to the article.

Declaration of ethical code

Ethical permission was approved by Reserch Ethics Committee from Ministry of Health Duhok Directorate General of Health and Ministry of Higher Education University of Duhok with a reference number (11112020-5-3) on 11th November 2020.

Conflicts of interest

The authors declare no competing interests.

References

- Atlas, R. M., Brown, A. E., & Parks, L. C. (1995). *Laboratory manual of experimental microbiology* (1st ed.). Mosby, St. Louis, USA.
- Azzopardi, E. A., Azzopardi, E., Camilleri, L., Villapalos, J., Boyce, D. E., Dziejwski, P., Dickson, W. A., & Whitaker, I. S. (2014). Gram negative wound infection in hospitalised adult burn patients-systematic review and metanalysis. *PloS One*, 9, e95042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095042>
- Berglund, F., Böhm, M. E., Martinsson, A., Ebmeyer, S., Österlund, T., Johnning, A., Larsson, D. G. J., & Kristiansson, E. (2020). Comprehensive screening of genomic and metagenomic data reveals a large diversity of tetracycline resistance genes. *Microbial Genomics*, 6(11). <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000455>
- Buelow, E., Ploy, M. C., & Dago, C. (2021). Role of pollution on the selection of antibiotic resistance and bacterial pathogens in the environment. *Current Opinion in Microbiology*, 64, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2021.10.005>
- Bunduki, G. K., Heinz, E., Phiri, V. S., Noah, P., Feasey, N., & Musaya, J. (2021). Virulence factors and antimicrobial resistance of uropathogenic *Escherichia coli* (UPEC) isolated from urinary tract infections: A systematic review and meta-analysis. *BMC Infectious Diseases*, 21. <https://doi.org/10.1186/s12879-021-06435-7>
- Christaki, E., Marcou, M., & Tofarides, A. (2020). Antimicrobial resistance in bacteria: Mechanisms, evolution, and persistence. *Journal of Molecular Evolution*, 88, 26-40. <https://doi.org/10.1007/s00239-019-09914-3>
- Espinar, M. J., Rocha, R., Ribeiro, M., Rodrigues, A. G., & Pina-Vaz, C. (2011). Extended-spectrum β -lactamases of *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* screened by the VITEK 2 system. *Journal of Medical Microbiology*, 60, 756-760. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.024075-0>
- Feklistov, A., Mekler, V., Jiang, Q., Westblade, L. F., Irschik, H., Jansen, R., Mustaev, A., Darst, S. A., & Ebright, R. H. (2008). Rifamycins do not function by allosteric modulation of binding of Mg^{2+} to the RNA polymerase active

- center. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 14820-14825. <https://doi.org/10.1073/pnas.0802822105>
- Goldstein, B. P. (2014). Resistance to rifampicin: *The Journal of Antibiotics*, 67, 625-630. <https://doi.org/10.1038/ja.2014.107>
- Grobbelaar, M., Louw, G. E., Sampson, S. L., Van Helden, P. D., Donald, P. R., & Warren, R. M. (2019). Evolution of rifampicin treatment for tuberculosis. *Infection, Genetics and Evolution*, 74, 103937. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2019.103937>
- Hamouche, L., Poljak, L., & Carpousis, A. J. (2021). Ribosomal RNA degradation induced by the bacterial RNA polymerase inhibitor rifampicin. *RNA*, 27, 946-958. <https://doi.org/10.1261/rna.078776.121>
- Hansen, K. H., Andreassen, M. R., Pedersen, M. S., Westh, H., Jelsbak, L., & Schönning, K. (2019). Resistance to piperacillin/tazobactam in *Escherichia coli* resulting from extensive is 26-associated gene amplification of *bla*_{TEM-1}. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 74, 3179-3183. <https://doi.org/10.1093/jac/dkz349>
- Hazra, A. (2017). Using the confidence interval confidently. *Journal of Thoracic Disease*, 9(10), 4125-4130. <https://doi.org/10.21037/jtd.2017.09.14>
- Holt, J. G., Krieg, N. R., Sneath, P. H. A., Staley, J. T., & Williams, S. T. (Eds.). (1994). *Bergey's manual of determinative bacteriology* (9th ed.). Williams and Wilkins, Baltimore.
- Hudzicki, J. (2009). Kirby-Bauer disk diffusion susceptibility test protocol. *American Society for Microbiology*, 15, 55-63.
- Jung, H.-R., Kim, K., & Lee, Y. J. (2021). Comparative analysis of genetic characterization of β -lactam-resistant *Escherichia coli* from bulk tank milk in Korea. *Irish Veterinary Journal*, 74, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13620-021-00203-4>
- Kakoullis, L., Papachristodoulou, E., Chra, P., & Panos, G. (2021). Mechanisms of antibiotic resistance in important gram-positive and gram-negative pathogens and novel antibiotic solutions. *Antibiotics*, 10(4), 415. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10040415>
- Karami, N., Nowrouzian, F., Adlerberth, I., & Wold, A. E. (2006). Tetracycline resistance in *Escherichia coli* and persistence in the infantile colonic microbiota. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 50, 156-161. <https://doi.org/10.1128/AAC.50.1.156-161.2006>
- Lachiewicz, A. M., Hauck, C. G., Weber, D. J., Cairns, B. A., & Van Duin, D. (2017). Bacterial infections after burn injuries: Impact of multidrug resistance. *Clinical Infectious Diseases*, 65, 2130-2136. <https://doi.org/10.1093/cid/cix682>
- Lee, J. H. (2019). Perspectives towards antibiotic resistance: From molecules to population. *Journal of Microbiology*, 57(3), 181-184. <https://doi.org/10.1007/s12275-019-0718-8>
- Levy, S. B., & Marshall, B. (2004). Antibacterial resistance worldwide: Causes, challenges and responses. *Nature Medicine*, 10, 122-129. <https://doi.org/10.1038/nm1145>
- MacFaddin, J. F. (2000). *Biochemical tests for identification of medical bacteria* (3rd Ed.). Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia.
- Mbanga, J., Abia, A. L. K., Amoako, D. G., & Essack, S. Y. (2021). Longitudinal surveillance of antibiotic resistance in *Escherichia coli* and *Enterococcus* spp. from a wastewater treatment plant and its associated waters in Kwazulu-Natal, South Africa. *Microbial Drug Resistance*, 27, 904-918. <https://doi.org/10.1089/mdr.2020.0380>
- Moins-Teisserenc, H., Cordeiro, D. J., Audigier, V., Ressaire, Q., Benyamina, M., Lambert, J., Maki, G., Homyrda, L., Toubert, A., & Legrand, M. (2021). Severe altered immune status after burn injury is associated with bacterial infection and septic shock. *Frontiers in Immunology*, 12, 586195. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.586195>
- Mortazavi-Tabatabaei, S. A. R., Ghaderkhani, J., Nazari, A., Sayehmiri, K., Sayehmiri, F., & Pakzad, I. (2019). Pattern of antibacterial resistance in urinary tract infections: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Preventive Medicine*, 10, 169. https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_419_17

- Mulder, P. P. G., Vlig, M., Boekema, B. K. H. L., Stoop, M. M., Pijpe, A., Van Zuijlen, P. P. M., De Jong, E., Van Cranenbroek, B., Joosten, I., & Koenen, H. J. P. M. (2021). Persistent systemic inflammation in patients with severe burn injury is accompanied by influx of immature neutrophils and shifts in T cell subsets and cytokine profiles. *Frontiers in Immunology*, *11*, 621222. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.621222>
- Nascimento, P. A. D., Kogawa, A. C., & Salgado, H. R. N. (2021). Cephalothin: Review of characteristics, properties, and status of analytical methods. *Journal of AOAC International*, *104*(6), 1593-1608. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/qsaa163>
- Nessa, K., Ahmed, D., Islam, J., Kabir, F. L., & Hossain, M. A. (2007). Usefulness of a multiplex PCR for detection of diarrheagenic *Escherichia coli* in a diagnostic microbiology laboratory setting. *Bangladesh Journal of Medical Microbiology*, *1*, 38-42. <https://doi.org/10.3329/bjmm.v1i2.21506>
- Ong, A., Mahobia, N., Browning, D., Schembri, M., & Somani, B. K. (2021). Trends in antibiotic resistance for over 700,000 *Escherichia coli* positive urinary tract infections over six years (2014–2019) from a university teaching hospital. *Central European Journal of Urology*, *74*(2), 249-254. <https://doi.org/10.5173/cej.2021.0053>
- Poirel, L., Madec, J.-Y., Lupo, A., Schink, A.-K., Kieffer, N., Nordmann, P., & Schwarz, S. (2018). Antimicrobial resistance in *Escherichia coli*. *Microbiology Spectrum*, *6*(4), 6-4. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.ARBA-0026-2017>
- Raeispour, M., & Ranjbar, R. (2018). Antibiotic resistance, virulence factors and genotyping of uropathogenic *Escherichia coli* strains. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, *7*(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13756-018-0411-4>
- Schechter, L. M., Creely, D. P., Garner, C. D., Shortridge, D., Nguyen, H., Chen, L., Hanson, B. M., Sodergren, E., Weinstock, G. M., & Dunne Jr, W. M. (2018). Extensive gene amplification as a mechanism for piperacillin-tazobactam resistance in *Escherichia coli*. *MBio*, *9*(2), e00583-00518. <https://doi.org/10.1128/mBio.00583-18>
- Shill, M. C., Huda, N. H., Moain, F. B., & Karmakar, U. K. (2010). Prevalence of uropathogens in diabetic patients and their corresponding resistance pattern: Results of a survey conducted at diagnostic centers in Dhaka, Bangladesh. *Oman Medical Journal*, *25*(4), 282-285. <https://doi.org/10.5001/omj.2010.82>
- Taha, Z. M., & Yassin, N. A. (2019). Prevalence of diarrheagenic *Escherichia coli* in animal products in Duhok province, Iraq. *Iranian Journal of Veterinary Research*, *20*(4), 255-262.
- Tantisuwanno, C., Dang, F., Bender, K., Spencer, J. D., Jennings, M. E., Barton, H. A., & Joy, A. (2021). Synergism between rifampicin and cationic polyurethanes overcomes intrinsic resistance of *Escherichia coli*. *Biomacromolecules*, *22*(7), 2910-2920. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00306>
- Verma, T., Annappa, H., Singh, S., Umapathy, S., & Nandi, D. (2021). Profiling antibiotic resistance in *Escherichia coli* strains displaying differential antibiotic susceptibilities using Raman spectroscopy. *Journal of Biophotonics*, *14*(1), e202000231. <https://doi.org/10.1002/jbio.202000231>
- Vinaik, R., Barayan, D., Shahrokhi, S., & Jeschke, M. G. (2019). Management and prevention of drug resistant infections in burn patients. *Expert review of Anti-Infective Therapy*, *17*(8), 607-619. <https://doi.org/10.1080/14787210.2019.1648208>

Olivin esaslı refrakter tuğlanın karakterizasyonu

Characterization of olivine based refractory brick

Konuralp SIVRİ *¹ , Kemal KÖSEOĞLU ² 

¹ Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 35100, İzmir

² Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, Seramik. Cam ve Çinicilik Bölümü, 35100, İzmir

• Geliş tarihi / Received: 21.09.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 25.07.2023

Öz

Bu çalışmada öğütülmüş olivin kumu ve kil kullanılarak yarı yaş presleme yöntemiyle refrakter tuğla üretilmiştir. Üretilen tuğlalar farklı sıcaklıklarda sinterlenmiştir ve sinterleme için en uygun sıcaklığın 1350 °C olduğu tespit edilmiştir. Mekanik dayanımları da test edilen tuğlaların su emme değerlerine bakılmıştır. Farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip tuğlalardan en iyi özellikleri sergileyen malzeme üzerinde içyapı incelemeleri yapılmıştır. Ege Bölgesi'ne ait hammadde kullanılarak üretilen ve yüksek sıcaklıklarda da kullanılabilir bir malzeme olarak çeşitli alanlarda uygulanabilmesi için tuğlada yapılacak modifikasyonlara yol göstermesi amacıyla böyle bir temel çalışma yapılmıştır. Elde edilen malzemeye en yakın ticari ürün forsterit tuğlalardır. Forsterit tuğlanın 2,55-2,70 g/cm³ aralığındaki bulk yoğunluk, %18-24 aralığındaki açık porozite ve 50 MPa mekanik dayanım değerlerine benzer özellikler gösteren malzeme elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dayanım, İçyapı, Kil, Olivin, Refrakter tuğla

Abstract

In this study, refractory bricks were produced with semi dry pressing method using grinded olivine sand and clay. The produced bricks were sintered at different temperatures and the optimum sintering temperature was determined as 1350 °C. The water absorption values of the bricks were also tested. Microstructure examinations were carried out on the materials which exhibited the best mechanical and physical properties. Such a basic study has been carried out in order to guide the modifications that to be made in brick composition for applying in various areas as a material which can be used at high temperatures produced using raw materials that belong to Aegean Region. Material, which has lower density value than forsterite bricks and provides their mechanical strength, has been produced. Forsterite bricks are the closest commercial product to obtained olivine brick. A material showing similar properties to forsterite brick with bulk density between 2.55-2.70 g/cm³, apparent porosity between 18-24% and mechanical strength of 50 MPa was obtained.

Keywords: Strength, Microstructure, Clay, Olivine, Refractory brick

* Konuralp SIVRİ; konuralpsivri@gmail.com

1. Giriş

1. Introduction

Orthorombik sisteminde kristalleşen olivin grubu mineraller esas olarak Mg^{+2} ve Fe^{+2} silikatlardan oluşur ve orto-silikat grubunda yer alırlar. Mg^{+2} ve Fe^{+2} iyonlarının baskın olduğu uç mineraller Mg_2SiO_4 (Forsterit) ve $FeSiO_4$ (Fayalit) olarak isimlendirilmişlerdir. Olivin söz konusu olduğu zaman doğrudan forsterit ve fayalit akla gelmektedir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, t.y.). Olivinin mineral yapısının yaklaşık %95'i forsterit diğer kısmı ise fayalittir. Renkleri genellikle zeytin yeşilidir. Ancak bu renkler bazen sarı-yeşilden açık yeşile kadar, demirce zengin örneklerde yeşilden kahverengine kadar değişebilir. 6,5-7 Moh's sertliğe sahiptir (Erkan, 2011). Olivin madeni bünyesinde serbest silis ihtiva etmez ve alternatifi olan diğer madenlere göre ekonomiktir (Erkrom, t.y.).

Fayalit, yapısındaki demir oksit nedeniyle içerikte artış gösterdiği zaman denge diyagramında likidüs eğrisini düşük sıcaklıklara çekmektedir. Olivin içerisinde fayalitin baskın olması durumunda 1200-1300 °C arasına kadar düşmektedir (Güney, 2008). Bunun sebebi forsterit fazının erime sıcaklığının 1850-1900 °C, fayalit fazının erime sıcaklığının ise 1205 °C olmasıdır (Brosnan, 2004). Forsteritin özellikleri bazik ürünlere benzerdir ancak $MgO - FeO - SiO_2$ sisteminde üçlü ötektik 1250 °C sıcaklığında meydana gelir, bu yüzden forsterit tuğlalar hematite (Fe_2O_3) ve bazik cürüflara karşı hassastırlar. Bunlar demir dışı metallerin üretildiği fırınlarda, çimento döner fırınlarında ve cam fırınlarında kafes tuğlası olarak sınırlı bir şekilde kullanılabilirler (Gasparik, 2014).

Olivinin ana bileşeni olan forsteriti yalıtım malzemesi üretmede kullanmak amacıyla farklı sentetik malzemelerle harmanladıktan sonra sinterleyip karakterize eden çalışmalarda, forsterit içeriği yüksek olivinlerin, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri olumlu yönde etkilediği görülmüştür (Ramezani v.d., 2018). Yüksek forsterit içeren olivinler, beton agregası olarak kullanıldığında dayanım artışı sağlamıştır ve termal gerilmelere karşı direnç göstermiştir (Kılınçarslan v.d., 2010). Olivin kumunun yarı yaş toz olarak preslerde şekillendirilmesi ile düşük geçirgenliğe sahip sıvı metal penetrasyonunu engelleyen malzeme üretilmiştir (Tsigler & Ye Pindrik, 1961). Olivinin sıvı penetrasyonuna dirençli bu yapısı, ergimiş periklasların veya diğer sentetik maddelerin yerine kullanımını mümkün kılmıştır (Miller, 1961).

Sanayide kullanılan olivinlerde MgO miktarının % 46'nın üzerinde, toplam demir oksitlerin miktarının da % 7-8'den fazla olmaması istenmektedir (Erkrom, t.y.). Döküm sanayisinde öğütülerek veya ince tane boyutlarına getirilerek döküm kumu (Davis, 1977), EBT dolgu kumu (Örgün & Erarslan, 2012), refrakter sektöründe refrakter harç kumu (ORE-MET, t.y.), tandiş destek kumu (Dakduklu, t.y.), demir-çelik sanayisinde cüruf düzenleyici kum olarak kullanılmaktadır (Dudolph Mining, t.y.). Türkiye olivin bakımından zengin rezervlere sahiptir. Ancak etüt eksikliği, yatırım yapılmaması veya pazar bulunamayışı gibi sebeplerle üretimde veya kullanımda yeterince değerlendirilemediğimiz minerallerdendir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2007).

Refrakter malzemeler; seramik, cam, çimento gibi metalik olmayan anorganik malzemeler grubuna girer. Demir-çelik sanayisi, demir dışı metaller sanayisi, çimento sanayisi, seramik ve kimya sanayisi gibi temel sanayi kollarının en önemli yan girdisi refrakter malzemelerdir. Üretim proseslerinde fırın tipi, üretim teknolojisi ve üretim cinsine göre ve her değişen proses, farklı yapı ve özelliklerde refrakter kullanılması gerekir. Bu nedenle geniş bir ürün yelpazesinde refrakter malzemeler üretilmektedir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001). Refrakter tuğla malzeme olarak kullanım yerine göre farklı seramik oksit tabanlı tuğlalar bulunmaktadır. Silika, yüksek alüminalı tuğlalar, alümina silikat, magnezit, krom magnezit, kromit, dolomit, silisyum karbür, grafit, forsterit tuğla gibi tuğlalar buna örnek verilebilir. Genelde sıcak preslerde üretilen bu tuğlalar doğrudan tek faz yapısına veya iki oksidin oluşturduğu fazlara sahiptir. Refrakter tuğla hammaddesi olma özelliği gösteren yüksek sıcaklığa dayanıklı hammaddelere modifikasyon amaçlı katılan katkıları ile refrakterlik özellikleri azalabilmekte ancak fiziksel ve mekanik değerleri artabilmektedir. Silika gibi tuğlalar $1,8 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk ve %15 civarı görünür porozite ile hafif tuğla kategorisine girerken, krom ve krom magnezit gibi tuğlalar 3 g/cm^3 yoğunluk %17-26 arası görünür porozite oranıyla yoğun tuğlalar olarak kabul edilmektedir. Alümina ve magnezit içerikli tuğlalarda $3,2 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa kadar değerler görülmektedir. Alümina tuğlalarda alümina içeriğine göre porozite oranı %13-22 arasında değişmektedir. Magnezit tuğlalarda da magnezit oranına göre %16-20 arasında porozite bulunur (Surendranathan, 2015). Farklı reçete ve pişme sıcaklıklarıyla üretilen malzemelerin testlerinde çeşitli metodlar kullanılmaktadır.

Hammadde ve bağlayıcıya uygun şekilde ve uygun şekillendirme suyu miktarıyla oluşturulan üretim yöntemleri ile seramik bünyesinin optimum özelliklere kavuşması sağlanır. Bu optimum özellikler birkaç özelliğin bir araya gelmesiyle oluşur. Seramikler için fiziksel ve mekanik özelliklerin yanında sinterlenme veya kullanım sıcaklığı da önem arz eder. Pişirilme sırasında farklı malzemeler farklı davranışlar sergiler ve bu pişirim sırasında meydana gelen değişimler malzemenin özelliklerine doğrudan etki eder. Yapılan çalışmalarda tuğladaki pişirme hızının fazla bir etkisi gözlemlenmezken, içerikteki şekillendirme suyu oranının büyük farklılıklara yol açtığı ortaya çıkmıştır (Görhan & Çelik, 2013).

Mevcut çalışma içeriğinde sadece kırma işlemine tabi tutulmuş hiçbir zenginleştirme işlemi uygulanmamış olivin hammaddesi ile üretim denemesi yapılarak yüksek sıcaklığa dayanımlı tuğla malzeme elde edilmesi hedeflenmiştir. Üretilen tuğlanın içyapısı, mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Elde edilen malzemenin mevcut refrakter malzemelerin alternatifi olarak kullanımına ve araştırmaya geliştirmeye yönelik çalışmalarda referans malzeme olarak literatürde yer alması amaçlanmıştır. Köyceğiz bölgesinde bulunan olivinin doğrudan yeni bir malzeme geliştirilmesinde hammadde olarak kullanımına yönelik hiçbir çalışma yapılmamıştır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

Çalışmada kapsamında ilk olarak, kullanılan olivin hammaddesinin karakterizasyonu yapılmıştır. Olivinin kimyasal içeriği, mikroyapısı, mikroyapısındaki elementel dağılım, faz yapısı ve termogravimetrik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra kimyasal içeriği verilen kilin farklı oranlarda kullanılmasıyla oluşturulan reçetelerle tuğla malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim yöntemi tüm reçeteler için aynıdır. Üretilen tuğlaların iki farklı aşamada su emme, porozite, yoğunluk gibi fiziksel özellikleri ve mukavemetleri de belirli standartlar doğrultusunda test edilmiştir. Ayrıca tuğlaların kuruma ve pişme sonrası boyut değişimleri ve ağırlık kayıpları da hesaplanmıştır. Göreceli olarak en iyi özellikleri sergileyen tuğla bünyesindeki elementel dağılım, sinterleme sonrası mikroyapısı ve faz içeriği analiz edilmiştir. Elde edilen ürünün fiziksel ve mekanik özellikleri farklı ürünlerin özellikleriyle karşılaştırılmıştır.

2.1. Olivin ve kil

2.1. Olivine and clay

Bu çalışmada kullanılan Köyceğiz bölgesine ait olivin EGAMİN Mineral'den temin edilmiştir. EGAMİN Mineral tarafından SGS Supervise Gözetme Etüd Kontrol Servisleri A.Ş'ye yaptırılan ve çalışma kapsamında paylaşılan XRF sonuçları doğrultusunda olivinin kimyasal içeriği Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Üretimde kullanılan olivinin üreticiye ait XRF sonuçları

Table 1. XRF results of olivine which was given by producer

Bileşen	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	KK
%	46.94	40.37	8.45	1.26	1.29	0.81

Tuğla refrakter üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan Ukrayna kili EGE SERAMİK tarafından temin edilmiş olup kile ait kimyasal içerik doğrudan buradan alınmıştır. Ukrayna kili karışık tabakalı yapısından dolayı plastisitesi bakımından diğer killere göre daha iyi olduğu için bu seçim yapılmıştır (Sazcı, 2001). Tüvenan halde temin edilen bu kil 1-2 cm tane boyutlarına kadar kırılarak işleme sokulmaktadır. Yer ve duvar karosu üretiminde de büyük ölçüde tercih edilen bu kile ait kimyasal içerik Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Üretimde kullanılan kilin EGE SERAMİK tarafından verilen kimyasal içeriği

Table 2. Chemical composition of clay which was given by EGE SERAMİK

Bileşen	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	KK
Kütlece %	0.70	56.46	1.04	28.84	0.48	2.20	0.31	1.36	8.61

2.2. Refrakter tuğla üretimi

2.2. Refractory brick production

Bu üretimde yarı yaş presleme tekniği kullanılmıştır. Kil, sulu çevrim sonucu 100 mikron altı tane boyutuna indirilmiş olivin ve bir miktar cam suyu ile oluşturulan reçetelerdeki malzemeler EGE SERAMİK bünyesindeki Kimya Laboratuvarı'nda %7 nem ile 300 bar basınç altında preslenmiştir. Tuğlaların her biri az nemli halde yaklaşık 70 gramdır. Numuneler presten çıkarıldıktan hemen sonra EGE SERAMİK Kimya Laboratuvarı'nda 130 °C'de 1 saat, sinterleme işlemlerinden önce de EGE MATAL'a ait etüv fırınında 24 saat boyunca 115 °C'de kurutulmuştur. Kuruma sonrası tuğla ağırlıkları yaklaşık 65 gramdır. Tuğla boyu 100,6 mm, eni 50,7 mm ve kalınlıkları 6 - 6,1 mm aralığında değişkendir.



Şekil 1. Presten çıkan olivin esaslı tuğla.

Figure 1. Olivine brick after press.

Kurutulmuş tuğlalar Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ait Isıl İşlem Laboratuvarı'nda bulunan kamara tipi Protherm PLF serisi fırında 1150 °C, 1250 °C ve 1350 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklıkları olivin ve kilin yapısındaki oksitlerin yüksek sıcaklıklarda oluşturacağı düşük ötektikli yapılar göz önünde tutularak belirlenmiştir ve kademeli bir şekilde denenerek yükseltilmiştir. Sinterleme için fırın ısıtma hızı 10 °C/min olup sinterlenme sıcaklığında 15 dakika beklenmiştir ve daha sonra ısıtma durdurularak numuneler fırın içinde soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme atmosfer koşullarında gerçekleştirilmiştir. Malzemelere ait reçeteler Tablo 3'te verilmiştir. Malzeme kodlamaları olivin içeriği ve sinterleme sıcaklığına göre yapılmıştır. Örneğin T80-1350 kodlu numune %80 olivin içeriğine sahip 1350 °C'de sinterlenmiş tuğlayı temsil etmektedir.

Tablo 3. Tuğla reçeteleri

Table 3. Compositions of bricks

Numune	T80	T85	T90	T95	T100
Olivin (%)	80	85	90	95	100
Kil (%)	20	15	10	5	0
Cam suyu (%)	1	1	1	1	1

2.3. İy yapı görüntüleme ve kimyasal içerik analiz yöntemleri

2.3. Microstructure imaging and chemical composition analysis methods

Olivin kumunun ve üretilen tuğla malzemelerin SEM ve EDS incelemeleri EGE MATAL bünyesinde bulunan Thermo Scientific Apreo S cihazında 5kV çalışma voltajı ile yapılmıştır. SEM analizi öncesi tüm numuneler Leica EM ACE600 numune kaplama cihazında altın kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Karbon bantlar üzerinde cihaza konulan toz olivin örneklerinin çeşitli bölgelerinde görüntüleme yapılmış olup matrisin genel görüntüsü incelenmiştir. Olivin hammaddesinin ve üretilen tuğlaların XRD analizleri Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi DEFAM bünyesindeki X Işınları Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu analizlerde de toz numuneler kullanılmıştır. Laboratuvarda bulunan PANalytical Empyrean X-Ray Diffractometer cihazı ile $2\theta = 10$ derece ile $2\theta = 80$ derece arasında tarama gerçekleştirilmiştir. Bakır (Cu) X-Ray kaynağı kullanılan cihazda PIXcel 1D dedektörü bulunmaktadır. X'Pert Highscore ve Crystal Impact Match faz analizi yazılımları ile mevcut piklerin faz içerikleri tespit edilmiştir ve yorumlanmıştır. Seçilen optimum özelliklere sahip refrakter tuğla örneğinin tomografik incelemesi de ayrıca yapılmış olup örnek bir parça üzerinde por dağılımı ve bu porların boyutları göz önüne çıkarılmıştır. Bu inceleme EGE MATAL Görüntüleme ve İy yapı Analiz Laboratuvarı'nda bulunan Scanco Medical μ CT50 cihazında yapılmıştır.

2.4. Mekanik, fiziksel ve termal analizler

2.4. Mechanical, physical and thermal analysis

EGE SERAMİK'te geleneksel seramiklere uygun olarak 2 saat kaynama ve 1 saat bekleme şeklinde su emdirilerek yapılan su emme testi sonuçları ile seramik yapı dayanım testi sonuçlarına göre seçilmiş üç farklı reçeteden tuğla refrakter parçaları alınmıştır. EGE SERAMİK bünyesinde gerçekleştirilen bu testler için BS EN ISO 10545-3 (2018) ve BS EN ISO 10545-4 (2019) standartları da göz önünde bulundurulmuştur. Alınan farklı tuğla parçası numunelerine ASTM C20-00 (2015) standardından da faydalanılarak Arşimed Prensibi'ne göre testler yapılmıştır. Bu testler EGE MATAL'da gerçekleştirilmiştir. Numuneler 110 °C'de 24 saat kurutularak kuru ağırlıkları tartılmıştır. Kuru numuneler 2 saat su içinde kaynatılmış ve en az 12 saat su içinde bekletilerek suya doymun hale getirilmiştir. Daha sonra üzerinde yoğunluk kiti bulunan RADWAG hassas terazide suya doymun ve su içinde askıda ağırlıkları ölçülmüştür. Bu veriler ile görünür porozite, su emme, bulk yoğunluğu, görünür katı yoğunluğu ve özgül ağırlık gibi fiziksel özellikler hesaplanmıştır. Bu fiziksel özellik verilerine, farklı numunelerden alınan en az 4 adet numune parçasına ait sonuçların ortalaması alınarak ulaşılmıştır.

EGE SERAMİK'te elde edilen dayanım verileri ve EGE MATAL'da yapılan fiziksel testlerde ortaya çıkan özellikler bakımından en iyi özelliği gösteren tuğla reçetesinden üretilen numuneler teknik seramiklerin eğilme mukavemeti test yöntemini belirten ASTM C1161-18 (2018) standardından faydalanılarak EGE MATAL Mekanik Analiz Laboratuvarı'nda bulunan SHIMADZU Servo Pulser EHF-LV020K2-020 cihazında oda sıcaklığında üç nokta eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Numuneler, uygun boyutlara EGE MATAL Mekanik Analiz Laboratuvarı bünyesinde bulunan METKON METACUT 302 cihazı ile yüksek devirde elmas uçla kesim yapılarak getirilmiştir. Eğilme hızı 1 mm/min olarak alınmıştır, yükleme ve destek burunlarının çapı 10 mm'dir.

Olivin hammaddesinin pişirim sırasındaki davranışları hakkında bilgi edinmek üzere termogravimetrik analiz de yapılmıştır. Bu inceleme EGE MATAL Termal Analiz Laboratuvarı'nda TA Instruments SDT Q600 cihazı ile yapılmıştır. 32 mg olivin kumu oda sıcaklığından 1500 °C'ye kadar 10 °C/min hızla ısıtılarak kütle değişim durumu izlenmiştir. Parametrelere cihaz özellikleri ve yapılan örnek çalışmalar da göz önünde bulundurularak karar verilmiştir (Acar, 2020). Cihazda azot ortamında test yapılmaktadır.

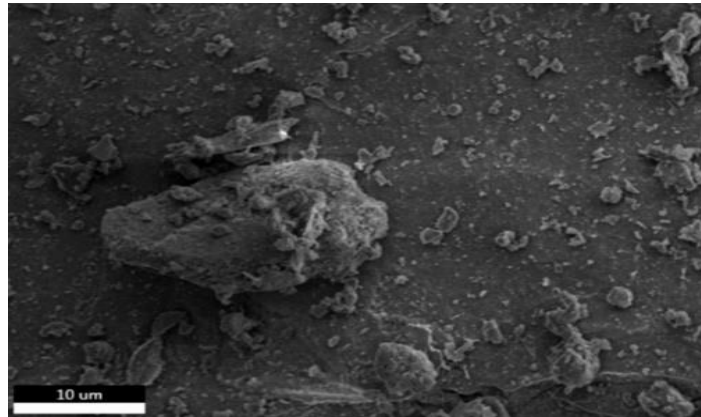
3. Bulgular

3. Results

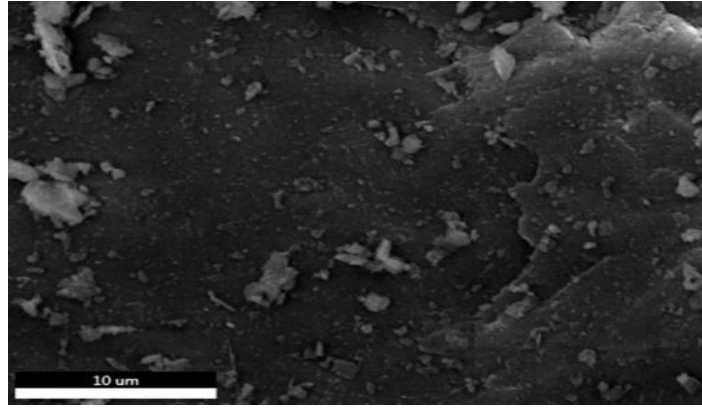
3.1. Olivinin mikroyapısal ve kimyasal analizlerinin sonuçları

3.1. Results of the microstructural and chemical analysis of olivine

Taramalı Elektron Mikroskobu'ndaki EDS sonuçları elementlerin içyapıdaki dağılımlarını tespit etmek amacıyla yapılmıştır. SEM-EDS incelemeleri olivin üzerinde iki farklı bölgede yapılmıştır. Şekil 2 ve 3'te bu iki farklı bölgenin SE görüntüleri verilmiştir.

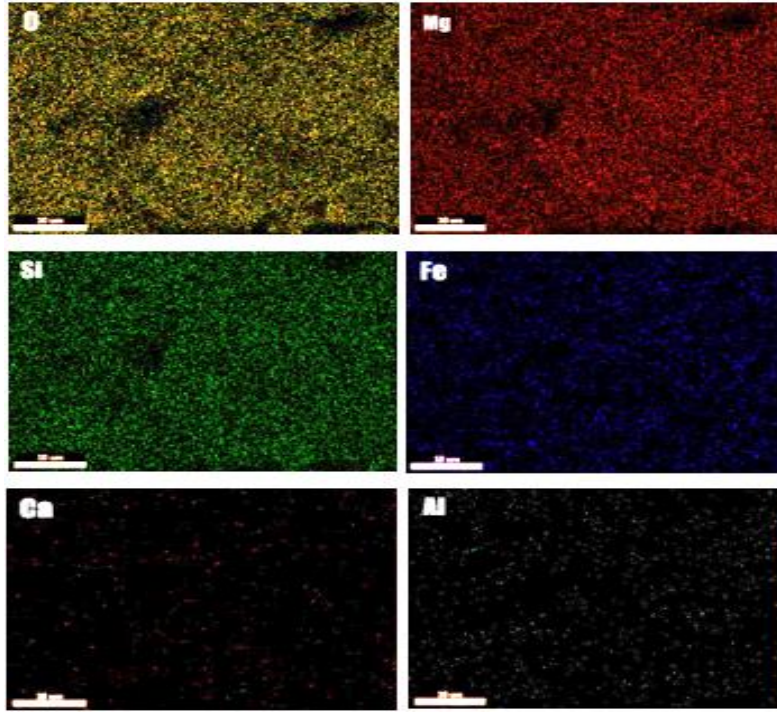


Şekil 2. Olivin üzerindeki EDS 1 bölgesi.
Figure 2. EDS 1 examination zone.



Şekil 3. Olivin üzerindeki EDS 2 bölgesi.
Figure 3. EDS 2 examination zone.

EDS elementel haritalandırması, SE görüntüleri verilen alanlarda elementlerin nasıl bir şekilde dağılım gösterdiğinin anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Şekil 4 ve 5'te ise bu bölgelerin ayrı ayrı elementel haritalandırmaları mevcuttur.

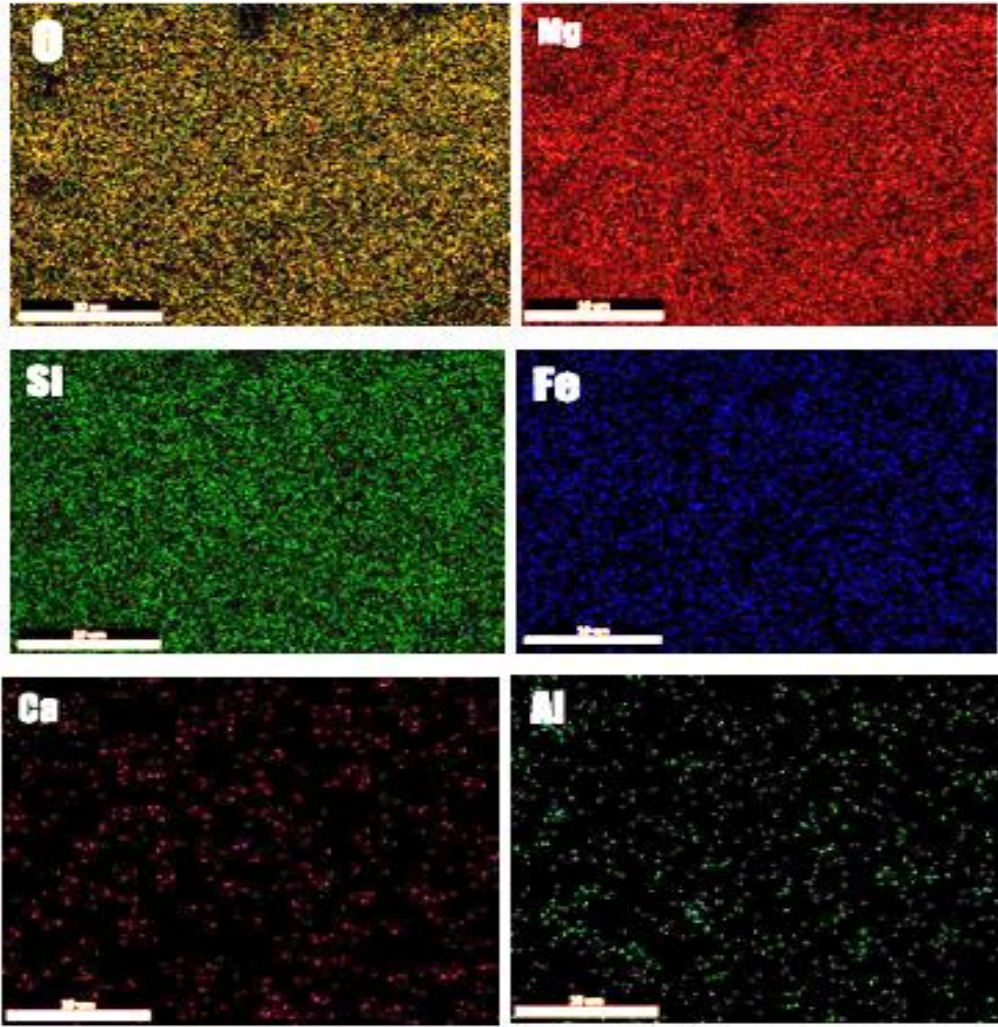


Şekil 4. EDS 1 bölgesinin elementel haritalandırılması.
Figure 4. Elemental mapping of EDS 1 examination zone.

Tablo 4'te bu iki bölgeye ait kimyasal içerik verilmiştir. İki bölgede de içerik hemen hemen aynı olmakla birlikte hammadde bünyesinde homojen bir dağılım görülmektedir.

Tablo 4. İki farklı bölgenin EDS Sonuçları
Table 4. EDS results of examination zones

Element	Ağırlıkça yüzde oranı						Atomik yüzde oranı					
	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
EDS 1	44.10	31.06	0.05	18.45	0.19	6.15	57.34	26.57	0.04	13.67	0.10	2.29
EDS 2	43.07	32.33	0.07	18.40	0.12	6.00	56.20	27.76	0.05	13.68	0.06	2.24



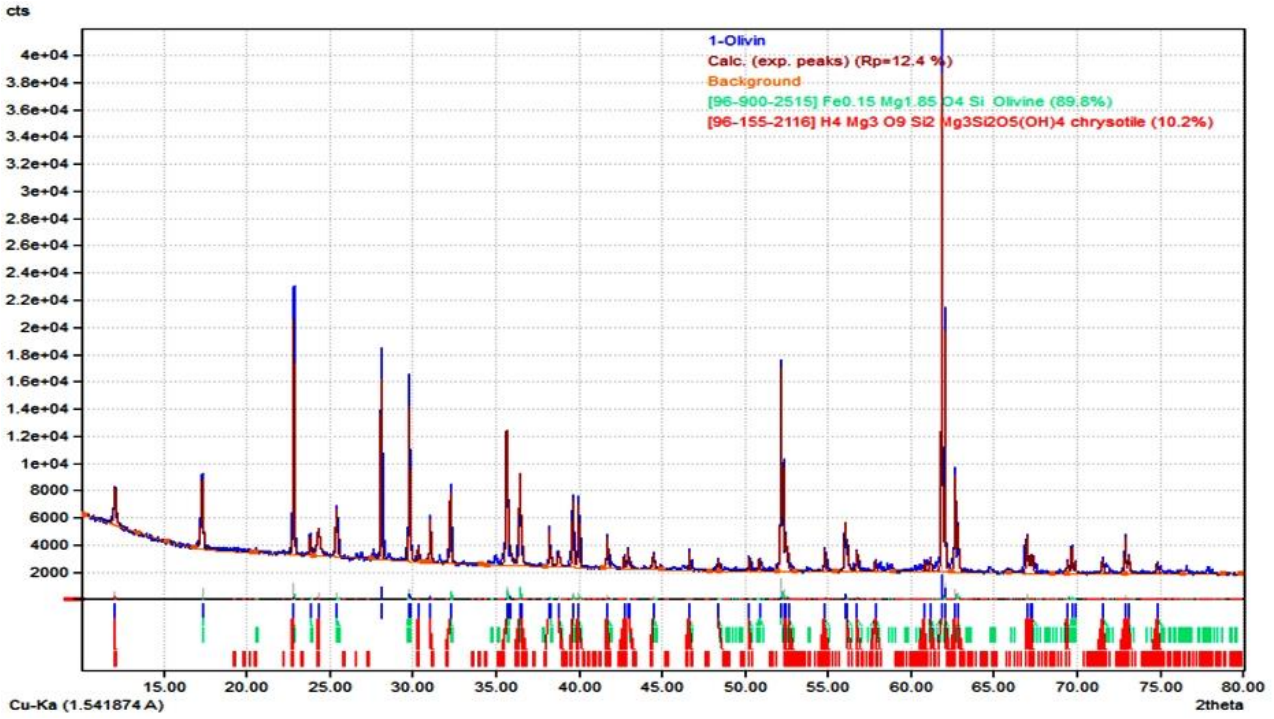
Şekil 5. EDS 2 bölgesinin elementel haritalandırılması.
 Figure 5. Elemental mapping of EDS 2 examination zone.

3.2. Olivinin XRD sonuçları

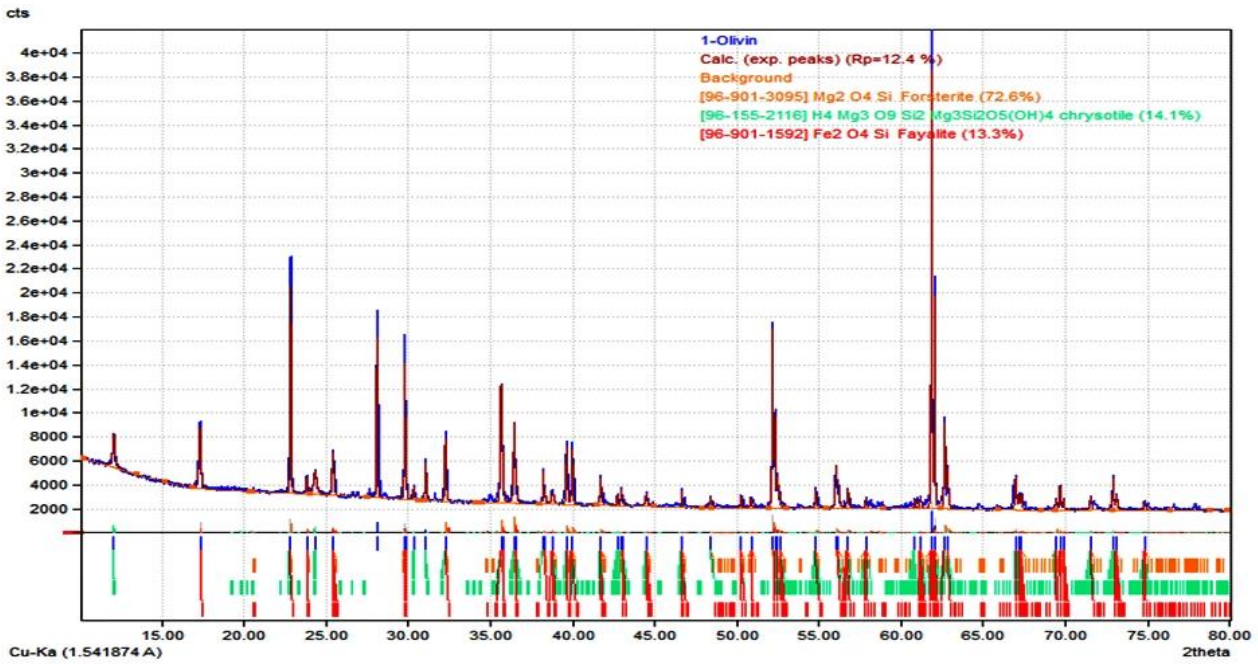
3.2. XRD results of olivine

Analizde hammaddedeki teorik içeriği Mg_2SiO_4 olan saf forsterit fazının yanında bulunan $FeSiO_4$ formüllü fayalit fazı ile birlikte oluşan forsterit ferroan içeriği tespit edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen verilere göre bu malzeme içerisindeki forsterit ferroanın kimyasal formülü $Fe_{0,15}Mg_{1,85}SiO_4$ (ICSD 98-002-0779) olup X'Pert Highscore programından elde edilen rapora göre yoğunluğu $3,3 \text{ g/cm}^3$ ve hücre hacmi $292,77 \times 10^6 \text{ pm}^3$ 'tür. Teorik olivin kristal yapısı olan orthorombik yapıya sahiptir, magnezyum demir silikat olarak da anılabilir (Simonov v.d., 1984). Elde edilen pikler Match faz analiz programı ile farklı içeriklere göre de incelenmiştir. Tüm malzemede %89,8 forsterit ferroan (Merli v.d., 2001) ve %10,2 $Mg_3Si_2O_9H_4$ kimyasal formülüne sahip krizolit fazı (COD 96-155-2116) görülmüştür. Krizolit, lizardit ile aynı kimyasal formüle sahip olmakla birlikte lizardit gibi trigonal yapıda olmayıp monoklinik bir kristal yapıya sahiptir. Serpentin grubu minerallerdendir. $2,507 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Bu analize ait veriler Şekil 6'da verilmiştir.

Forsterit ferroan fazının doğrudan forsterit ve fayalit olarak tanımlanması ile daha farklı bir grafik elde edilmiştir. Bu grafik Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre %72,6 forsterit (COD 96-901-3095), %13,3 fayalit (COD 96-901-1592) ve %14,1 krizolit tespit edilmiştir (Falini v.d., 2004). Köyceğiz bölgesine ait bu olivinde teorik olivine içeriğinden bir miktar fazla fayalit fazı vardır. Fayalit fazı 1205°C 'lik erime sıcaklığıyla $1850-1900^\circ\text{C}$ arasında erime sıcaklığına sahip olan forsterite göre daha düşük sıcaklık dayanımına sahiptir. Yapıdaki krizolit de olivin grubu minerallerde karşılaşılan bir yapıdır. Hammaddede teorik içeriklerin dışında herhangi bir farklı faz yapısı mevcut değildir.



Şekil 6. Olivin hammaddesinin XRD grafiği.
Figure 6. XRD results of olivine sand.



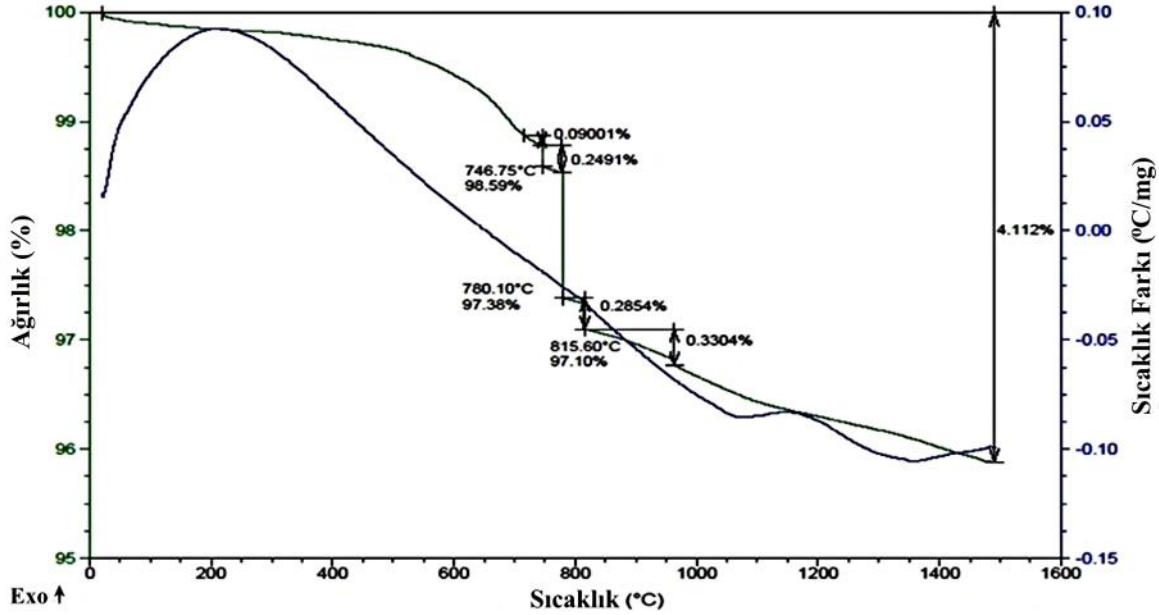
Şekil 7. Forsterit ve fayalit fazlarını ayrı ayrı içeren XRD grafiği.
Figure 7. XRD graph which involves both forsterite and fayalite phases in separately.

3.3. Olivinin TGA sonuçları

3.3. TGA results of olivine

Şekil 8'deki TGA eğrisi ilk aşama olarak su kaybını göstermektedir. 100 °C'den itibaren fiziksel su buharlaşmaya başlamıştır. 200-250 °C arasında küçülme suyunun uzaklaştığı tahmin edilmektedir. 400-500°C arasında empüritelerin kızdırma kayıpları gerçekleşir. 400-700 °C arasında gerçekleşen ağırlık kaybı süreci, XRD'de de tespit edilen serpentin grubu mineralin hidroksil yapısının ayrılması sonucu olarak görülebilir. 740-815 °C arasında olivin bünyesindeki krizolit, lizarditte olduğu gibi içeriğindeki yapısal suyu kaybederek

kütle kaybına yol açmaktadır (Acar, 2020). Kızdırma kaybı dahil toplamda %4 civarındaki kütle kaybının yaklaşık %0,83'lük kısmı olivin içerisinde 740-815 °C arasında uzaklaşan yapısal sudur. 815 °C'den itibaren görülen kayıp serpentin grubu mineralin yıkımından kaynaklı olabilir. Buna açığa çıkan serbest silis içeriğinin faz dönüşümünü de eklemek mümkündür. 1200-1350 °C aralığında görülen endotermik pik de fayalitin erimeye başladığını gösterir. 1500 °C'nin sonunda olivin kumu tüm rengini korumuş olup fayalit fazının yoğun olduğu taneler arasında sinterleşme ve birbirine kaynaşma eğilimi görülmüştür. Bu sıcaklık teorik olarak da olivinin sinterleşme derecesiyle hemen hemen aynıdır.



Şekil 8. Olivin hammaddesinin TGA grafiği.

Figure 8. TGA graph of olivine raw material.

3.4. Tuğlaların mekanik ve fiziksel test sonuçları

3.4. Mechanical and physical test results of bricks

EGE SERAMİK'te gerçekleşen ilk aşama su emme ve dayanım testlerine ait sonuçlar da Tablo 5'te verilmiştir. T95-1250 tuğlası ve T100-1150 tuğlası sinter sonrası, T100-1250 tuğlası ise kurutma sonrası yetersiz mukavemetten dolayı parçalanmıştır. EGE SERAMİK'te su emme değerleri bakımından oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Dayanım da göz önünde bulundurularak üç farklı reçetede T80-1350, T85-1350 ve T90-1350 tuğlaları ikinci aşama fiziksel testler için seçilmiştir. EGE MATA'L'da gerçekleştirilen Arşimed prensibine dayalı ikinci aşama fiziksel testlerin sonucu da Tablo 6'da verilmiştir. Artan sinterleme sıcaklıkları dayanımları arttırmıştır. 1250 °C'ye kadar sinterlemelerde olivin içeriğindeki artış mukavemeti olumsuz etkilemiştir. 1150 ve 1250 °C gibi sıcaklıklarda sinterlenmenin sağlanmasında kil daha etkilidir. 1350 °C'lik sinterlemede ise artan olivin ile birlikte mukavemet de artış göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda sinterleme sırasında olivin içerisindeki fayalit camsı kıvamdadır ancak killer tanelerin ve fazların aralarına dağılıp tam sinterleşmeyi engeller. 1350 °C'de ise fayalit tamamen erir ve sinterleşmeyi sağlar.

Tablo 6'daki fiziksel özellikler incelendiğinde bulk (yığımsal) yoğunluk değerlerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir. %80 olivin içeriği %85'e çıktığında tüm ağırlıkta bir artış olmuştur, ancak pişme sonrası tüm hacimde de artış görülmüştür. Numune ağırlığında ve görünür porozitedeki artış olmuştur. Numune ağırlığındaki artış kapalı porozite, tane boşluğu ve toz hacmindeki artışı karşılamıştır ancak açık porozitede fazlasıyla artış gözlemlenmiştir. Bu sebeple de bulk yoğunluk değerleri bir miktar azalmıştır. Malzemedeki hacim artışının çoğunlukla iç boşluk kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Olivin içeriği %85'ten %90'a çıkarıldığında kütledeki artışın bulk yoğunluğu arttırdığı söylenebilir fakat diğer durumları da incelemek gereklidir. Numune ağırlığındaki artıştan ziyade görünür porozitenin, kapalı porozite artışına rağmen toplam hacimde azalmaya neden olacak şekilde dramatik düşüşü %85 olivin içerikli numuneye göre bulk yoğunluğundaki göreceli artışın sebebi olabilir. Bir diğer sebep olarak da iç boşlukların azalmasını ekleyebiliriz. %80 olivin içerikli yapıya göre daha fazla iç boşluk vardır ancak %85 olivin içerikli tuğlaya göre azdır. İç boşluk ile ilgili bu teoride ancak görünür katı yoğunluğu incelemelerinden sonra net bir sonuca

varılabilir. %80 olivin içeriğinden %85 olivin içeriğine geçişte olivin artışı ile görünür katı yoğunluğu ve özgül ağırlık değerleri artmıştır. %85-%90 geçişinde ise bu değerler azalma göstermiştir. %85-%90 geçişi için askıda ağırlıkları aynı kabul edersek kuru malzemedeki ağırlık artışı ile bu değerler tam tersi şekilde artmış olmalıydı. Bu düşüşün askıda ağırlıklar ile doğrudan ilişkili olduğu saptanmıştır. Askıda ağırlığın düşmesindeki sebep su tarafından uygulanan kaldırma kuvvetinin artmasıdır. Bu kuvvet artışı batan katı hacmindeki artışın sonucudur. Malzemelerin görünür hacmindeki artış ve açık porozitedeki düşüş göz önünde bulundurulduğunda olivinin artışı ile artan iç boşlukların buna neden olabileceği söylenir. Bulk (hacim) yoğunluğu hesaplamalarında %80 - %85 olivin geçişinde toplam hacimde azalma görülmüştür. %85-%90 geçişinde de açık porozitedeki fazla düşüşten de kaynaklı toplam hacimde bir azalma gözlemlenmiştir. Açık porozitenin devre dışı kaldığı görünür katı yoğunluğu hesaplamalarında ise ağırlık artışına rağmen azalma gösteren bu değer doğrudan kapalı gözeneklilikteki artışı ortaya koyar. Dolayısı ile bulk yoğunlukta bahsedilen iç boşluk azalması geçersizdir, bulk yoğunluk artışı açık porozitenin fazla düşüşünden kaynaklanmaktadır.

Tablo 5. Tuğlaların EGE SERAMİK'te yapılan mekanik ve fiziksel test sonuçları
Table 5. Results of the mechanical and physical tests which were performed in EGE SERAMİK

Numune	Ort. (=3) Su emme (%)	Ort. (=3) Dayanım (kg/cm ²)
T80 – 1150	12.69 ± 0.51	199 ± 7.11
T80 – 1250	10.18 ± 0.84	503 ± 4.54
T80 – 1350	0 ± 0.00	938 ± 12.83
T85 – 1150	14.09 ± 0.76	146 ± 13.14
T85 – 1250	10.22 ± 1.03	483 ± 10.03
T85 – 1350	0 ± 0.00	999 ± 6.97
T90 – 1150	15.19 ± 1.25	105 ± 8.83
T90 – 1250	12.30 ± 0.48	409 ± 4.89
T90 – 1350	0.03 ± 0.002	1026 ± 8.04
T95 – 1150	16.26 ± 0.23	69 ± 2.16
T95 – 1350	4.24 ± 0.32	683 ± 12.75
T100 – 1350	6.77 ± 0.48	429 ± 9.27

Tablo 6. Tuğla refrakter parçalarının Arşimed prensibi ile hesaplanan ortalama fiziksel özellikleri
Table 6. Physical properties of refractory bricks that were calculated by Archimedes Method

Özellik	T80-1350	T85-1350	T90-1350
Ort. (=5) Görünür porozite (%)	22.96 ± 8.52	32.62 ± 6.47	17.62 ± 5.87
Ort. (=5) Su emme (%)	9.18 ± 4.21	12.93 ± 3.11	6.87 ± 2.32
Ort. (=5) Bulk yoğunluk (g/cm ³)	2.61 ± 0.31	2.54 ± 0.24	2.56 ± 0.06
Ort. (=5) Görünür katı yoğunluğu (g/cm ³)	3.40 ± 0.24	3.79 ± 0.44	3.12 ± 0.23
Ort. (=5) Özgül ağırlık	3.40 ± 0.24	3.79 ± 0.44	3.12 ± 0.23

Tablo 7’de tüm tuğlaların kurutma sonrası ağırlık değişimleri verilmiştir. Tablo 8’de ise pişme sonrası ağırlık ve boyut değişimleri mevcuttur. Kurutma kayıpları malzemelerdeki fiziksel su, nemli preslemeden ve öğütme aşamasındaki sulu çevrimden gelen toplam suyun kaybı olarak açıklanabilir.

Tablo 7. Tuğlaların kurutma sonrası ağırlık kayıpları
Table 7. Mass loss of bricks after drying process

Numune	Ort. (=3) Kurutma sonrası ağırlık kaybı (%)
T80 – 1150	7.30 ± 0.15
T80 – 1250	7.10 ± 0.27
T80 – 1350	7.65 ± 0.17
T85 – 1150	6.61 ± 0.29
T85 – 1250	7.48 ± 0.16
T85 – 1350	7.00 ± 0.09
T90 – 1150	6.08 ± 0,12
T90 – 1250	6.84 ± 0.10
T90 – 1350	6.64 ± 0.05
T95 – 1150	11.58 ± 0.43
T95 – 1350	8.10 ± 0.57
T100 – 1350	7.47 ± 0,77

Tablo 8. Tuğlaların pişirme sonrası boyut değişimleri ve ağırlık kayıpları
Table 8. Mass loss and shrinkage values of bricks after sintering process

Numune	Ort. (=3) Pişme sonrası boy küçülmesi (%)	Ort. (=3) Pişme sonrası ağırlık kaybı (%)
T80 – 1150	1.02 ± 0,09	1.97 ± 0.06
T80 – 1250	2.05 ± 0.09	2.18 ± 0.20
T80 – 1350	8.22 ± 0.14	2.24 ± 0.09
T85 – 1150	0.61 ± 0.24	1.73 ± 0.09
T85 – 1250	1.77 ± 0.20	1.81 ± 0.09
T85 – 1350	8.45 ± 0.06	1.86 ± 0.13
T90 – 1150	0.64 ± 0,09	1.59 ± 0.08
T90 – 1250	2.23 ± 0.12	1.55 ± 0.11
T90 – 1350	9.84 ± 0.05	1.69 ± 0.08
T95 – 1150	0.55 ± 0.08	1.42 ± 0.08
T95 – 1350	8.77 ± 0.22	1.66 ± 0.09
T100 – 1350	6.50 ± 0.06	0.95 ± 0.06

Pişme sonrası ağırlık kayıpları incelendiğinde kildeki kızdırma kaybının fazlalığı ağır basmıştır. Kil içeriğinin fazla olduğu reçeteler daha çok ağırlık kaybına yol açmış, artan sıcaklıklarla birlikte tüm reçetelerde kayıp değeri artmıştır. Dayanım, porozite ve su emme değerleri karşılaştırıldığında en iyi sinterleşme sağlanan reçetenin T90 olduğu, en uygun sinterleme sıcaklığının 1350 °C olduğu tespit edilmiştir. Seçilen T90-1350 tuğlalarında çoklu ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler 5 tane tuğlanın boyut değişim değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. T90-1350 tuğlasında pişme sonrası ortalama ağırlık kaybı %1,35 (± 0,26) ve boy küçülmesi ortalama %7,28 (± 0,09) olmuştur. Tablo 9’da, üretilen T90-1350 tuğlalarına EGE MATA’da yapılan eğilme testinin sonuçları verilmiştir. Eğilme miktarları ve mukavemetleri belli bir aralıkta elde edilmiştir. Şekillendirme aşamasından kaynaklı deformasyonların olduğu numuneler teste sokulmamıştır. Eğilme testlerinde standart ölçülere en yakın şekilde elde edilen numuneler kullanılmıştır.

Tablo 9. T90-1350 tuğlasına ait 3 nokta eğilme testi sonuçları
Table 9. 3-point bending test results of T90-1350 brick

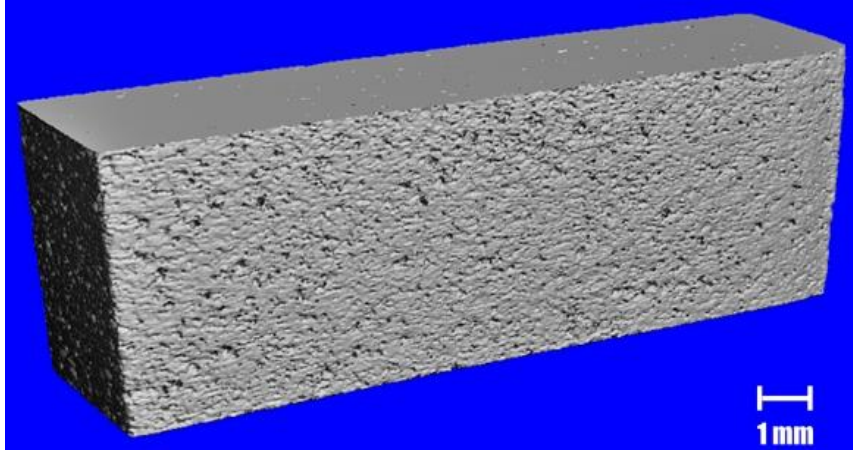
Numune	Mesnet açıklığı (mm)	Eğilme (mm)	Eğilme dayanımı (MPa)
1	80	0.23	55.08
2	80	0.18	49.18
3	80	0.19	54.94
4	80	0.23	52.93
5	80	0.22	47.82
6	80	0.19	50.60

T90-1350 tuğlası refrakter tuğlalarla karşılaştırıldığında özgül ağırlıkları ve görünür porozite özellikleri bakımından yüksek yoğunluklu refrakter malzeme grubuna girebilecek malzeme elde edilmiştir. T90-1350 örnekleri mekanik ve fiziksel özellikler bakımından bazı refrakter tuğlaların özelliklerini karşılamıştır.

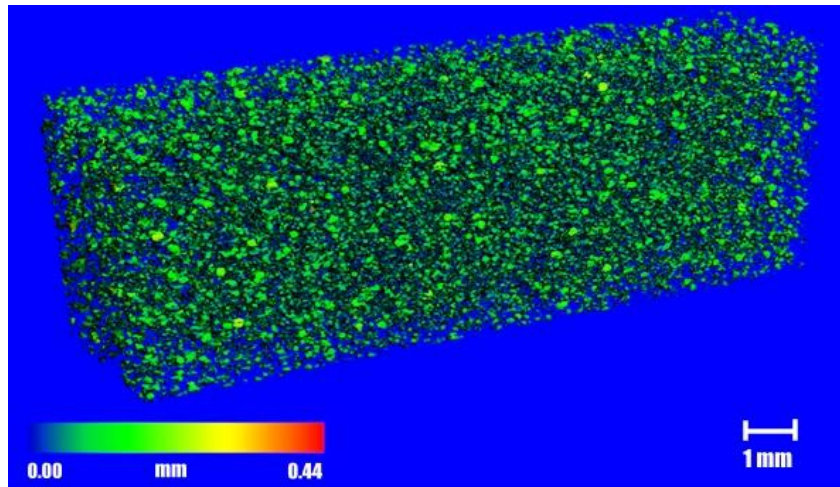
3.5. Tomografik inceleme sonuçları

3.5. Tomographic examination results

Yapılan tomografik incelemeden elde edilen görüntüler Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. T90-1350 numune parçasının tomografik görüntüsü.
Figure 9. Tomographic image of T90-1350 brick specimen.



Şekil 10. T90-1350 numune parçasının por dağılım görüntüsü.
Figure 10. Pore distribution of T90-1350 brick specimen.

Tablo 10'da ise inceleme sonucundaki porozite miktarı ve por boyut dağılımı verilmiştir. Yüzeysel porların çokça dağılımına rağmen bünye içerisinde kapalı porozite oranı oldukça düşüktür. 0,06-0,1 mm aralığında boyuta sahip porlar toplam porların %55'ini oluşturmaktadır ve bunlar daha çok yüzeye ve yüzeye yakın kısımlara dağılmıştır. İç bölgelerde görülen boşlukların boyutları çok küçüktür. Bu da yapıda iyi sinterleşme sağlanırken, pişirim sırasında gaz ve empürütelerin uzaklaşırken yüzeyde ve yüzeye yakın iç kısımlarda göreceli olarak büyük boşluklar bıraktığını göstermektedir.

Tablo 10. Tomografik incelemesi yapılan tuğla refrakter parçasının porozite ve por boyutu oranları

Table 10. Porosity and pore size distribution ratios of the refractory brick specimen that was tomographically examined

Parça	T90-1350
Toplam porozite (%)	6.70
0.04 mm por (%)	11.06
0.06 mm por (%)	15.08
0.08 mm por (%)	21.32
0.1 mm por (%)	18.62
0.12 mm por (%)	10.08
0.14 mm por (%)	9.01

3.6. Tuğlanın XRD analizi

3.6. XRD analysis of brick

Pişmiş T90-1350 tuğlasının XRD analizi sonucunda hammaddedeki forsterit ferroan fazının farklı kimyasal formülüne, protoenstatit ve magnesioferrit fazına rastlanmıştır. Hammaddenin kristallerinin içinde dağılım gösteren Mg ve Fe, pişirimden sonra mikroyapıda kristal Mg, kristal Fe ve bunların katyonları biçiminde dağılım göstermiştir. Faz, $Fe_{0,228}Mg_{1,772}SiO_4$ (COD 96-900-4327) kimyasal formülüne sahip yapıya dönüşmüştür. Bu fazın hesaplanan yoğunluğu $3,356 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Liang & Hawthorne, 1994). Kristal Mg, olivinin yapısındaki forsterit ferroan fazından ayrılma gösterdiği için pişirimden önceki hammadde yapısındaki formüle göre daha az Mg bulunmaktadır. Bu Mg iyonları, alümina tarafından oluşturulan (-) yüklü elektrostatik kuvvet tarafından çekilmiştir. Dengeleyici oksit görevi gören alüminanın yapıdaki varlığı katyon absorbe edilmesini sağlamakla birlikte $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ olan mevcut sinterleme sıcaklığında, katı parçacıkla karışık sıvı faz oluşumlarında veya kordiyerit benzeri kompleks yapıların oluşumunda yer alır. Mg iyonları yüksek sıcaklıkta ana fazdan ayrıştıktan sonra kildeki silis yapısı ile bileşik yaparak protoenstatitin oluşumunda doğrudan rol almıştır (Smith, 1959). Protoenstatit $MgSiO_3$ (COD 96-154-8550) kimyasal formülü ile gösterilip, yine orthorhombik kristal sistemine sahiptir ve yoğunluğu $3,099 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Kanzaki & Xue, 2017). Yapıda az miktarda da olsa görülen magnesioferrit fazı $Al_{0,22}Fe_{1,77}Mg_{1,01}O_4$ (COD 96-900-7273) kimyasal formülüne sahiptir. Bu fazın yoğunluğu $4,424 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve kübik kristal yapıdadır (Nakatsuka v.d., 2004).

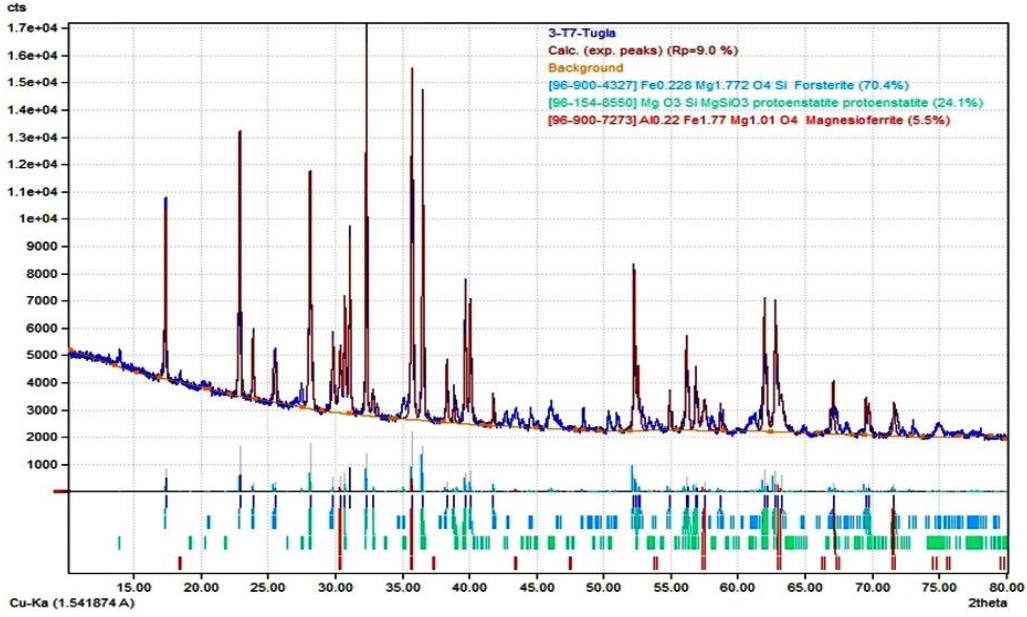
Magnesioferrit ($MgFe_2O_4$), forsteritten ayrılan Mg iyonlarının fayalit yapısında bulunan demir oksit içeriğine difüzyonu ile oluşur. Protoenstatit oluşumuna benzer bir mekanizmaya sahiptir. (Wang v.d., 2020). Magnesioferrite kil içerisinden gelen az miktarda Al iyonu da eklenerek $Al_{0,22}Fe_{1,77}Mg_{1,01}O_4$ kimyasal formülüne sahip yapı oluşmuştur. Bu tip fazların ve spinel yapıların oluşumları mevcut sinterleme sıcaklığında rahatlıkla görülür. Şekil 11'de görüldüğü gibi pişmiş tuğlanın yapısında % 70,4 forsterit ferroan, %24,1 protoenstatit ve %5,5 magnesioferrit fazı vardır.

3.7. Tuğlanın kimyasal analizleri ve içyapı görüntülemelerinin sonuçları

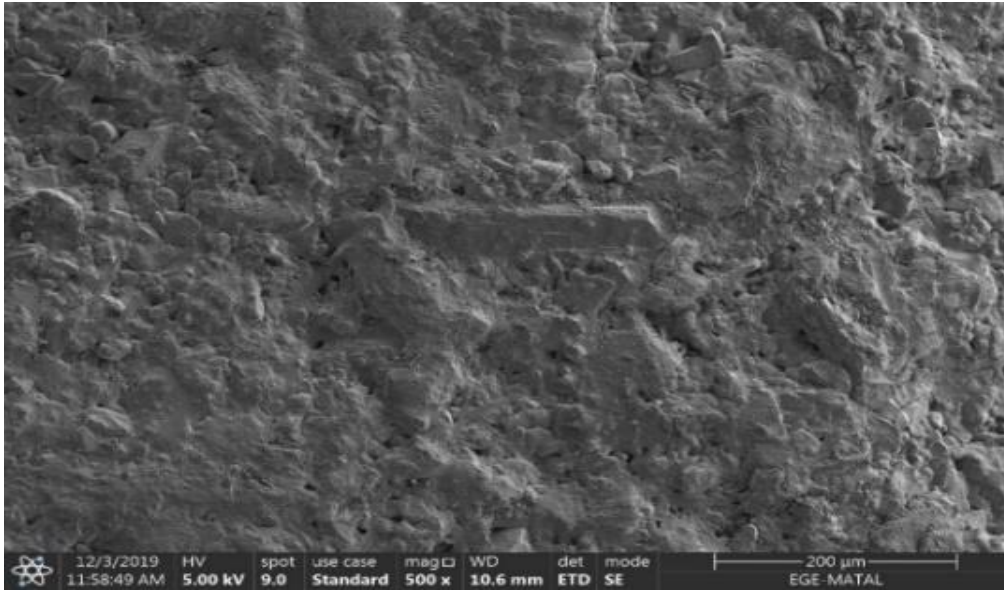
3.7. Chemical analysis and microstructure imaging results of brick

SEM incelemelerinde genel matrisin görüntüsünün ve belirli bir bölgenin SE ve BSE görüntüsünün elde edilmesi, EDS bölgesi haritalandırılması gibi işlemler gerçekleştirilerek XRD'de ortaya çıkan bu yapıların analiz edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 12'deki genel matris görüntüsünde homojen şekilde bütünleşmiş yapı görülmektedir ancak yüzeysel porlar dikkat çekmektedir. Fiziksel testlerden elde edilen görünür porozite değeri ve tomografik incelemedeki toplam porozite oranı ve por boyut dağılımları iyi bütünleşmiş yapı ve yüzeysel por arasındaki ilişkiyi açıklamıştır. Yüzeysel porların oluşumunun nedeni gaz çıkışları ve sinterleşme

esnasında o bölgeleri dolduracak camı fаз oluşumunun gözlenmemesidir. Camı fаз düşük ergime noktalı alkaliler tarafından oluşturulur.



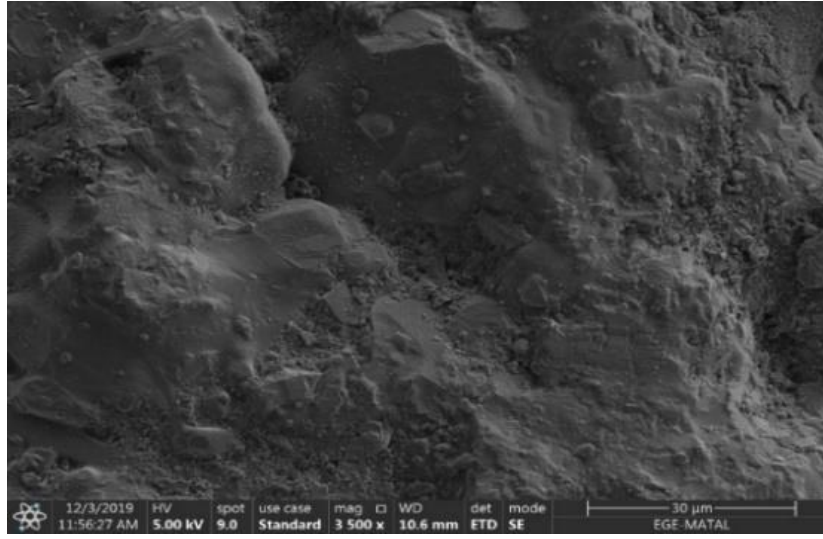
Şekil 11. T90-1350 numunesine ait XRD piklerinin ve faz içeriğinin görüldüğü grafik.
Figure 11. XRD pattern graphic and phase content of T90-1350 brick.



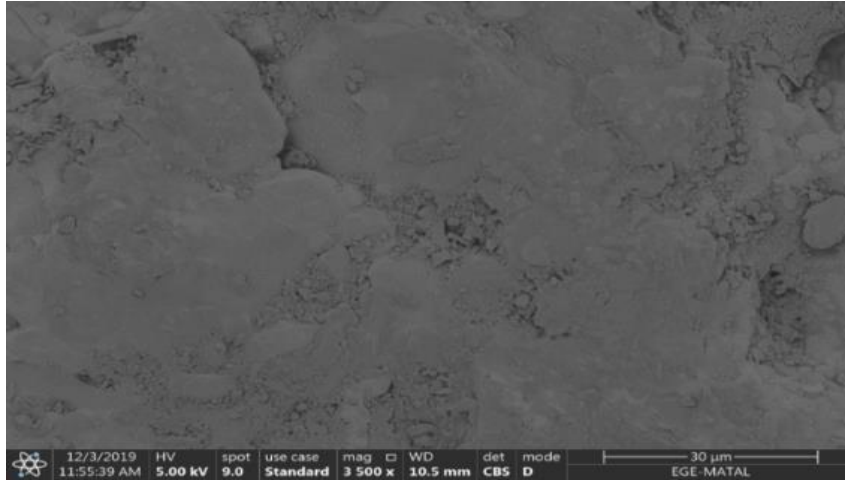
Şekil 12. T90-1350 tuğlasına ait 500 büyütmedeki SE görüntüsü.
Figure 12. 500 magnitude SE image of T90-1350 brick.

Kil ve olivin içerisinde serbest şekilde alkali bulunmamaktadır. Ancak sinterleme sıcaklığı artışı veya düşük ergime noktalı, camı fаз oluşturabilecek katkıları ile bu yüzeysel porların oluşumu engellenebilir. Şekil 13 ve Şekil 14'te genel matristen 3500 büyütmede elde edilen SE ve BSE görüntüleri verilmiştir.

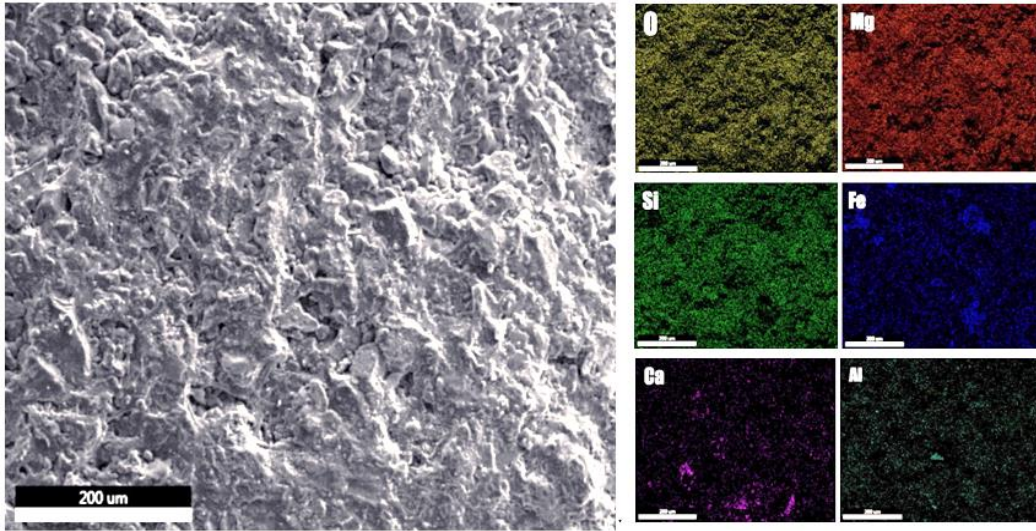
Bu yaklaşma (x3500) sonucunda porlar ve iri taneli yapılardan dolayı engebeli biçimde oluşmuş yüzey ve taneli yapı net biçimde görülmektedir. İnce kil, öğütülmüş olivin tanelerinin arasına girerek şekil alabilirliğe yardımcı olmuştur, ancak sinterleşme aşamasında bazı noktalarda tampon görevi görerek küçülen olivin tanelerinin temasının önüne geçmiş ve yer yer girintilere sebep olmuştur. Şekil 14'teki BSE görüntülerinden görülebileceği üzere de malzeme genelinde göze çarpan, net bir biçimde ayırt edilebilen fаз oluşumları yoktur. Şekil 15'te tuğla üzerinde elementel dağılım analizi yapılan bölge ve bölgenin elementel haritalandırılması verilmiştir. Tablo 11'de de bu EDS incelemesine ait elementel oranlar mevcuttur.



Şekil 13. T90-1350 tuğlasına ait 3500 büyütmedeki SE görüntüsü.
Figure 13. 3500 magnitude SE image of T90-1350 brick.



Şekil 14. Şekil 13'te verilen bölgenin BSE görüntüsü.
Figure 14. BSE image of the area which was shown in Figure 13.



Şekil 15. T90-1350 tuğlasında EDS analizi yapılan bölge ve elementel haritalandırılması.
Figure 15. EDS analysis area and its elemental mapping of T90-1350 brick.

Tablo 11. T90-1350 numunesinin EDS sonuçları
Table 11. EDS results of T90-1350 specimen

Element	Ağırlıkça yüzde oranı						Atomik yüzde oranı					
	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
EDS	44.11	27.38	1.92	18.94	2.13	9.52	54.47	24.47	1.55	14.65	1.15	3.71

Şekil 15'teki EDS görüntülerinde Fe-Mg-Si-O içerikli hakim forsterit ferroan fazının tüm bünyeye homojen şekilde dağılım gösterdiği, yer yer sinterleşme sonucu ayrıışan Fe kristallerinin belirli bölgelerde birikimi veya Fe içerikli bileşikler oluşturduğu gözlenebilir. Ayrıca homojen dağılım göstermemekle birlikte, bazı Fe ve Si içerikli birleşik yapıların tane sınırlarında Ca içeriğinin yoğunlaştığı görülmüştür. Magnesioferrit veya protoenstantit fazı forsterit ferroandan net biçimde ayırt edilememektedir, çünkü Mg-Si-O her bölgede yoğun olarak görülmektedir. Fe içeriği bakımından zengin bölgelerin boşluksuz yapısı dikkat çekmektedir. Erime gösteren fayalitin kademeli biçimde diğer fazların üzerine yayıldığı ve yoğunlaştığı bölgelerde boşluk bırakmadığı görülmektedir.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Çalışma sonucunda ağırlıkça %90 olivin ve %10 kil içeriğine sahip 1350 °C'de sinterlenebilen yüksek sıcaklık tuğlası elde edilmiştir. Sinterlenebilirlik ve yüksek sıcaklık dayanımı bakımından ateş tuğlası özellikleri taşıdığı söylenebilir. 1450 °C'de denenen sinterleme sonucunda şekil bozuklukları ve camsı faz oluşumları görülmüştür. Olivin içerikli tüm reçeteler bu sıcaklıkta eriyik oluşturmuştur. Pişirme sıcaklığı, yüksek olivin içeriği ve mekanik dayanım bakımından diğer reçetelere göre öne çıkan bu malzemenin yüksek sıcaklık malzemesi olarak kullanımı hedeflenmiştir. Laboratuvar altyapıları ve test imkanları dahilinde gerçekleştirilemeyen yük altında refrakterlik, termal şok dayanımı gibi yüksek sıcaklık testlerinin yapılması önerilmektedir. Tablo 12'de üretilen malzemeye ait özellikler verilmiştir.

Tablo 13'te ise ticari ürün olarak kullanılmakta olan farklı refrakter tuğla malzemelerine ait özellikler verilmiştir (Ateş Tuğla, t.y.; Rong Sheng Refractory, t.y.; Kiln Refractory, t.y.; Rewell Refractory, t.y.; DKJL Refractories, t.y.). Tabloya elde edilen malzeme özellikleri de eklenerek karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 12. Üretilen tuğla malzemenin özellikleri
Table 12. Properties of produced brick material

Tuğla malzeme	T90-1350
Olivin içeriği (%)	90
Bağlayıcı kil (%)	10
Cam suyu miktarı (%)	1
Şekillendirme	%7 nem – 300 bar basınçla pres
Kurutma sıcaklığı (°C)	110-130
Sinterleme sıcaklığı (°C)	1350
Sinterleme sonrası ağırlık kaybı (%)	1.35
Sinterleme sonrası boy küçülmesi (%)	7.28
Görünür porozite (%)	17.62
Bünye porozitesi (%)	6.70
Su emme (%)	6.87
Bulk yoğunluk (g/cm ³)	2.56
Görünür katı yoğunluğu (g/cm ³)	3.12
Özgül ağırlık	3.12
Eğilme mukavemeti (MPa)	51.76

Tablo 13. Üretilen malzeme ile çeşitli ticari refrakter tuğlaların mekanik ve fiziksel özellikleri
Table 13. Mechanical and physical properties of the produced material and various commercial refractory bricks

Tuğla malzeme	Dayanım (MPa)	Açık porozite (%)	Bulk yoğunluk (g/cm ³)	Özgül ağırlık
T90-1350	51.76	17.62	2.56	3.12
Forsterit	Min. 50	18-20	2.55-2.7	-
Zirkon	60 - 300	1 – 20	-	3.55 – 4.3
SiC	150-200	13 - 17	-	2.6 - 2.75
Mag-Carbon	40-50	4-5	2.80 – 2.85	-
Dolomit	50	Maks. 18	2.95	-
Silimanit	60-70	18	-	2.45-2.55
Mullit	60-160	13-22	-	2.6-3.15
Magnezit	50-60	16-20	-	2.85-3.20
Kromit	25-35	18-22	-	3.0-3.15
Grafit	27-30	20-23	-	1.65-1.75
Silika	30-45	22-24	-	2.34-2.35

Bu doğrultuda standartlara uygun olarak büyük boyutlarda üretilen, elde ettiğimiz mevcut malzemeden çok daha yüksek sıcaklıklara dayanabilen refrakter tuğlaların bazı mekanik ve fiziksel özellikleri ile karşılaştırma yapılacak olursa, ufak boyutlarda üretilen bu olivin tuğla;

1. Forsterit tuğlanın mekanik dayanım, porozite hacim yoğunluğunu değerlerini karşılamıştır. Elde edilen malzeme farklı forsterit sentezi çalışmalarında üretilen örneklerle karşılaştırılabilir (Rani v.d., 2014).
2. Zirkon tuğlaların mekanik özelliklerini karşılayamamış fakat fiziksel özellikleri yakın değerlerdedir.
3. Silisyum karbür tuğlaların yoğunluk değerlerini karşılamış fakat mekanik olarak düşük dayanım sergilemiştir.
4. Mag-Carbon tuğlaların mekanik dayanım özelliğini karşılamış ancak mevcut fiziki yeterliliklerini karşılayamamıştır.
5. Dolomit tuğlaların porozite ve dayanım özelliklerini karşılamış ancak hacim yoğunluğu değerlerinin altında kalmıştır.
6. Silimanit ve mullit tuğlaların fiziki özelliklerini karşılamış mekanik dayanım bakımından bir miktar altında kalmıştır.
7. Magnezit, krom magnezit, grafit ve silika tuğlaların mekanik ve fiziksel özelliklerini karşılamıştır.

Üretimde kullanılan Köyceğiz bölgesi olivini kimyasal içerik ve faz yapısı bakımından tuğla veya farklı yüksek sıcaklık malzemelerinin üretimlerinde kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Forsterit, fayalit, krizolit gibi fazlara sahip olan mevcut malzeme literatüre uygun özellikler sergilemiştir. Olivinin yapısında özellikleri olumsuz etkileyecek ekstra bir mineral yapısı bulunmamıştır. Olivinin mikroyapı görüntülemeleri de Türkiye ve Dünya'daki diğer olivinlerin içyapılarına benzer morfolojik yapıların ve elementel dağılımın görülmesini sağlamıştır. Çalışmada incelenen kimyasal ve termal özellikleri bakımından da yine aynı şekilde farklı çalışmalarda karakterize edilen olivinlere benzer özellikler sergilemiştir. Köyceğiz olivini hammadde olarak önemli değer taşımaktadır.

Özet olarak, bu çalışma olivinin sadece öğütülerek, hiçbir işleme tabi tutulmadan doğrudan hammadde olarak kullanıldığı bir çalışmadır. Devlet Planlama Teşkilatı 2007 yılı Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu raporunda belirtildiği gibi yeterince değerlendirmediğimiz bölgemizdeki ve ülkemizdeki olivinin değerlendirilmesi bakımından önem taşımaktadır. Yüksek sıcaklık malzemesi araştırma ve geliştirme çalışmalarında yerli hammadde olarak değerlendirilmesine yönelik referans malzeme geliştirilmiştir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışmalar için hammadde desteği sağlayan EGAMİN Mineral Maden Endüstri ve Hammadde Sanayi A.Ş.'ye, tuğla örneklerinin üretimi ve birincil kontrollerinin yapılmasında büyük desteği olan EGE SERAMİK

Sanayi ve Ticaret A.Ş. Kalite Kontrol Laboratuvarı'ndan Emre Öztürk'e, ısıtma işlemleri konusunda tüm desteği sağlayan Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde görevli araştırma görevlileri Ahmet Çağrı Kılınç ve Serhan Köktaş'a, mevcut altyapısı ile çalışmanın her adımında destek sağlayan Ege Üniversitesi EGE MATAU Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin tüm personeline, makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışma için yöntemin planlanması ve sonuçların değerlendirilmesinden sorumlu olan yazar Kemal Köseoğlu; literatür taraması, malzeme seçimi, deneylerin yapılması ve makaleyi eleştirel incelemeye hazır hale getirilmesinden sorumlu yazar Konuralp Sivri'dir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Acar, İ. (2020). Sintering properties of olivine and its utilization potential as a refractory raw material: mineralogical and microstructural investigations. *Ceramics International*, 46, 28025-28034. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.297>
- American Society for Testing and Materials. (2015). *Apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick (ASTM C20-00)*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *Flexural strength of advanced ceramics at ambient temperatures (ASTM C1161-18)*. West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.
- Ateş Tuğla Refrakter Tuğla ve Harçlar (t.y.). *Refrakter ve tuğla bloklar*. <http://www.atestugla.com.tr>
- British Standards Institution. (2018). *Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density in ceramic tiles (BS EN ISO 10545-3)*. London: British Standards Institution.
- British Standards Institution. (2019). *Determination of modulus of rupture and breaking strength in ceramic tiles (BS EN ISO 10545-4)*. London: British Standards Institution.
- Brosnan, D.A. (2004). Corrosion of refractories. C.A., Schacht, (Ed.), *Refractories Handbook* (ss 39-79). Schacht Consulting Services.
- Dakduklu Minerals (t.y.). *Tundish support sand*. <http://www.dakduklu minerals.com/>
- Davis E.G., (1977). *Beneficiation of olivine foundry sand by differential attrition grinding*. U.S. Patent No. 4,039,625.
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayii ÖİK Raporu* (No:567). Türkiye Cumhuriyeti Başbakanlık. <http://ekutup.dpt.gov.tr/imalatsa/tastopra/oik567.pdf>
- Devlet Planlama Teşkilatı. (2007). *Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik ÖİK Raporu* (No:690). Türkiye Cumhuriyeti Başbakanlık. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/09_Madencilik_Madencilik.pdf

- DKJL Company Limited (t.y.). *Forsterite bricks*. http://www.dkjl-refractories.com/eng/cp_more.asp?id=250
- Dudolp Mining (t.y.). *Olivine in iron and steel industry*. <https://www.dudolpmine.com/olivine-mine-the-use-of-iron-and-steel-industry/>
- Erkan, Y. (2011). *Kayaç oluşturan önemli minerallerin mikroskopta incelenmeleri* (5. Baskı). TMMOB Jeoloji Odası Yayınları.
- Erkrom Madencilik (t.y.). *Olivin*. <http://erkrommaden.com.tr/olivin.html>
- Falini, G., Foresti, E., Gazzano, M., Gualtieri, A.F., Leoni, M., Lesci, I.G., & Roveri, N. (2004). Tubular-shaped stoichiometric chrysotile nanocrystals. *Chemistry-European Journal*, 10, 3043-3049. <https://doi.org/10.1002/chem.200305685>
- Gasparik, T. (2014). *Phase diagrams for geoscientists: An atlas of the Earth's interior* (2nd ed.). Springer Science & Business Media.
- Görhan, G., & Çelik, S. (2013). Pişirme hızının ve plastiklik suyunun tuğla özelliklerine etkisi. *Selçuk Teknik Dergisi*, 12(1), 1-11.
- Güney, Ö. (2008). *Demir oksit (FeO) ilavesinin forsterit sentezine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Kanzaki, M., & Xue, X. (2017). Protoenstatite in MgSiO₃ samples prepared by conventional solid state reaction. *Journal of Petrological and Mineralogical Sciences*, 112, 359-364. <https://doi.org/10.2465/jmps.170616>
- Kılınçarslan, S., Pehlivanoğlu, H.E., Pehlivanoğlu, F., Seven, A., & Molla, T. (2010). High temperature fire resistance for concrete using sustainable building. *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Design (ISSD 2010)*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.
- Kiln Refractory (t.y.). *Refractory bricks*. https://www.kiln-refractory.com/refractory_brick
- Liang, J., & Hawthorne, F. C. (1994). Characterization of fine-grained mixtures of rock-forming minerals by Rietveld structure refinement. *The Canadian Mineralogist*, 32, 541-552.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (t.y.). *Olivin*. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/olivin>
- Merli M., Oberti R., Caucia F., & Ungaretti L. (2001). Determination of site population in olivine: warnings on X-ray data treatment and refinement. *American Mineralogist*, 86, 55-65. <https://doi.org/10.2138/am-2001-0107>
- Miller Jr.E.D., (1961). *Basic refractory insulating shapes*. U.S. Patent No. 3,008,842.A.
- Nakatsuka, A., Ueno, H., Nakayama, N., Mizota, T., & Maekawa, H. (2004). Single-crystal X-ray diffraction study of cation distribution in MgAl₂O₄-MgFe₂O₄ spinel solid solution. *Physics and Chemistry of Minerals*, 31, 278-287. <https://doi.org/10.1007/s00269-004-0385-z>
- ORE-MET (t.y.). *Olivine sands, refractory mixes*. <http://www.oremnet.net/content/mining>
- Örgün, Y., & Erarslan, C. (2012). 21. yüzyılda olivin ve Türkiye'nin olivin potansiyeli. *Madencilik ve Türkiye Dergisi*, 23, 62-74.
- Ramezani, A., Emami, S.M., & Nemat, S. (2018). Effect of waste serpentine on the properties of basic insulating refractories. *Ceramics International*, 44, 9269-9275. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.138>
- Rani, A. B., Annamalai, A.R., Majhi, M.R., & Kumar, A. H. (2014). Synthesis and characterization of forsterite refractory by doping with kaolin. *International Journal of ChemTech Research*, 6(2), 1390-1397.
- Rewell Refractory Company (t.y.). *Zircon bricks*. <https://www.erefractory.com/zircon-bricks>
- Rong Sheng Refractory Materials (t.y.). *Dolomite bricks*. <http://refractorymaterials.net>

- Sazcı, H. (2001). Seramikte kullanılan killerin tanımı. V. Arslan, H. Köse, & M. Tanrıverdi (Eds.), *IV. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* (ss. 28-41). İzmir: Uşşak Matbaacılık.
- Simonov, M.A., Vasilev, D.G., Belokoneva, E.L., & Khisina, N.R. (1984). Intracrystalline distribution of Fe and Mg in the structures of 3 natural olivines. *Doklady Akademii Nauk Soyuz Sovetskikh Sotsialisticheskikh Respublik*, 276, 873-877.
- Smith, J.V. (1959). The crystal structure of proto-enstatite. *Acta Crystallographica*, 12, 515-519.
- Surendranathan, A.O. (2015). *An introduction to ceramics and refractories* (1st ed.). CRC Press Taylor&Francis Group.
- Tsigler, V.D., & Ye Pindrik, B. (1961). Technology of light weight brick. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2, 163-168.
- Wang, R., Zhang, J., Liu, Z., Liu, X., Xu, C., & Li, Y. (2020). Interaction between iron ore and magnesium additives during induration process of pellets. *Powder Technology*, 361, 894-902. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.006>

Balıkesir il merkezinde PM₁₀ seviyelerinin COVID-19 pandemi sürecinde analiz edilmesi

Analysis of PM₁₀ levels in downtown Balıkesir during the COVID-19 pandemic

Atilla MUTLU*¹ 

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir

• Geliş tarihi / Received: 15.08.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 25.07.2023

Öz

Bu çalışmada, Balıkesir kent merkezinde partikül madde (PM₁₀) seviyelerinin pandemi dönemini kapsayan 2019 ile 2021 yılları arasında değişimleri istatistiksel ve mekânsal olarak analiz edilmiştir. Sürekli ölçülen PM₁₀ ve meteorolojik parametrelerin analizleri sonucunda pandemi dönemine denk gelen 2021 yılı PM₁₀ seviyelerinin en yüksek olduğu zaman dilimi olarak kayıtlara geçmiştir. Özellikle, 2020 ve 2021 yıllarında yasal limit aşımı gözlemlenen gün sayıları yıl içerisinde üç basamaklı sayılar seviyesinde ifade edilmiştir. Konsantrasyon ağırlıklı yörünge (CWT) analizi sonucunda, en yüksek günlük PM₁₀ seviyesinin ölçüldüğü gün olan 21.Ocak.2021 tarihinde Balıkesir il merkezi için etkili olan kaynakların lokal kaynaklardan çok Kuzey Afrika çöl tozlarının etkisinde kıtasal taşınımların olduğu tespit edilmiştir. Küme analizleri sonucunda ise, ölçülen yüksek konsantrasyonlu PM₁₀ seviyelerinin lokal kaynaklardan çok kıtasal taşınımların rol oynadığı özellikle Akdeniz üzerinden Kuzey Afrika çöl bölgelerinden gelen çöl tozlarının etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yine küme analizleri sonucunda, küçümsenemeyecek oranda Doğu Avrupa üzerinden de özellikle Bulgaristan'ın güney doğu bölümünde kömür yakmalı termik santrallerin yoğun olarak bulunduğu yerlerden taşınımların olduğu da düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Balıkesir, Cluster, CWT, HYSPLIT, PM₁₀, Theil-Sen

Abstract

In this study, the changes in particulate matter (PM₁₀) levels in downtown Balıkesir, located in the south of the Marmara region, were examined with statistical and spatial analyzes between 2019 and 2021 of the the pandemic period. As a result of the analysis of PM₁₀ and meteorological parameters that were continuously measured in Balıkesir, the year of 2021 which coincides with the middle of the pandemic period, has been recorded as the time period with the highest PM₁₀ levels were observed. Especially, the number of days that exceeded the legal limit in 2020 and 2021 were reported as three-digit numbers throughout the years. As a result of concentration-weighted trajectory (CWT) analysis, North African desert dust rather than local sources that were more effective for Balıkesir downtown when the highest daily PM₁₀ level was measured on January 21st, 2021. As a result of the cluster analysis, it was determined that the high concentration PM₁₀ levels measured, as in the CWT analyzes, were influenced by continental transport rather than local sources, especially the desert dusts coming from the desert regions of North Africa over the Mediterranean Sea. In addition, as a result of the cluster analysis, it has been determined that there are transports from Eastern Europe, especially in the southeastern part of Bulgaria, from places where coal-fired thermal power plants are densely located.

Keywords: Balıkesir, Cluster, CWT, HYSPLIT, PM₁₀, Theil-Sen

* Atilla MUTLU; amutlu@balikesir.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Günlük hayatımızda ve yoğun yaşam temposunda, hava kirliliğine maruz kalmak hem yetişkinlerde ve hem de çocuklarda solunum ve kardiyovasküler hastalıklar dahil olmak üzere olumsuz sağlık etkilerine yol açabilir (Çapraz vd., 2017; Ansari & Ehrampoush, 2019; Zhou vd., 2019; Chang vd., 2020). 2019 yılı sonu itibariyle, dünyanın yüz yüze kaldığı pandemi süresince yetkililer tarafından, solunum yolu hastalıkları gibi önceden belirli kronik sağlık sorunları olan vatandaşların COVID-19'a karşı artan bir savunmasızlığa sahip olabileceği konusunda uyarılar yapılmıştır (EEA, 2020, 2021; WHO, 2021).

COVID-19 karantinalarının en belirgin çevresel etkilerinden biri, dünyanın en düşük hava kalitesine sahip şehirlerinden bazılarında hava kalitesinde kısa vadede önemli iyileşmelerin olmasıdır. Örneğin, partikül madde (PM₁₀) konsantrasyonları da bu dönemde Avrupa genelinde azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir (EEA, 2020). Pandemi döneminin başlaması ile birlikte bilim insanları, hava kirliliğinin COVID-19'un şiddetine olan etkilerini araştırmaktadırlar. Yang vd. (2020) yapmış oldukları bir çalışmada, hava kirliliğine uzun süreli maruz kalmanın insanların COVID-19 riskine karşı hassasiyetlerinin artabileceğini ifade ederken, Sciomer vd. (2020) bir başka çalışmada ise, uzun süreli partikül maddeye (PM₁₀) maruz kalmanın, solunum yolu virüslerinin vücut içerisinde etkilerinin artırdığını belirtmiştir. Hava kirliliği ile COVID-19 için yüksek ölüm oranları arasındaki bağlantılara ait bir başka çalışmada ise Conticini vd. (2020) PM₁₀ ve diğer kirleticilerin de neden olduğu hava kirliliğine uzun süreli maruz kalmanın üst solunum yollarının bağışıklık savunmasını zayıflattığını, bunun SARS-CoV-2'nin vücuda girmesini kolaylaştıracağını belirtmişlerdir.

Sürekli yapılan ölçümlerle birlikte partikül madde konsantrasyonlarında bir düşüş gözlemlense de Avrupa şehirlerinde henüz tutarlı bir azalma görülememektedir. Bunun nedeni, muhtemelen, Avrupa düzeyinde konut, ticari ve kurumsal binaların ısıtılması için fosil yakıtların yanması, endüstriyel faaliyetler, karayolu trafiği, doğal faaliyetler (örneğin, çöl tozları taşınım) dahil olmak üzere lokal ve geniş ölçekli olarak kıtasal kirletici kaynaklarının halen aktif olmasıdır (EEA, 2021).

Hava koşulları gibi diğer faktörler de kirletici konsantrasyonlarında görülen azalmalara önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Tersine, meteorolojik koşullardaki değişiklikler ayrıca lokal ve bölgesel alanlarda hava kirliliğinin artmasına yol açabilir. Hava kirletici emisyonlardaki değişiklikler ile gözlemlenen kirletici konsantrasyonlardaki değişiklikler arasındaki ilişkilerin genellikle doğrusal olmaması her noktada benzer hava kirliliği seviyelerinin oluşmadığını açıklayabilir.

Bu çalışmada, ülkemizin Marmara bölgesinin güneyinde bulunan Balıkesir kent merkezine ait başlıca hava kirleticilerinden olan PM₁₀ seviyelerinin pandemi dönemini kapsayan 2019 ile 2021 yılları arasında değişimlerinin incelenmesi ve ortaya çıkan sonuçların irdelenmesi amaç edilmiştir.

2. Materyal ve metod

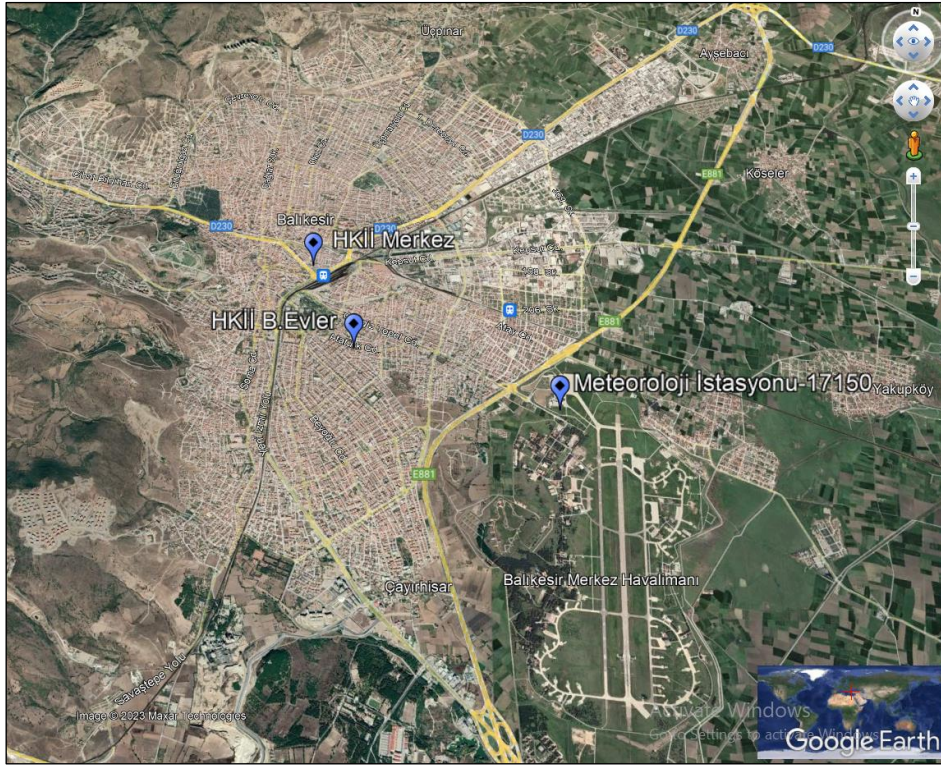
2. Material and method

Çalışma kapsamında, çalışma alanı olarak Balıkesir il merkezi ile bilgiler verilmiştir. Pandemi dönemine ait PM₁₀ seviyelerinin irdelenmesi için yapılmış olan istatistiksel ve mekânsal analizlerin açıklamaları da bu bölümde sunulmuştur.

2.1. Çalışma alanı

2.1. Study area

Çalışma alanı olarak tanımlanan Balıkesir il merkezi Marmara bölgesinin güneyinde yer alır. İlin kuzeyinde Bandırma ve Marmara Denizi, güneyinde Manisa ve İzmir, doğusunda Bursa ile batısında Ege Denizi ve Çanakkale illeri ile çevrilidir. Bu konumu ile Balıkesir, İstanbul-Bursa-İzmir hattında ulaşım yoğunluğu açısından önemli bir geçiş noktasındadır. İlin nüfusu, 2020 yılı verilerine göre, yaklaşık 1.300.000 civarındadır (TÜİK, 2021). Balıkesir il merkezinin genel ve şehir merkezi görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Balıkesir ili genel ve şehir merkezi görünümüleri (Google Earth)
Figure 1. City province and downtown views of Balıkesir (Google Earth)

Balıkesir ilini çevreleyen tepelerin oluşturduğu yarım çanak şeklindeki topoğrafik yapısı ve kış aylarında mevcut rüzgarların azalması nedeniyle hava kirliliği daha fazla önem kazanmıştır (THEP, 2019). Şehirdeki hava kalitesi seviyelerini olumsuz etkileyen faktörler, şehir merkezinin topoğrafik yapısı, meteorolojik koşullar, plansız şehirleşme, kullanılan yakıtın kalitesizliği, sanayi ve trafik faaliyetleridir (THEP, 2019). İl merkezinde, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü sorumluluğunda konvansiyonel aktif olarak faaliyet gösteren iki adet Hava Kalitesi İzleme İstasyonu (HKİİ) bulunmaktadır. Mevcut istasyonlardan bir tanesi Bahçelievler semtinde bulunan Meteoroloji İl Müdürlüğü bahçesinde konuşlandırılmış olup evsel kaynaklı emisyonları ölçerken ve diğer HKİİ ise şehir merkezinde olup daha çok ulaşım ve civarda bulunan konut, işyeri ve kurumlardan olabilecek ısınma kaynaklı emisyon ölçümleri yapmaktadır. Çalışmada kullanılan PM_{10} verileri Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na ait Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) veri tabanları kullanılarak şehir merkezinde konuşlandırılan HKİİ verileri temin edilmiştir. Çalışma bölgesine ait meteoroloji verileri ise şehir merkezinde bulunan hava üssündeki meteoroloji gözlem istasyonundan (WMO# 17150) 2019-2021 yıllarını kapsayacak şekilde temin edilmiştir. Sürekli ölçüm yapan HKİİ konumları, yerel havaalanında bulunan meteoroloji istasyonu ve şehir merkezi Şekil 1'de gösterilmektedir.

2.2. Veriler

2.2. Data

Bu çalışmada, 2019-2021 yılları pandemi dönemini kapsayan yıllar arasında hava kirleticisi olarak günlük PM_{10} verileri şehir merkezinde yer alan HKİİ'dan elde edilmiştir. Hava kalitesi verilerine ek olarak, yerel hava üssündeki meteoroloji istasyonundan sıcaklık ($^{\circ}C$), rüzgâr hızı (m/sn), nisbi nem (%) ve basınç (hPa) dahil olmak üzere meteorolojik parametreler elde edilmiştir. Hava kalitesi ölçüm yeri ve meteoroloji istasyonunun konumları Şekil 1'de sunulmuştur.

2.3. Veri analizleri

2.3. Data analyses

Bu çalışmada, 2019-2021 yılları pandemi dönemini kapsayan yıllar arasında hava kirleticisi olarak günlük PM_{10} verileri şehir merkezinde yer alan HKİİ'dan elde edilmiştir. Hava kalitesi verilerine ek olarak, yerel hava üssündeki meteoroloji istasyonundan sıcaklık ($^{\circ}C$), rüzgâr hızı (m/sn), nisbi nem (%) ve basınç (hPa) dahil

olmak üzere meteorolojik parametreler elde edilmiştir. Hava kirleticisi (PM_{10}) ve meteoroloji verilerinin genel tanımlayıcı istatistikleri (ortalama, minimum/maksimum değerler, %95 önem düzeyinde güven aralıkları ve standart sapma değeri) hesaplanmış ve Tablo 1’de sunulmuştur.

Hava kirleticiler için eğilimlerin (trend) hesaplanması önemli uygulamalardan biridir. Trend analizleri, kirletici konsantrasyonların zaman dilimleri içinde nasıl değişmiş olabileceği hakkında genel bir fikir vermesi bakımından yararlıdır. Theil-Sen trend analizi de bu amaçla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, veri kümesinde tüm nokta çiftleri arasındaki eğimler ayrı ayrı hesaplanır. Veri kümesinin uzunluğu arttıkça eğim sayıları da artış göstermektedir. Theil-Sen’in trend tahmini, tüm bu eğilimlerin medyanı değerini ifade etmektedir. Theil-Sen analizi normal olmayan veriler ve sabit olmayan hata varyansına sahip veriler üzerinde de doğru güven aralıkları vermektedir (Carslaw & Ropkins, 2012; Carslaw, 2015). Theil-Sen analizleri R ortamlarında değerlendirilmiştir ve sonuçlar Bulgular kısmında sunulmuştur.

Yine hava kirleticisi ve meteoroloji veri setleri arasında çoklu regresyon analizi yapılarak, incelenen bölgedeki her bir meteorolojik faktörün ölçülen hava kirleticisine ait değişimler üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. İlgili regresyon analizleri için SPSS istatistiksel analiz programı kullanılmıştır (IBM-SPSS, 2016).

Bu çalışmada ayrıca il merkezinde ölçülen yüksek PM_{10} seviyelerine etki eden kaynakların belirlenmesi için HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) (NOAA, 2021) algoritması ile birlikte konsantrasyon ağırlıklı taşınım analizi (CWT- Concentration Weighted Trajectory) ve kaynak küme analizi (cluster analysis) yapılmıştır (Wang vd., 2009). HYSPLIT modeli, orman yangınları, sel felaketleri, taşkın afetleri ve hava kirliliği epizot çalışmalarında olayın gerçekleşme tarihinde ve belirli zaman dilimi öncesinde (back-trajectory) atmosferik koşulların özellikleri hakkında bilgi elde edilebilen bir model olarak daha önceki araştırmalarda yaygın olarak kullanılmıştır (Durmuş, 2016; Balcılar, 2018; Mutlu, 2019; Canpolat vd., 2020; Oğuz vd., 2021).

Konsantrasyon ağırlıklı taşınım analizi (CWT) ve kaynak küme analizi (cluster analysis), çalışma dönemini kapsayan 2019-2021 yılları arasında ölçülen en yüksek PM_{10} seviyeleri için hava kütlesi taşınım modeli oluşturulmuştur. Kullanılan bu modelde, düşey hareket (vertical motion) modeli seçilerek, en yüksek PM_{10} seviyelerinin ölçüldüğü epizot tarihinden geriye doğru son 72 saat içerisinde olan hava taşınımları incelenmiştir. Modelde yörünge yükseklikleri olarak yeryüzüne en yakın ölçüm seviyesi olan 500 m seçilmiştir. HYSPLIT modeli altında kullanılan küme ve CWT analizlerinde kullanılan meteorolojik veri seti, NCEP (National Centers for Environmental Prediction) tarafından oluşturulan GDAS (Global Data Assimilation System) veri tabanları içerisinde, 0,5 derecelik gridler halinde kullanılmıştır.

Ölçülen en yüksek PM_{10} seviyelerinin potansiyel kaynak etkilerini belirlemek için konsantrasyon ağırlıklı yörüngeleri oluşturan CWT analizi ve potansiyel kaynak gruplarını içeren bir küme analizi (cluster analysis) web tabanlı TrajStat algoritması Wang vd. (2009) tarafından yapılmıştır. Analiz sonuçları Bulgular ve tartışma bölümünde detaylı olarak sunulmuştur.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Bu çalışmada, 2019-2021 yılları pandemi dönemini kapsayan yıllar arasında hava kirleticisi olarak şehir merkezine ait günlük PM_{10} seviyeleri ile ilgili değişimler ve bu değişimlere neden olan etkilerin istatistiksel ve mekânsal analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

3.1. PM_{10} ve meteoroloji parametrelerinin genel istatistikleri

3.1. General statistics of PM_{10} and meteorological parameters

Çalışma dönemini kapsayan 2019-2021 yılları arasındaki PM_{10} ve meteoroloji parametrelerine, sıcaklık ($^{\circ}C$), rüzgar hızı (m/sn), nisbi nem (%) ve basınç (hPa), ait genel tanımlayıcı istatistikler (yıllık ortalama değerler, %95 önem düzeyinde ortalama değerler için güven aralıkları, verilere ait değişim aralıkları (minimum/maksimum) ve standart sapma) Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Yıllara göre PM₁₀ ve meteorolojik verilerin genel istatistikleri
Table 1. General statistics of PM₁₀ and meteorological data by years

Yıllar	İstatistiksel tanımlayıcı parametreler	Hava kalitesi parametresi	Meteorolojik parametreler			
		PM ₁₀ (µg/m ³)	t (°C)	ws (m/sn)	rh (%)	p (hPa)
2019	Ortalama	56	15,4	2,9	73	1003
	Güven aralığı*	52-60	15-16	2,6-3,1	72-74	1002,7-1003,7
	Değişim aralığı (min/maks)	8/263	-1/29	0/11	43/99	988/1018
	Standart sapma	40	8	2,4	13	5
	N	365	365	365	365	365
2020	Ortalama	51	15,3	11,3	91	1006
	Güven aralığı*	47-55	14,5-16	10,8-11,7	90-91	1005,3-1005,7
	Değişim aralığı (min/maks)	8/232	-2/28	2,6/22,6	63	992/1027
	Standart sapma	37	8	4	99	6
	N	366	366	366	366	366
2021	Ortalama	57	15,1	11,4	92	1006
	Güven aralığı*	53-61	14-16	11-11,9	91-93	1005,2-1005,1
	Değişim aralığı (min/maks)	9/280	-8/30	2,1/28,8	64/99	992/1020,8
	Standart sapma	42	8	4,3	8	5
	N	364	364	364	364	364

* %95 önem düzeyinde ortalamanın sahip olduğu alt ve üst limit değerler
N: veri sayısı

Tablo 1’de sunulduğu üzere, Şehir merkezinde ölçülen yıllara ait PM₁₀ seviyelerinin en yüksek ortalama değeri 2021 yılında yaklaşık 57 µg/m³ olarak ölçülmüştür. İkinci en yüksek PM₁₀ seviyesi ortalama değeri 2019 yılında yaklaşık 56 µg/m³ ve en düşük PM₁₀ seviyesi ortalama değeri 2020 yılında yaklaşık 51 µg/m³ olarak ölçülmüştür.

Çalışma periyodu süresince ölçülen en yüksek günlük PM₁₀ konsantrasyonu yaklaşık 280 µg/m³ seviyesinde 2021 yılında gözlenmiş olup, ölçülen bu pik değere lokal ya da bölgesel kaynakların etkisinde olup olmadığı sonraki bölümlerde ileri düzey mekânsal analizler yapılarak irdelenmiştir. En düşük yıllık ortalama PM₁₀ konsantrasyonu 2020 yılında 51 µg/m³ ve ortalamaya ait güven aralıkları ise 47 µg/m³ ve 55 µg/m³ aralığında hesaplanmıştır.

Çalışma alanını etkileyen yıllık sıcaklık ortalamalar birbirine yakın seviyelerde gözlemlenirken, rüzgar hızında 2020 ve 2021 yılları arasında 11 m/sn civarında gözlenmiş olup, 2019 yılına kıyasla oldukça yüksek esme hızları gözlenmiştir. Yine 2020 ve 2021 yıllarında, nisbi nem ve basınç parametreleri için de aynı seviye değişimlerinin oluştuğu ifade edilebilir.

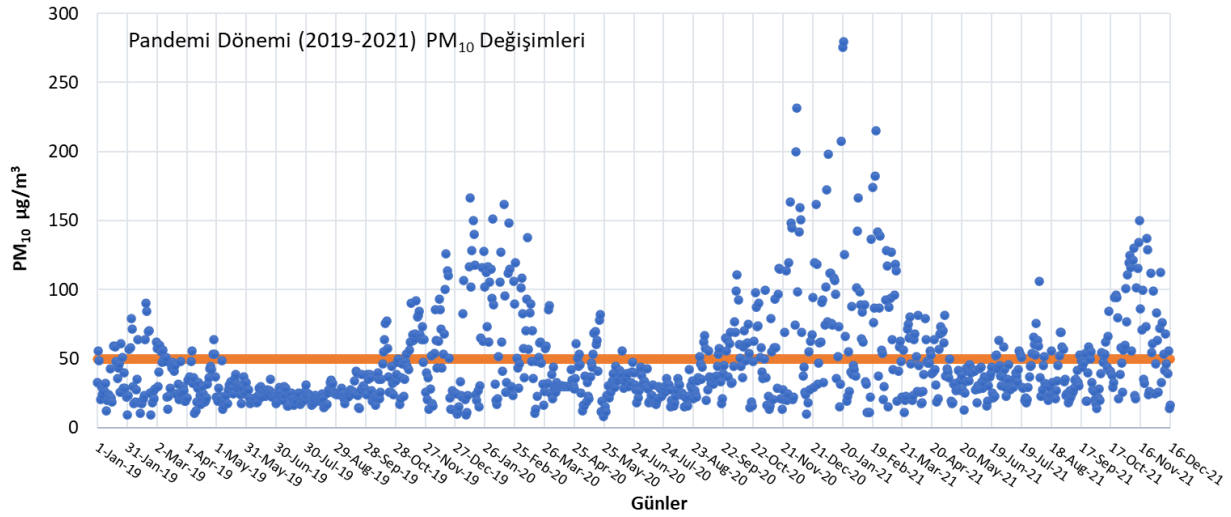
3.2. Yüksek seviyeli PM₁₀ analizleri

3.2. Analyses of high level of PM₁₀

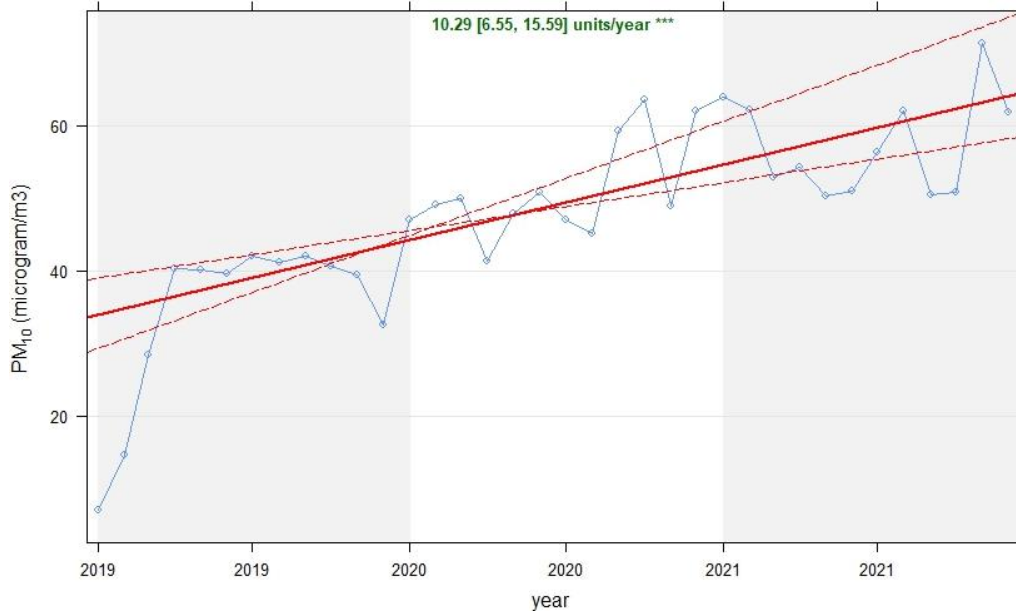
Çalışma dönemini kapsayan 2019 ile 2021 yılları zaman dilimine ait PM₁₀ seviyelerinin değişimleri Şekil 2’de sunulmuştur. Hava kalitesi değerlendirme ve yönetimi yönetmeliğince (HKDYY, 2008) belirtilen, 24 saatlik yasal sınır olan 50 µg/m³ seviyesinin üzerinde olan sınır aşımının özellikle 2021 yılında daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. Diğer zaman dilimleri olan 2020 ve 2021 yıllarında da yine yasal sınır aşımının olduğu gözlemlenmiştir.

Pandemi döneminde, ölçülen en yüksek PM₁₀ seviyeleri 2021 yılında gözlemlenmiştir. En yüksek seviyeler, 21.01.2021 günü yaklaşık 280 µg/m³ ve 20.01.2021 günü 276 µg/m³ olarak ölçülmüştür.

Çalışma dönemini kapsayan yıllara ait trend analizi, kirletici konsantrasyonların zaman dilimleri içinde nasıl değişmiş olabileceği hakkında genel bir fikir vermesi bakımından önemlidir. Bu amaçla Theil-Sen trend analizi R ortamında yapılarak, elde edilen trend analizi sonucu Şekil 3’te paylaşılmıştır.



Şekil 2. Pandemi dönemi PM₁₀ değişimleri
Figure 2. PM₁₀ changes in the pandemic period

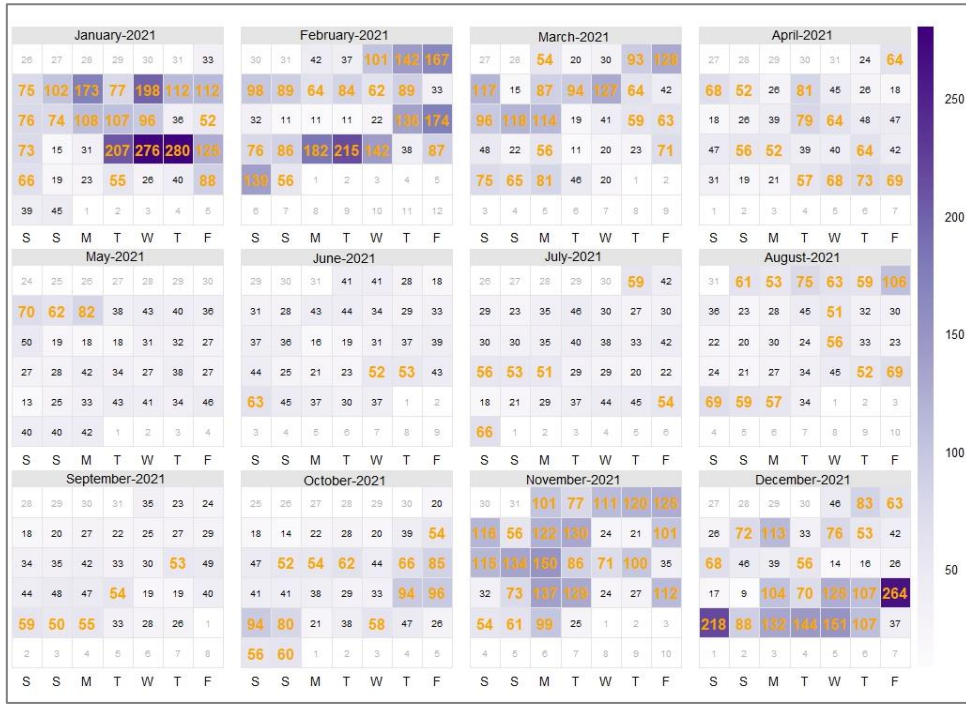


Şekil 3. Pandemi dönemi boyunca PM₁₀ trendi
Figure 3. PM₁₀ trend during the pandemic period

Theil-Sen trend analizi sonucuna göre, yıllar baz alındığında PM₁₀ seviyelerinde gözle görülür bir artış olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucuna göre PM₁₀ seviyelerinde yıllık ortalama artış 6,6 µg/m³ ile 15,6 µg/m³ aralığında olup, ortalama tahmin edilen yıllık artış eğilimin pandemi döneminde 10,3 µg/m³ olarak hesaplanmıştır.

Pandemi dönemine ait yasal sınır aşımaları detaylı olarak incelendiğinde, ilgili mevzuata (HKDYY, 2008) göre Ek-1'de ifade edildiği gibi; 24 saatlik PM₁₀ seviyeleri, insan sağlığının korunması için, yasal sınır olan 50 µg/m³ seviyesini bir yıl boyunca 35 defadan fazla aşılmaması gerekmektedir. Yasal sınır aşımın sayıları kıyaslandığında en yüksek sınır aşımı 2020 ve 2021 yıllarında üç haneli rakamlar ile ifade edilmiştir. Şöyle ki, en yüksek PM₁₀ seviyelerinin ölçüldüğü 2021 yılında toplam 156 kez yasal sınır aşımı gerçekleşmiştir. Bir sonraki aşımın ise 132 kez olarak 2020 yılında olduğu tespit edilirken, 2019 yılında ise 62 kez olarak kaydedilmiştir.

Bu nedenle en yüksek PM₁₀ seviyelerinin ölçüldüğü ve aynı zamanda en yüksek yasal sınırı aşma sayılarının tespit edildiği 2021 yılı detaylı olarak incelenmiştir. Söz konusu yıla ait R ortamında oluşturulan ve günlük PM₁₀ ölçüm değerlerini gösteren yıllık kirlilik takvimi Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. 2021 yılına ait PM₁₀ takvimi
Figure 4. PM₁₀ calendar for 2021

Oluşturulan PM₁₀ takvimine göre, beklenildiği üzere en yüksek PM₁₀ seviyeleri Ocak, Şubat ve Aralık aylarını kapsayan soğuk mevsimlerde ölçülmüştür. Ölçülen yüksek PM₁₀ seviyelerine, havaların soğuması ile artan ısınma ihtiyacı, daha yoğun olarak kullanılan ulaşım araçları ve çalışma alanında var olan sanayi işletmelerinin rutin faaliyetlerini kapsayan lokal kaynakların etkili olabileceği gibi, daha uzak bölgelerden olabilecek kirletici taşınımların da kıtasal kaynak etkisinde ölçülen yüksek PM₁₀ seviyelerinin nedeni olabilmektedir.

Küresel olarak, Pandemi döneminde karantina ve kısıtlama süreleri nedeniyle azalan dış ortam aktiviteleri, ulaşım ve hatta sanayi faaliyetleri neticesinde antropojenik kaynaklı faaliyetlerin azalması ve her kesimden insanların evlerinde geçirdikleri zaman miktarının artması nedeniyle hava kirleticileri seviyelerinde azalma dolayısıyla hava kalitesinde artış olduğu farklı ülkelerde yapılan çalışmalar ile rapor edilmiştir (Li vd., 2020; Sharma vd., 2020; Xu vd., 2020; EEA, 2023). Avrupa Çevre Ajansı raporuna göre; Covid-19 pandemi dönemini kapsayan zaman diliminde, Avrupa'nın ülkemize yakın olan bölgelerindeki ülkelere Bulgaristan, Yunanistan, Macaristan, İtalya, Polonya ve Hırvatistan başkentlerinde yapılan PM₁₀ ölçümlerinde 2019 yıllarında yaklaşık 30-40 µg/m³ aralığında başlayan PM₁₀ seviyelerinin 2021 yılı sonunda yaklaşık %10 azalarak 25-35 µg/m³ aralığında ölçüldüğü ifade edilmiştir (EEA, 2023). Seo vd. (2020) yapmış oldukları bir başka çalışmada, Güney Kore'de Covid19 pandemisi boyunca PM₁₀ seviyelerinin yaklaşık %61 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Benzer olarak, Debone vd. (2020) yaptıkları çalışmada, Brezilya'nın Sao Palo metropol şehrinde PM₁₀ seviyelerinin %46 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Yine bir başka benzer çalışmada ise, Çin'in endüstriyel bölgesinden olan Yangtze River Delta bölgesinde, pandemi dönemi boyunca PM₁₀ seviyelerinde yaklaşık %20 oranında bir azalmanın olduğu rapor edilmiştir (Li vd., 2020).

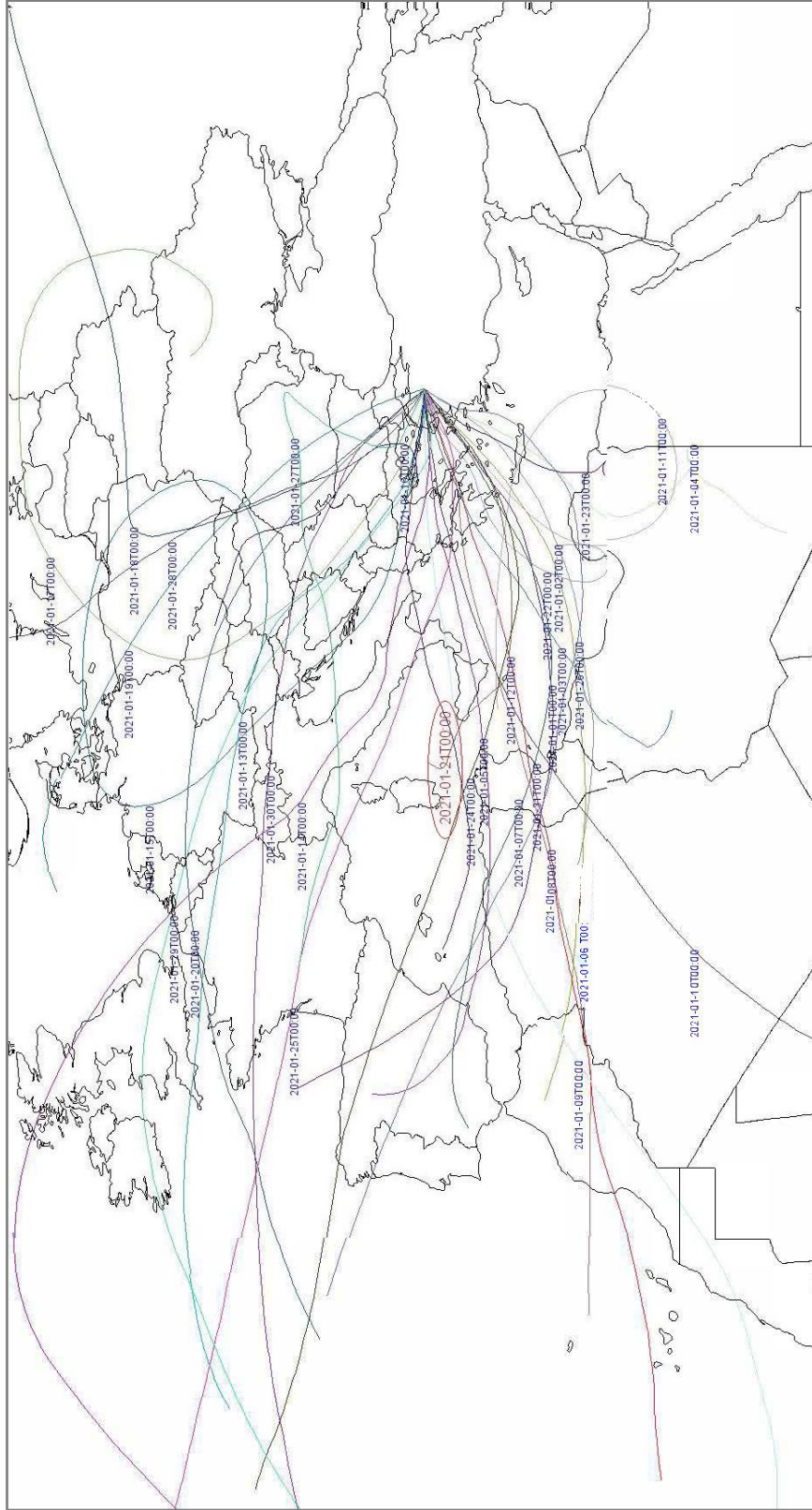
3.2. CWT ve kaynak küme (cluster) analizleri

3.2. Analyses of CWT and cluster

Söz konusu yıl içinde, ölçülen PM₁₀ seviyelerinin potansiyel kaynak etkilerini belirlemek için konsantrasyon ağırlıklı yörüngeleri oluşturan CWT analizi ve potansiyel kaynak gruplarını içeren bir küme analizi (cluster analysis) yapılmıştır.

Konsantrasyon ağırlıklı yörünge (CWT) analizi birçok hava kirliliği çalışmalarında kullanılmıştır. CWT analizi, çalışma alanında ölçülen PM₁₀ seviyelerine etki eden lokal veya bölgesel kaynak alanlarını belirlemek için yapılmıştır. CWT analizlerinde, her bir grid hücresinde hem meteorolojik hem de PM₁₀ ölçüm verilerinin ağırlıklı ortalama değerlerini kullanarak analizin yapıldığı hedef alıcı noktaya karşılık gelen geriye dönük

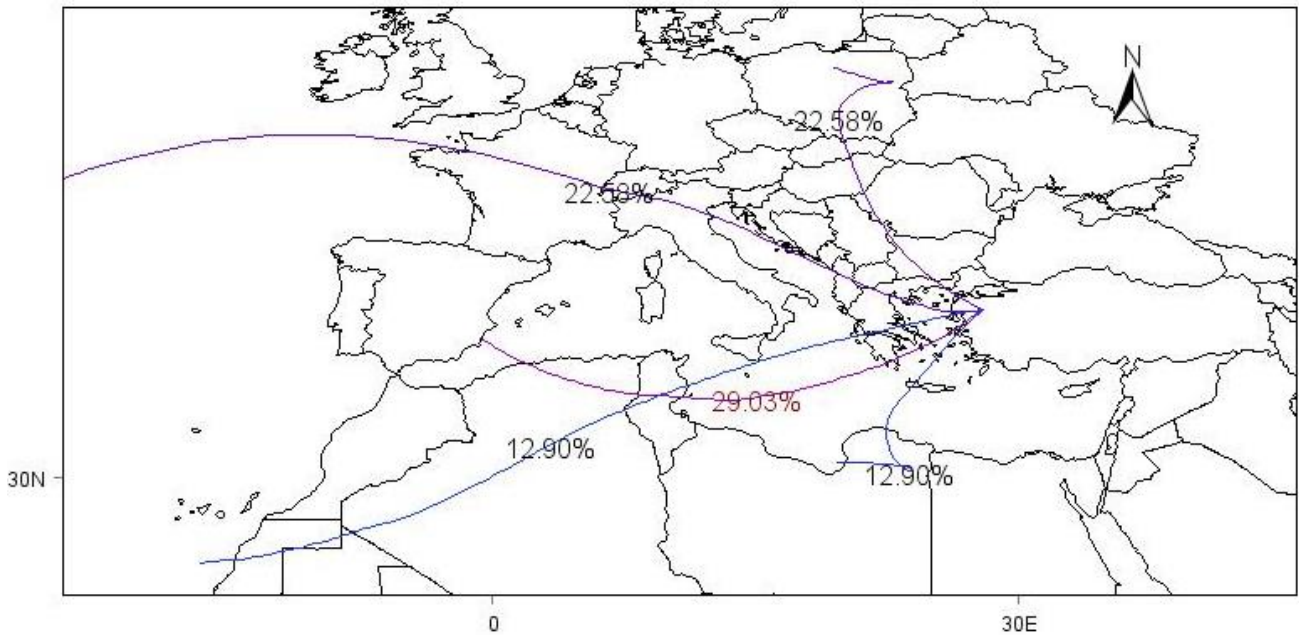
yörüngeler atanır. Varış zamanı konsantrasyonuna bağlı olarak geriye doğru olarak taşınım yörüngesindeki ortalama ve logaritmik ortalama ölçekli PM_{10} konsantrasyonu hesaplanır ve her grid hücresinde kalma süresi için bir ağırlıklı ortalama değeri temsil eder (Yılmaz, 2010; Szulecka vd., 2017; Dumka vd., 2019; Pandolfi vd., 2020). CWT sonuçları Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. CWT sonucuna göre 2021 yılına ait PM_{10} taşınımları
Figure 5. PM_{10} trajectories for 2021 according to CWT result

CWT analizi sonucuna göre, önemli PM₁₀ taşınım yolları sırasıyla yerel, Avrupa kıtasının Güney-Doğu kesimleri ve Afrika'nın kuzey kısımları olarak tanımlanabilir. Şekil 6'da kırmızı renk elips şekli ile gösterildiği üzere, en yüksek, ekstrem PM₁₀ seviyesinin ölçüldüğü 21.Ocak.2021 günü için PM₁₀ taşınımlarının lokal etkiden çok Akdeniz üzerinden, Kuzey Afrika bölgesi orijinli kıtasal çöl tozları taşınımlarının olduğu ifade edilebilir.

Genel olarak çalışma bölgesinde, uzun vadeli PM₁₀ seviyeleri, çalışma alanı dışından birkaç bölgesel PM₁₀ taşınımları haricinde lokal faaliyetler nedeniyle oluşmuş olabilir. HYSPLIT modelleri ayrıca yerel bölgelerdeki yüksek PM₁₀ seviyelerine katkıda bulunmuş olabilecek uzun mesafeli etkili olan kaynakları da gösterir. Wang vd. (2009) tarafından belirtildiği gibi küme analizi (cluster analysis), çalışma alanındaki yerel kaynaklara karşı bölgesel kaynaklar için üst düzey kümelerle ilişkili PM₁₀ taşınım yörüngelerini belirlemek için kullanılabilir. Çalışma bölgesine ait, 2021 yılı için PM₁₀ kümelerinin yörüngeleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. 2021 yılına ait PM₁₀ küme analizi sonuçları

Figure 6. Cluster analysis results for PM₁₀ in 2021

Şekil 6'da gösterildiği gibi, kırmızı renkli küme yaklaşık %29 oranında Akdeniz üzerinden Kuzey Afrika kıtasından, muhtemelen çöl tozları taşınımı ile en yüksek PM₁₀ katkısının olduğunu göstermektedir. Genel olarak ifade etmek gerekirse, 2021 yılı için, çalışma bölgesine yaklaşık %55 oranında Kuzey Afrika'da ve ayrıca Arap Yarımadası'nın kuzey kesiminde bulunan çöllerin etkili olduğu, geri kalan taşınımların ise yaklaşık %45 oranında Güneydoğu Avrupa'dan Bulgaristan ve Yunanistan üzerinden PM₁₀ taşınımlarının olduğu söylenebilir. 2021 yılı için lokal kaynaklardan PM₁₀ seviyelerine önemli bir katkı tespit edilmemiştir. Burada dikkate edilmesi gereken husus, çalışma bölgesine dönem dönem Kuzey Afrika çölllerinden taşınımların olmasının yanında, Bulgaristan'ın güneydoğu kesiminde bulunan elektrik üretimi amacıyla kullanılan, kömür yakıtlı termik santraller bölgesi üzerinden yaklaşık %23 oranında PM₁₀ taşınımının gerçekleşmiş olmasıdır. Daha önce, Mutlu (2019) tarafından yapılmış olan çalışmada, yine aynı çalışma bölgesi için Kuzey Afrika çölllerinden PM₁₀ taşınımlarının etkili olacağı gibi, özellikle Bulgaristan üzerinden SO₂ ile birlikte PM₁₀ taşınımlarının da etkili olabileceği belirtilmiştir.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada, ülkemizin Marmara bölgesinin güneyinde ve İstanbul-Bursa-İzmir metropollerinin ulaşım hattı üzerinde bulunan Balıkesir kent merkezine ait başlıca hava kirleticilerinden olan PM₁₀ seviyelerinin pandemi dönemini kapsayan 2019 ile 2021 yılları arasında değişimleri istatistiksel ve mekânsal analizler ile incelenmiştir.

Pandemi döneminde, karantina ve kısıtlama süreleri nedeniyle azalan dış ortam aktiviteleri, ulaşım ve hatta sanayi faaliyetleri neticesinde Avrupa ve diğer bölgelerde hava kirleticilerine ait seviyelerde önemli azalmalar gözlenmiş olsa da bu değişimler kalıcı olmamıştır.

Balıkesir il merkezinde sürekli ölçülen hava kirleticileri ve meteorolojik parametrelerin analizleri sonucunda pandemi dönemi ortasına denk gelen 2021 yılı PM₁₀ seviyelerinin en yüksek olduğu zaman dilimi olarak kayıtlara geçmiştir. Özellikle 2019 yılı sonlarından itibaren PM₁₀ seviyelerinde belirgin bir azalma beklenirken, aksine 2020 ve 2021 yıllarında yasal limit aşımı gözlemlenen gün sayıları üç basamaklı olarak yüzeler seviyesinde ifade edilmektedir. Bu nedenle, pandemi döneminde çalışma bölgesinde beklentilerin aksine PM₁₀ seviyelerindeki artış dikkat çekicidir ve bu artışa neden olan bölgesel veya global kaynak etkilerini belirlemek önem arz etmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan CWT analizleri sonucunda, en yüksek yıllık ortalamanın gözlemlendiği 2021 yılı içinde yine en yüksek günlük PM₁₀ seviyesinin ölçüldüğü gün olan 21.Ocak.2021 tarihinde Balıkesir il merkezi için etkili olan kaynakların lokal kaynaklardan çok Kuzey Afrika çöl tozlarının etkisinde kıtasal taşınımların olduğu tespit edilmiştir. Küme analizleri sonucunda, ölçülen yüksek konsantrasyonlu PM₁₀ seviyelerinin yine CWT analizlerinde olduğu gibi lokal kaynaklardan çok kıtasal taşınımların rol oynadığı özellikle Akdeniz üzerinden Kuzey Afrika çöl bölgelerinden gelen çöl tozlarının etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yine küme analizleri sonucunda, küçümsenemeyecek oranda Doğu Avrupa üzerinden de özellikle Bulgaristan'ın güney doğu bölümünde kömür yakmalı termik santrallerin yoğun olarak bulunduğu yerlerden taşınımların olduğu da tespit edilmiştir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışmanın yapılmasında önemli yer tutan verilerin sağlanmasında desteklerini esirgemeyen Balıkesir Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü ve ayrıca Balıkesir Valiliği Meteoroloji İl Müdürlüğü yetkilerine teşekkürlerimi sunarım. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkürlerimi sunarım.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazar makale konusun oluşumunda, verilerin temini ve analiz edilmesi, makale bölümlerinin kaleme alınması aşamalarında görev almıştır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Ansari, M., & Ehrampoush, M. H. (2019). Meteorological correlates and AirQ+ health risk assessment of ambient fine particulate matter in Tehran, Iran. *Environmental Research*, 170, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.046>
- Balcılar, İ. (2018). *Chemical composition of atmospheric particles as a tool to identify sources affecting aerosol population in the eastern black sea atmosphere* [Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Canpolat, E., Dinç, Y., Usun, Ç. F., & Geçen, R. (2020). 25.09.2014 tarihinde Erzincan'da (Hatay) meydana gelen sel ve taşkın oluşumunda coğrafi faktörlerin değerlendirilmesi. *Coğrafya Dergisi*, 41, 129-146. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2020-0048>
- Çapraz, Ö., Deniz, A., & Doğan, N. (2017). Effects of air pollution on respiratory hospital admissions in İstanbul, Turkey, 2013 to 2015. *Chemosphere*, 181, 544-550. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.105>
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair — an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Carslaw, D. C. (2015). *The open-air manual — open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 1.1-4*. King's College London, United Kingdom. https://technodocbox.com/C_and_CPP/68023243-The-openair-manual-open-source-tools-for-analysing-air-pollution-data.html.
- Chang, Q., Zhang, H., & Zhao, Y. (2020). Ambient air pollution and daily hospital admissions for respiratory system-related diseases in a heavy polluted city in Northeast China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 10055-10064. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07678-8>
- Conticini, E., Frediani, B., & Caro, D. (2020). Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy?. *Environmental Pollution*, 261, 114465. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114465>
- Debone, D., da Costa, M. V., & Miraglia, S. G. (2020). 90 days of COVID-19 social distancing and its impacts on air quality and health in Sao Paulo, Brazil. *Sustainability*, 12, 7440.
- Dumka, U. C., Tiwari, S., Kaskaoutis, D. G., Soni, V. K., Safai, P. D., & Attri, S. D. (2019). Aerosol and pollutant characteristics in Delhi during a winter research campaign. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(4), 3771-3794. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3885-y>
- Durmuş, O. (2016). *24 Ağustos 2015 tarihinde Hopa'da ani taşkına neden olan aşırı yağış hadisesinin meteorolojik analizi ve bulut dinamik yapılarının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- EEA, European Environment Agency. (2020). COVID-19 and Europe's environment: impacts of a global pandemic. (2023, 9 Haziran). <https://doi.org/10.2800/626706>.
- EEA, European Environment Agency. (2021). Air quality in Europe 2021. (2023, 9 Haziran). <https://doi.org/10.2800/549289>.
- EEA, European Environment Agency. (2023). Air quality and Covid-19. (2023, 9 Haziran). <https://www.eea.europa.eu/signals/themes/air/air-quality-and-covid19/air-quality-and-covid19>.
- HKDYY, Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. (2008). Hava kalitesi değerlendirme ve yönetimi yönetmeliği. *T.C. Resmi Gazete* (26898, 06 Haziran 2008).
- IBM-SPSS. (2016). IBM Corp. Released 2016. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24.0.
- Li, L., Li, Q., Huang, L., Wang, Q., Zhu, A., Xu, J., Liu, Z., Li, H., Shi, L., Li, R., Azari, M., Wang, Y., Zhang, X., Liu, Z., Zhu, Y., Zhang, K., Xue, S., Ooi, M. C. G., Zhang, D., & Chan, A. (2020). Air quality changes during the COVID-19 lockdown over the Yangtze River Delta Region: An insight into the impact of human activity pattern changes on air pollution variation. *The Science of The Total Environment*, 732, 139282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139282>
- Mutlu, A. (2019). Hava kalitesi ve meteoroloji: korelasyon, trend ve epizot analizleri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(4), 724-741. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.563848>
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). *HYSPLIT Description*. (2023, 9 Haziran). <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/>
- Oğuz, K., Oğuz, E., & Çamalan, G. (2021). İzmir-Tırazlı orman yangınının uydu ve model verileri ile analizi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(1), 1-12. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1275815>

- Pandolfi, M., Mooibroek, D., Hopke, P., van Pinxteren, D., Querol, X., Herrmann, H., Alastuey, A., Favez, O., Hüglin, C., Perdrix, E., Riffault, V., Sauvage, S., van der Swaluw, E., Tarasova, O., & Colette, A. (2020). Long-range and local air pollution: what can we learn from chemical speciation of particulate matter at paired sites?. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 409-429. <https://doi.org/10.5194/acp-20-409-2020>
- Seo, J. H., Kim, J. S., Yang, J., Yun, H., Roh, M., Kim, J. W., Yu, S., Jeong, N. N., Jeon, H. W., Choi, J. S., & Sohn, J. R. (2020). Changes in air quality during the covid-19 pandemic and associated health benefits in Korea. *Applied Sciences*, 10(23), 8720. <https://doi.org/10.3390/app10238720>
- Sciomer, S., Moscucci, F., Magri, D., Badagliacca, R., Piccirillo, G., & Agostoni, P. (2020). SARS-CoV-2 spread in Northern Italy: what about the pollution role?. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6), 325. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08317-y>
- Sharma, S., Zhang, M., Gao, J., Zhang, H., & Kota, S. H. (2020). Effect of restricted emissions during COVID-19 on air quality in India. *The Science of The Total Environment*, 728, 138878.
- Szulecka, A., Oleniacz, R., & Rzeszutek, M. (2017). Functionality of openair package in air pollution assessment and modeling - A case study of Krakow. *Environmental Protection and Natural Resources*, 28, 22-27. <https://doi.org/10.1515/oszn-2017-0009>
- THEP, Temiz Hava Eylem Planı. (2019). Temiz Hava Eylem Planı: 2013-2019. Balıkesir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2023, 9 Haziran). https://webdosya.csb.gov.tr/db/balikesir/menu/2015-2019-balikesir-temiz-hava-eylem-planı_20190927112216.pdf.
- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu. (2021). Adrese dayalı nüfus kayıt istatistikleri. (2023, 9 Haziran) <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2020-37210>.
- WHO, World Health Organization. (2021). Global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva, Switzerland.
- Wang, Y.Q., Zhang, X. Y., & Draxler, R. (2009). TrajStat: gis-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data. *Environmental Modelling & Software*, 24, 938-939.
- Xu, K., Cui, K., Young, L. H., Wang, Y. F., Hsieh, Y. K., Wan, S., & Zhang, J. (2020). Air quality index, indicator air pollutants and impact of COVID-19 event on the air quality near central China. *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 1204-1221.
- Yang, J., Zheng, Y., Gou, X., Pu, K., Chen, Z., Guo, Q., Ji, R., Wang, H., Wang, Y., & Zhou, Y. (2020). Prevalence of comorbidities and its effects in patients infected with SARS-CoV-2: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Infectious Diseases*, 94, 91-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.017>
- Yıkılmaz, R. F. (2010). *Development of gis based trajectory statistical analysis method to identify potential sources of regional air pollution* [Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Zhou, H., Wang, T., Zhou, F., Liu, Y., Zhao, W., Wang, X., Chen, H., & Cui, Y. (2019). Ambient air pollution and daily hospital admissions for respiratory disease in children in Guiyang, China. *Frontiers in Pediatrics*, 7, 400. <https://doi.org/10.3389/fped.2019.00400>

Kavak ağacı talaşına borik asit impregnasyon ile elde edilmiş aktif karbon (KB-A) ile sulu çözülden ağır metal giderimi

Heavy metal removal from aqueous solution with activated carbon (KB-A) obtained by boric acid impregnation on poplar wood sawdust

Yaşar GENEL *¹ 

¹ Van Yüzüncüyl Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Kimya Eğitimi Bölümü, 65100, Van

• Geliş tarihi / Received: 15.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 26.07.2023

Öz

Bu çalışmada, Van yöresinde yetişen kavak ağacı talaşına (K-S) borik asit impregnasyonu ile elde edilmiş aktif karbon (KB-A) ile atık sulardaki Pb(II), Cr(III), Zn(II) ve Co(II) ağır metallerin uzaklaştırılması çalışıldı. Çalışmada adsorpsiyona etki eden parametreler incelendi ve optimum değerler tespit edildi. Bu amaçla çözelti pH'sı, KB-A miktarı, temas süresi ve metal konsantrasyonu gibi farklı parametrelerin ağır metal uzaklaştırma işlemi üzerinde etkileri incelendi. Adsorpsiyon işlemi sonucunda, çalışılan tüm metallerin adsorpsiyonu, sıcaklık arttıkça azaldığı görüldü. Adsorpsiyonun Langmuir ve Freundlich modellerine uyduğu görüldü. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi değerleri Cr(III) için 30.89 mg g⁻¹, Pb(II) için 30.49 mg g⁻¹, Zn(II) için 30.30 mg g⁻¹ ve Co(II) için 27.70 mg g⁻¹ olduğu belirlendi. Termodinamik parametre sonuçlarına göre, adsorpsiyonun kendiliğinden olduğunu, reaksiyon kinetik olarak yalancı ikinci dereceden modele uyduğu görüldü. KB-A adsorpsiyon kabiliyeti büyükten küçüğe Cr(III) > Pb(II) > Zn(II) > Co(II) şeklinde sıralanan bir eğilim gösterdi.

Anahtar kelimeler: Adsorpsiyon, Aktif karbon, Ağır metal, Etkinleştirme, İzoterm

Abstract

In this study, the removal of heavy metals Pb(II), Cr(III), Zn(II) and Co(II) in wastewater with activated carbon (KB-A) obtained by boric acid impregnation to poplar sawdust (K-S) grown in the Van region was investigated. The parameters affecting adsorption were examined and optimum values were determined. For this purpose, the effects of different parameters such as solution pH, KB-A dosage, contact time and metal concentration were studied for their effects on the removal of heavy metals. As a result of the adsorption process, It was observed that the adsorption of all metals decreased with increasing temperature. The adsorption process was found to follow the Langmuir and Freundlich models. The maximum adsorption capacity values were determined as 30.89 mg g⁻¹ for Cr(III), 30.49 mg g⁻¹ for Pb(II), 30.30 mg g⁻¹ for Zn(II) and 27.70 mg g⁻¹ for Co(II). According to the thermodynamic parameter results, the adsorption process was spontaneous, and the reaction followed a pseudo-second-order kinetic model. The KB-A adsorption ability showed a trend ordered from large to small as Cr(III) > Pb(II) > Zn(II) > Co(II).

Keywords: Adsorption, Activated carbon, Activation, Heavy metal, Isotherm

1. Giriş

1. Introduction

Endüstriyel faaliyetler sonucu, su kaynaklarının toksik etkisi olan ağır metaller tarafından kirlenmesi başlıca çevre sorunlarına neden olmuştur. Hızlı sanayileşme ile birlikte elektrokaplama, metal işleme, madencilik, tekstil ve akü imalat gibi endüstriler, su kaynaklarının ağır metaller tarafından kirlenmesine neden oldu (Nwuchen & Ugoji, 2008). Bu faaliyetler özellikle nehirleri kirletmiş, nehirlerin potansiyel değerlerini ve faydalı kullanımlarını yitirmelerine neden olmuştur (Çelik & Demirbaş, 2005).

Organik kirleticiler canlı sistemlerinde zararlı bileşikler oluşturmadığı halde toksik etkisi olan ağır metaller; canlı sistemlerine zararlı ve canlıların ölümüne neden olan etkileri vardır. Toksik özelliği olan bu maddeler biyolojik zincir boyunca hareket edebilir, böylece insanlara ulaşabilir ve kronik ve akut rahatsızlıklara yol açarak ağır metal toksisitesi, zihinsel ve merkezi sinir fonksiyonlarının hasar görmesine veya azalmasına, daha düşük enerji seviyelerine ve kan uyumuna, akciğerlere, böbreklere, karaciğere ve diğer organlara zarar verebilmektedir (Mier vd., 2000).

Çökeltme, iyon değişimi, fitoekstraksiyon, ultrafiltrasyon, ters ozmoz ve elektro diyaliz dahil olmak üzere çözülmüş ağır metallerin uzaklaştırılması için çok sayıda proses mevcuttur (Zülkaleli vd., 2006). Ponza ile bakır iyonlarının ve kurşun iyonlarının adsorpsiyon karakteristikleri (Bakıcı vd., 2022), Nanopartikülü ve TiO₂/Aktif Çamur Sentezi ile Sulu Çözümlerden Cu (II) İyonlarının Adsorpsiyonu (Çakmak ve Canbaz 2020) yakın zamanda yapılan çalışmalar örnek olarak verilebilir. Kimyasal yöntemler çevre üzerindeki kirlilik yükünü arttırmaktadır. Bu yüzden Adsorpsiyon, basit tasarımı nedeniyle diğer yöntemlere göre avantajlıdır. Turba kömür, ahşap, arpa, pirinç kabuğu, bitki samanı, pirinç kepeği, alg biyokütlesi, muz özü, soya fasulyesi, pamuk tohumu gövdeleri, hümik asitler, ağaç kabuğu, şeker pancarı posası, yapraklar, yeşil algler gibi doğal yenilenebilir kaynaklardan, bitki atıklarından veya endüstriyel yan ürünlerden elde edilen çeşitli malzemeler karbon fiberler, hindistan cevizi atıkları, odun ve saman, eser miktardaki metalleri sudan ayırma yetenekleri açısından araştırılmıştır. Son yıllarda, sinek larva kabukları, odun talaşı, çay atıkları, patates kabukları, ısırğan otu külü, kırmızı çamur, palmye kabuğu, odun külü, fındık kabuğu tarımsal atıklardan hazırlanan aktif karbon, kanalizasyon çamuru külü, pirinç gövdeleri (Krişnani vd., 2008; Teker vd., 1997), likenler (Akçin vd., 2001), iyon değiştiriciler, yüzey aktif madde modifiye montmorillonit, aktif kaolin ve diğer adsorbanlar (Zvinowanda vd., 2009; Chompoothawat vd., 2010) gibi çok sayıda düşük maliyetli doğal malzeme ağır metallerin sudan ve atık sularından uzaklaştırılması için kullanıldı ve araştırıldı (Gürten, 2008). Günümüzde farklı alanlarda kullanılan yapay olarak üretilen adsorbanlardan biri olan aktif karbonun özelliklerine etki eden faktörler vardır. Kullanılan ham maddenin farklı olması, üretim yöntemi, karbon yüzeyinin aktifliğini değiştiren kimyasal maddeler bu işlemlerden bir kaçıdır. Aynı kimyasalla farklı karbonlar üzerinde gözenek yapıları değiştirilebilir. Ayrıca aynı ham madde üzerinde farklı kimyasallar ile farklı yapılar oluşturulabilmektedir (El Nemr vd., 2007). Son zamanlarda ülkemizde bor ürünlerinin üretim ve kullanımı artmakta, bor ürünlerinden borik asit (H₃BO₃) farklı aktif karbon üretimi çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu oluşturulan aktif karbon çeşitliliği, aktif karbonun kullanım alanlarını da yaygınlaştırmaktadır. Aktif karbon sanayi ve endüstriden başlayarak sağlık alanına kadar birçok yerde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, çözelti pH'sı, başlangıç metal konsantrasyonu, sıcaklık ve temas süresi parametreleri ile Pb(II), Cr(III), Zn(II) ve Co(II) ağır metal iyonlarının aktive edilmiş KB-A üzerine adsorpsiyonu araştırıldı ve adsorpsiyon prosesinin hangi adsorpsiyon izotermine uyduğu belirlendi. Ayrıca termodinamik ve kinetik analizler gerçekleştirildi ve KB-A'nın adsorpsiyon kapasitesini arttırmak için bazı aktivasyon prosedürleri de araştırıldı.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Adsorbat çözeltisi

2.1. Adsorbate solution

Adsorbat çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan tüm kimyasallar analitik sınıfta, Stok Cr (III), Pb (II), Zn (II) ve Co (II) çözeltileri (1000 mg L⁻¹) Merck AG'den (Darmstadt, Almanya) satın alındı ve damıtılmış su ile gerekli başlangıç konsantrasyonlarına uygun şekilde seyreltildi.

2.2. Malzeme

2.2. Material

Van ili sınırlarında yetişen kavak ağaçları, kurutulmuş ve 250 mesh'lik öğütücüde parçalanarak hammadde olarak kullanılmıştır

2.3. Aktif karbon üretimi

2.3. Activated carbon production

2.3.1 Kimyasal emdirmeye

2.3.1 Chemical impregnation

Kavak ağacı talaşı ve borik asit 40'ar gram alınarak karıştırılmış ve 100 ml'lik saf su eklenerek 48 saat emdirmeye işlemini gerçekleştirmesi için bırakılmıştır. 60°C'lik etüvde 24 saat süreyle su oranının % 10 - % 5'e kadar düşmesi sağlanmıştır.

2.3.2. Piroliz ve adsorpsiyona hazırlık süreci

2.3.2. Pyrolysis process

Emilimi gerçekleştiren hammadde ve aktive edici madde, N₂ gazının 500 cm³/dk hızla geçtiği reaktör içine konularak, sıcaklığı 800 °C ye ayarlanmış fırında 60 dakika ısıtma işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra Fırın sıcaklığı azot ortamında 25 °C gelinceye kadar soğutma işlemi gerçekleştirildi. 25 °C'ye getirilmiş olan ürün adsorpsiyon prosesi için hazır hale getirildi.

Adsorpsiyon işlemlerine başlamadan önce oluşabilecek Kül ve diğer bileşiklerin aktif karbondan ayrılabilmesi için 1M HCl çözeltisiyle 15 dk etkileşim halinde bırakılarak, aktif karbonun su geçirgenliğine göre ayarlanabilen basit bir sistemle süzülür. Asit miktarı minimuma inene kadar süzme işlemine devam edildi. Süzme işlemi sona eren aktif karbon 25-50 °C arasında etüvde 24 saat kurumaya bırakılıp kullanıma hazır hale getirildi.

2.4. Deneysel prosedür

2.4. Experimental procedure

Denge verilerinin elde edilmesi için emdirmeye tekniği ile adsorpsiyon çalışmaları yapıldı. Çözeltilerin başlangıç pH değerleri, 0,1 M HNO₃ ve NaOH çözeltileri ile ayarlandı, KB-A'nın adsorpsiyon kapasitesi, 15 dakika boyunca 250 ml şişelerde 150 mg (KB-A) ile farklı konsantrasyonlarda (10-100 mgL⁻¹) 50 ml metal çözeltisi ile temas ettirilerek adsorbe edilen metallerin konsantrasyonu, bir hava asetilen alevi ile çalışan Atomik Adsorpsiyon Spektrofotometri (Unicam 926) ile belirlendi. Adsorpsiyon prosesinde sıcaklığın etkisini belirlemek ve termodinamik parametreleri değerlendirmek için 20 °C ve 40 °C'de çalışıldı. Tüm deneyler üçlü olarak gerçekleştirilmiş ve 3 ayrı ölçümden elde edilen verilerin ortalama değerlerinin istatistiksel analizi yapılarak, standart sapmanın, ortalamasının %1.5' inden az olduğu sonucuna varıldı.

2.5. Desorpsiyon deneyleri

2.5. Desorption experiments

Desorpsiyon çalışmaları; 50 mg L⁻¹ Pb (II), Cr (III), Zn (II) ve Co (II) çözeltileri içeren numunenin (50 ml), pH 7'de 20 dakika boyunca 150 mg (KB-A) ile muamele edildi. Çözelti santrifüjlendi daha sonra çözeltiler analiz edildi. Başka bir konik şişeye aktarılan adsorban ve 50 ml 0.05 M HCl çözeltisi ile muamele edildi. 20 dakikadan sonra santrifüj edildi ve desorplanan metallerin konsantrasyonu belirlendi. (KB-A) numunesinin yeniden kullanılabilirliğini belirlemek için, kullanılan (KB-A) numunesi adsorpsiyon / desorpsiyon döngüleri için yedi kez tekrarlandı.

2.6. Adsorpsiyon modeli

2.6. Adsorption model

Adsorpsiyon izotermi, adsorpsiyon işlemi denge durumuna ulaştığında adsorbe edilen iyonlarının sıvı ve katı

faz arasında nasıl dağıldığını gösterir. Langmuir ve Freundlich izotermi denklemleri genellikle sıvı-katı sistemler için kullanılır. Langmuir teorisi, emilimin adsorban içindeki belirli bölgelerde gerçekleştiğini varsayar. Metal iyonu bir bölgeyi işgal ettiğinde, oluşan denge, başka adsorpsiyonun gerçekleşemeyeceği bir doygunluk noktasına ulaştığını ifade eder. Freundlich modeli, emilimin heterojen yüzeylerde gerçekleştiğini ve adsorpsiyon kapasitesinin dengedeki metal iyonlarının konsantrasyonuna bağlı olduğunu varsayar. Eşitlikler sırasıyla (1) ve (2)'de verilmiştir.

$$C_e/q_e = 1/Q_m b + C_e/Q_m \quad (1)$$

$$\ln(q_e) = \ln k_F + 1/n \ln(C_e) \quad (2)$$

Burada C_e (mg L^{-1}) dengedeki metal çözeltisinin konsantrasyonu, q_e (mg g^{-1}) dengede adsorbe edilen metal miktarını, Q_m (mg g^{-1}) maksimum adsorpsiyon kapasitesini gösterir. Q_m ve b değerleri C_e/q_e 'ye karşı C_e doğrusal çizimlerinin eğimlerinden ($1/Q_m$) ve kesişme noktalarından ($1/bQ_m$) hesaplandı. Ampirik Freundlich sabitleri olan ve sırasıyla adsorpsiyon kapasitesini ve yoğunluğunu gösteren $1/n$ ve k_F (mg g^{-1}) değerleri $\ln q_e$ 'ye karşı $\ln C_e$ 'nin doğrusal grafiklerinin kesişme noktalarından ($1/n$) elde edildi.

2.7 Kinetik modelleme

2.7 Kinetik model

Kütle taşınımı ve kimyasal reaksiyon süreçleri gibi adsorpsiyon sürecinin kontrol mekanizmasını araştırmak için aşağıda gösterilen yalancı birinci dereceden kinetik model (3) ile yalancı ikinci dereceden model (4) şu şekildedir (Lagergren, 1898):

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

Burada k_1 adsorpsiyonun yalancı birinci dereceden hız sabiti, q_e ile q_t sırasıyla dengede ve t anında soğurulan metal iyonlarının miktarlarıdır. Yalancı birinci mertebeye; adsorpsiyon bölgelerinin doluluk oranının, dolu olmayan bölgelerin sırasıyla orantılı olduğunu düşünür. $\ln(q_e - q)$ 'ye karşı t 'nin grafiği bir doğru olduğundan olayın birinci dereceden kinetik modelin uygulanmasını gösterir. Gerçek bir birinci dereceden süreçte $\ln q_e - t$ 'ye karşı $\ln(q_e - q_t)$ grafiğinin kesişim noktasına eşit olmalıdır.

Ek olarak adsorpsiyon denge kapasitesine dayanan yalancı ikinci dereceden bir denklem şu şekilde ifade edilir.

$$t/q_t = 1/[k_2(q_e)^2] + (1/q_e) t \quad (4)$$

Burada k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) ikinci dereceden reaksiyon hızı denge sabitidir. t/q_t 'nin t 'ye karşı grafiği ikinci dereceden kinetiğin uygulanabilirliği için doğrusal bir ilişki vermelidir.

2.8 Adsorpsiyonun termodinamik parametreleri

2.8 Thermodynamic parameters of adsorption

Adsorpsiyon prosesinin kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini anlamak için hem enerji hem de entropi faktörleri göz önünde bulundurulmalıdır. Gibbs serbest enerji değişimi, ΔG° , temel kriteridir. ΔG° değeri negatif ise, belirli bir sıcaklıkta olayın kendiliğinden gerçekleştiğini gösterir. Langmuir katsayısı b (L mg^{-1}), aşağıdaki eşitliğe göre Standart Gibbs serbest enerji değişimini (ΔG°) hesaplamak için kullanılır (5):

$$\Delta G^\circ = -RT \ln b \quad (5)$$

Burada, R evrensel gaz sabiti ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), b Langmuir sabiti ve T mutlak sıcaklıktır (K). Serbest enerjideki değişim (ΔG°), entalpi (ΔH°) ve entropi (ΔS°) Eqs kullanılarak hesaplanır. (6)-(7) (Rajgopal vd., 2006):

$$\ln(b_2/b_1) = -\Delta H^\circ / R(1/T_2 - 1/T_1) \quad (6)$$

$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \quad (7)$$

3. Bulgular

3. Results

Aktif karbonun yapısının belirlenmesi için elementel analiz, Ft-Ir, BET ve SEM analizleri yapılmıştır. Ağır metal uzaklaştırması için ise adsorpsiyon analizleri yapılmıştır.

3.1. Elementel analiz

3.1 Elemental analysis

Kavak ağacı talaşı (K-S) elementel analizinde karbon oranının %52.2187 olması aktif karbon üretim sürecinde kullanılabilirliğinin bir işaretidir. Bu oran saf karbonda 88.4533, emprenye (ahşabın bünyesinde farklı yöntemlerle çeşitli kimyasal maddeleri emdirme yöntemi) işlemine tabi olan karbonda % 65.7013 oranlarına kalmıştır. H oranının K-S'ye göre K-K'da ve KB-A da düştüğü görülmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. KB-A'nın (Kavak Ağacı talaşının borik asitle impenyasyonu ile elde edilmiş aktif karbon) fizikokimyasal özellikleri ve kimyasal bileşimi

Table 1. Physicochemical properties and chemical composition of KB-A (Activated carbon obtained by impregnation of poplar tree sawdust with boric acid)

Hammadde/Aktif Karbon	Azot oranı	Karbon oranı	Hidrojen oranı	Sülfür oranı	Toplam
K-S	0.5042	46.1099	5.6045	0	52.2187
K-K	0.5905	87.0921	0.7707	0	88.4533
KB-A	0.4761	64.0897	1.1356	0	65.7013

3.2. FTIR analizi

3.2. FTIR analysis

Şekil 1 ve tablo 2 birlikte değerlendirildiğinde saf talaş (K-S) bulunan tekli bağların çoğunluğunun kırıldığı ve saf karbon (K-K) ile KB-A'da C-N bağı, C-H bağları(alkan), zayıf C-H₂ asimetrik bağlarının, -C=C- bağlarının, -C≡N bağlarının oluştuğu ve ayrıca KB-A'da Aromatik, COO- içindeki (C=O), veya -C-NO₂ içindeki (C-N) bağı oluştuğu, C-O ve HC-OH girişimlerin bulunduğu söylenebilir. Düşük dalga boyundaki bağların yerine yüksek dalga boyların güçlü bağların oluştuğu ve bu oluşumların karbonun gözenek yapısı ve yüzey aktivitesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

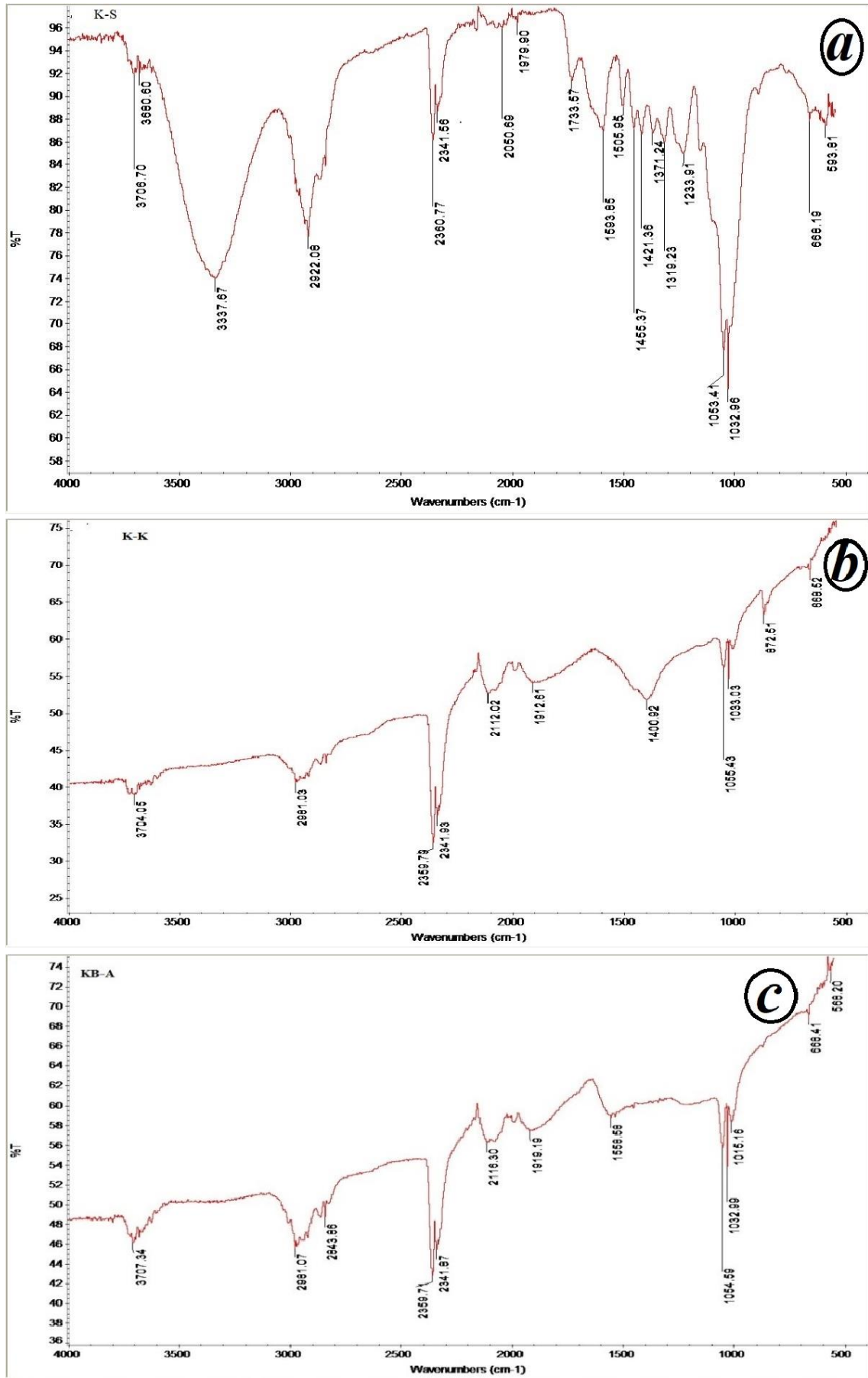
Tablo 2. Kavakağacı talaşı (K-S), kavakağacı saf karbonu (K-K) ve kavakağacı borik asit ile impenyasyon sonucu oluşan karbonun (KB-A) literatür FTIR analizi verileri

Table 2. Literature FTIR analysis data of poplar shavings (K-S), poplar pure carbon (K-K) and poplar boric acid and carbon formed by impregnation (KB-A)

K-S	K-K	KB-A	Özellik	Referans
3800			O Asitler alkoller, H bağı ve OH güçlü bağ	Beşergil (2015); Shen vd. (2010)
3706	3706	3707	OH gerilme	Beşergil (2015)
3680			OH gerilme (alkoller, asitler, H bağı)	Beşergil (2015)
3337			C-H gerilme (alkan)	Shen vd. (2010)
	2981	2981	C-H ₂ gerilme (Asimetrik bağlar)	Kholodkov vd., (2003); Shen vd. (2010)
2922			C-H ₂ gerilme (Asimetrik bağlar)	Kholodkov vd. (2003); Shen vd. (2010)
	2843	2843	C-H ₂ gerilme (Asimetrik bağlar)	Kholodkov vd. (2003) ; Shen vd. (2010)
2360	2359	2359	C-O bağı	Corazzari vd. (2015)

Tablo 2. Kavakağacı talaşı (K-S), kavakağacı saf karbonu (K-K) ve kavakağacı borik asit ile impregnasyon sonucu oluşan karbonun (KB-A) literatür FTIR analizi verileri (**Devamı**)**Table 2.** Literature FTIR analysis data of poplar shavings (K-S), poplar pure carbon (K-K) and poplar boric acid and carbon formed by impregnation (KB-A) (**Continue**)

K-S	K-K	KB-A	Özellik	Referans
2341	2342	2341	C-O bağı	Corazzari vd. (2015)
	2112	2116	C≡ N bağı	Petibois vd. (2006)
2050			CO ₂ - CO bandı	Balakrishnan & Schwank (1992)
1979	1912	1919	N-O bağı	(Wuttke vd, 2012)
1733			C=O (Kisilende konjuge olmamış bağlar)	(Pandey & Pitman 2003)
	1400		C-H'da Simetrik ve antisimetrik titreşimler	Al-Oweini & El-Rassy (2009)
1593			C=O, COO (Ligninde aromatik halkalarda bulunan)	Ahmet & Sivrikaya (2017)
	1556		(C=C -C- NO ₂ içindeki C-N bağı ya da Aromatik COO- içindeki C=O	Yuan vd. (2018)
1506			Lignindeki aromatik halkalardaki C=O COO titreşim	Yilgor vd., (2013); Kobayashi vd. (1984)
1455			CH ₂ ksilen ve ligninde bozunma titreşimi	Ahmet & Sivrikaya (2017)
1421			+C-H parçalanması aromatik (C-H titreşimleri)	Yilgor vd. (2013)
1371			Hemiselüloz ile selülozun C-H bozunma titreşimi	Yilgor vd. (2013)
			Selülozda C-H titreşimi syringyl türevlerinin +C-O titreşimleri	Yilgor vd. (2013)
1319			Selülozdaki CH ₂	Ahmet & Sivrikaya (2017)
1233			Ksilendeki asetil ve karboksil ve lignindeki C=O titreşimleri	Yilgor vd. (2013)
			C-O primer alkol karboksilik asit –alkol-eter	Peng vd. (2017) ; Beşergil (2015)
1053	1054	1054	Lignin selüloz ve hemiselülozda C=O gerilmesi	Ahmet & Sivrikaya (2017)
			Alkol,Karboksilik asit , Eter	Beşergil (2015)
1032	1033	1032	Hemiselülozda veya Lignin selülozda C=O gerilmesi	Ahmet & Sivrikaya (2017)
		1015	Alkollerde C-O ve HC-OH karşılıklı girişimleri	Yilgor vd. (2013)
			Alken vinildien, Hemiselüloz ve selülozun glikozidik bağları İzole edilmiş aromatik H atomuna ait titreşimler	Yilgor vd. (2013) ; Bağ & Tekin (2019)
	872			Chen vd. (2012)
668	668	668	C=C (Güçlü alkan bağı)	Beşergil (2015)
593			Lignin yanal bağlar C-Cl gerilmeleri	Liu vd. (2008); Beşergil (2015)
553		568	C-Cl gerilmesi	Liu vd. (2008); Beşergil, 2015)

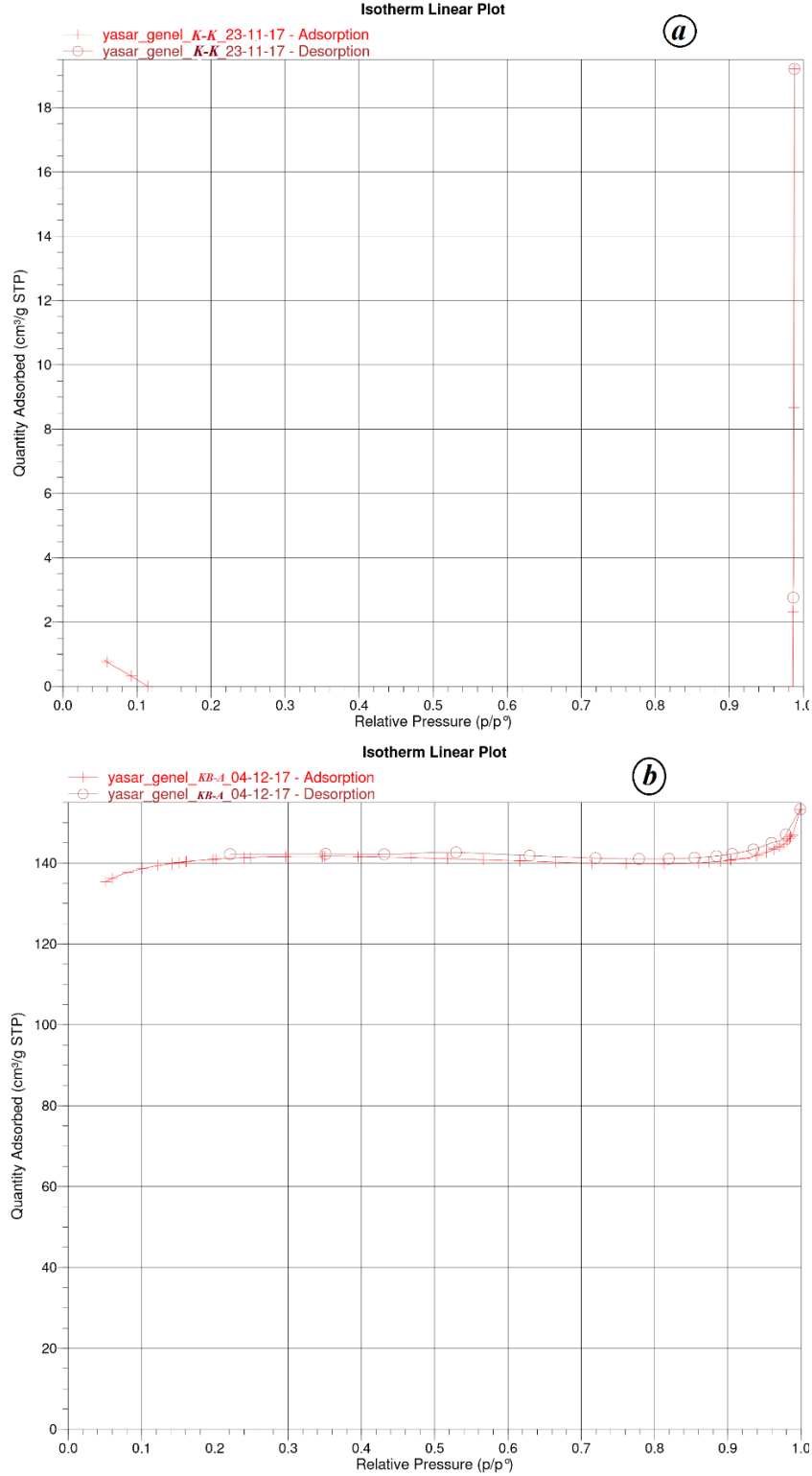


Şekil 1. (a) K-S FTIR grafiği, (b) K-K, FTIR grafiği, (c) KB-A FTIR grafiği
 Figure 1. (a) K-S FTIR graphic, (b) K-K, FTIR graphic (c) KB-A FTIR graphic

3.3. BET analizi

3.3. BET analysis

K-K ürününün izotermine herhangi bir izoterm tipine benzememesi ve uygun bir grafik verememesinin nedeni olarak çok az sayıda gözenek oluşturması ya da gözenek çökmelerinden olduğu düşünülmektedir. KB-A'nın ise Tip 2 izoterm tipine benzemekte ve bu nedenle makro gözenekli yapıları bulunmaktadır (şekil 2).



Şekil.2 (a) K-K A'nın azot adsorpsiyon- desorpsiyon grafiği (b) KB-A'nın azot adsorpsiyon- desorpsiyon grafiği

Figure.2 (a) Nitrogen adsorption-desorption graphic of K-K (b) Nitrogen adsorption-desorption graphic of KB-A

Tablo 3. Kavak ağacı saf karbonun (K-K) ve borik asit (H_3BO_3) impregnasyonu ile elde edilen aktif karbonun (KB-A) BET analizleri

Table 3. BET analyses of poplar pure carbon (K-K) and activated carbon (KB-A) obtained by impregnation of boric acid (H_3BO_3)

	K-K	KB-A
BET Yüzey alanı m^2/g	0.6297	473.1865
Langmuir Yüzey Alanı m^2/g	0.6701	623.2491
t-Plot Mikrogözenek Alanı m^2/g	-	412.2108
t-Plot Mikrogözenek hacmi cm^3/g	-	0.1916
BJH Adsorpsiyon ortalama gözenek genişliği ($4V/A$) Å	-	19.0911

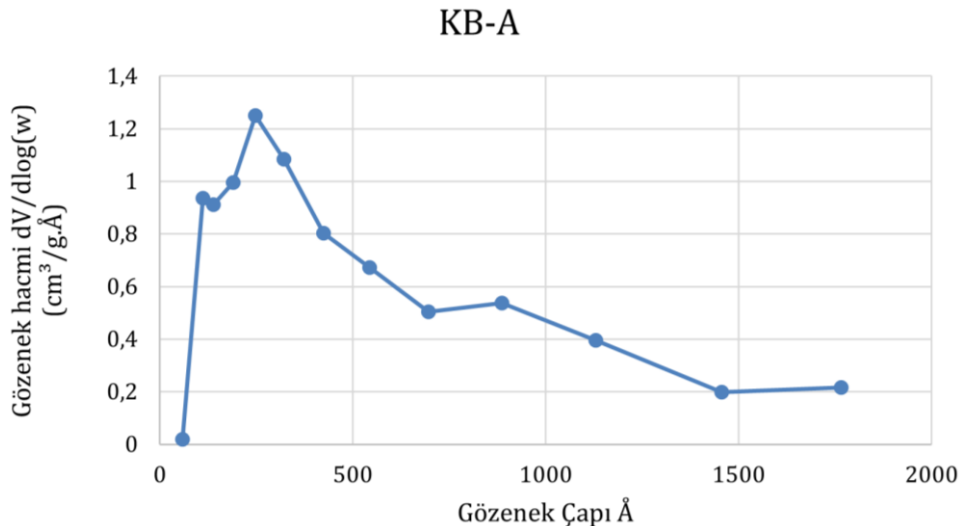
BET analizlerine bakıldığında KB-A 'nın K-K'ya göre BET yüzey alanı ve , Langmuir yüzey alanı sırasıyla 14 ve 15 kat, t mikro gözenekleri alanının 5 kat, mikrogözenek hacminin ise 6 kat daha büyüdüğü belirlendi. K-K'nın nerdeyse gözenek oluşumu bulunmazken, KB-A'nın 20 Å'yakın bir ortalama gözenek boyutunun olduğu ve ortalama gözenek yapısına bakılarak mezo gözenekli aktif karbon olduğu belirlendi (Tablo 3).

Tablo 4. Metal adsorpsiyonunda kullanılan KB-A ve bazı adsorbanların yüzey alanları

Table 4. Surface areas of KB-A and some adsorbents used in metal adsorption

Hammadde/Aktif karbon	Yüzey alanı (m^2/g)	
Modifiye çam kabuğu	1,67	Argun (2007)
Doğal bentonit	78.23	Özcan (2010)
Karbon Aerojele	426	Meena vd. (2005)
KB-A	473.18	

Tablo 4 te görüldüğü gibi metal adsorpsiyonunda kullanılan KB-A'bazı adsorbanlardan daha büyük yüzey alanına sahip olduğu görüldü.



Şekil 3. Gözenek çapı-gözenek hacmi grafiği

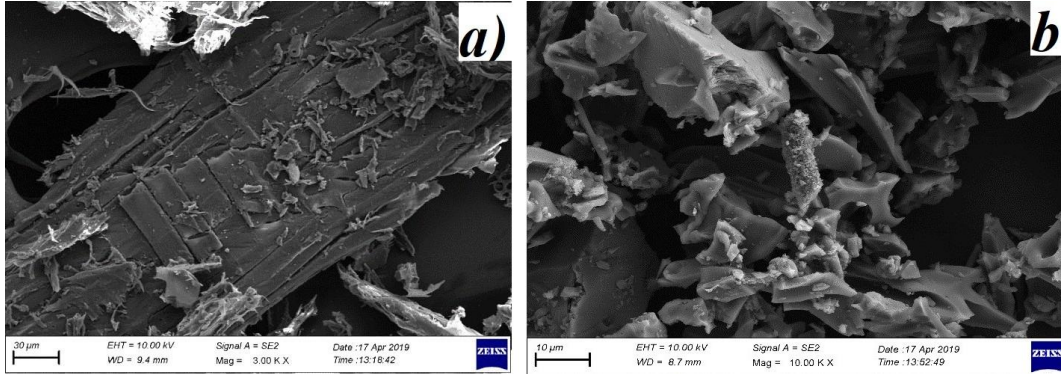
Figure 3. Pore diameter-pore volume graphic

KB-A'nın gözenek çapı-hacim grafiğine incelendiğinde mezo gözenek ve makro gözenekli yapıları çok miktarda içerdiği ve gözenek hacimlerinin yüksek olduğu belirlendi.

3.4. SEM analizi

3.4. SEM analysis

K-K karbonunun yüzey ve gözenek yapısının makro gözenek hatta gözeneksiz yapıda (şekil 4.a), KB-A aktif karbonun ise yüzeyde mezo ve makro gözenekli yapıların olduğu görüldü (şekil 4.b).



Şekil 4. (a) K-K SEM görüntüsü , (b) KB-A SEM görüntüsü

Figure 4. (a) Image of K-K SEM, (b) Image of KB-A SEM

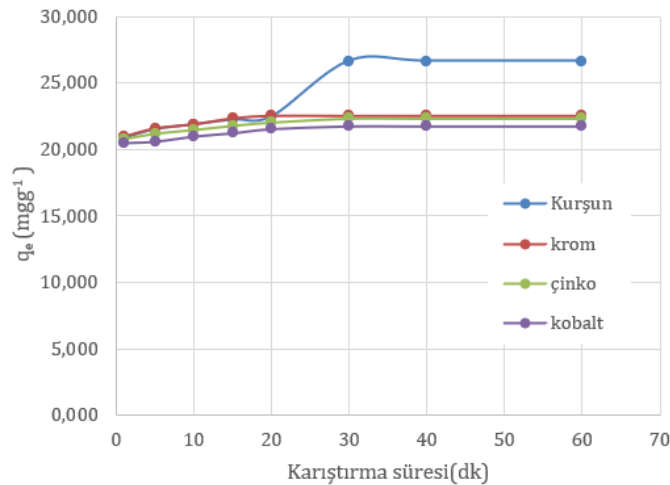
3.5. Temas süresinin metal adsorpsiyonuna etkisi

3.5. Effect of contact time on metal adsorption

Temas süresi, adsorpsiyon prosesi için önemli parametrelerden biridir ve hızlı emilim arzu edilen parametreler arasındadır (Akar & Tunalı 2005). Şekil 5’de 293 K’lık bir sıcaklıkta temas süresinin bir fonksiyonu olarak KB-A tarafından Pb(II), Cr(III), Zn(II) ve Co(II) adsorplandığı görüldü.

Maksimum adsorpsiyon kapasiteleri Cr(III) için 22.39 mg g⁻¹, 20 dakikada Pb(II) için 22.36 mg g⁻¹, Zn(II) için 22.07 mg g⁻¹ ve Co (II) için 30 dakikada 21.61 mg g⁻¹ olarak belirlendi.

Şekil 5’te görüldüğü gibi, kurşun, krom, çinko ve kobaltın KB-A üzerindeki adsorpsiyonu hızlı bir şekilde gerçekleşmesi ve zamanın bu süreci fazla etkilemediği, dengenin 20-30 dakikada gerçekleştiği ve 1 ila 30 dakika arasında fazla bir farkın olmadığı görüldü. KB-A tarafından bu hızlı metal adsorpsiyonu, küçük hacimli reaktör uygulamalar için ekonomik avantaj sağlar.



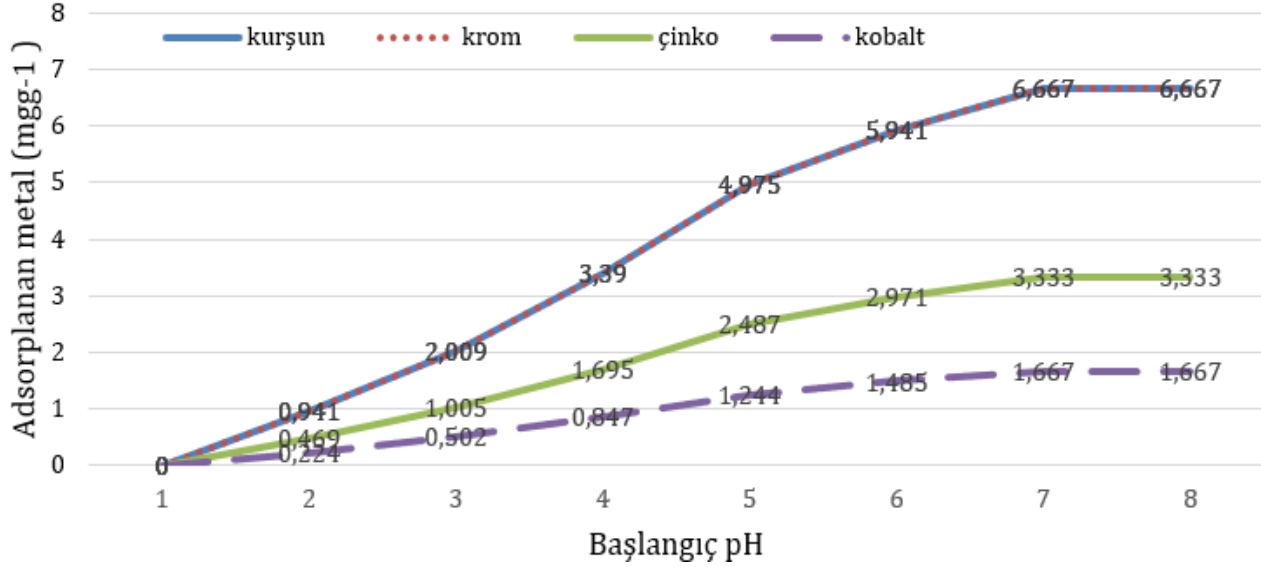
Şekil 5. Temas süresinin metal alımı üzerindeki etkisi (adsorban ağırlığı: 50 ml başına 150 mg, başlangıç pH 7, başlangıç metal konsantrasyonu: 80 mgL⁻¹, sıcaklık: 293 K).

Figure 5. Effect of contact time on metal uptake (adsorbent weight: 150 mg per 50 ml, initial pH 7, initial metal concentration: 80 mgL⁻¹, temperature: 293 K).

3.6. pH'in metal adsorpsiyonu üzerine etkisi

3.6. Effect of pH on metal adsorption

Sulu çözeltinin pH'sı, adsorpsiyon prosesinde önemli kontrol parametrelerinden biridir. Kurşun, krom, çinko ve kobalt'ın adsorpsiyonundaki varyasyonlar pH 1-8 aralığında incelendi. Bu aralığın sonuçları Şekil 6'da verildi.



Şekil 6. pH'in metal adsorpsiyon alımı üzerindeki etkisi (adsorban ağırlığı: 50 ml başına 150 mg, sıcaklık: 293 K, temas süresi: Pb(II), Cr(III), Zn(II) için 20 dk. Ve Co(II) için 40 dakika, başlangıç Pb(II) ve Cr(III) konsantrasyonları: 10 mg L⁻¹, başlangıç Zn(II) ve Co(II) konsantrasyonları: 5 mg L⁻¹).

Figure 6. Effect of pH on metal adsorption uptake (adsorbent weight: 150 mg per 50 ml, temperature: 293 K, contact time: Pb(II), Cr(III), 20 min. for Zn(II) and 40 min for Co(II), initial Pb(II) and Cr(III) concentrations: 10 mg L⁻¹, initial Zn(II) and Co(II) concentrations: 5 mg L⁻¹).

Daha düşük pH değerlerinde, H⁺ iyonları sistemin değişim bölgeleri için metal katyonlarıyla rekabet eder hale gelmesi, adsorpsiyonun düşük seviyelerde gerçekleştiğine sebep oldu. pH 1'den 7'ye yükselmesiyle adsorpsiyonun % 0'dan % 100'e yükseliş gösterdi. Bu nedenle, gelecekteki deneyler için pH 7 seçildi. Adsorpsiyon deneylerinden sonra, metal çözeltilerin başlangıç ve son pH değerleri arasındaki farkların genellikle 0.8'den daha az olduğu bulundu. H⁺ iyon konsantrasyonundaki artışla birlikte adsorpsiyondaki azalma, adsorpsiyon işleminin iyon değişimi yoluyla gerçekleştiğinin bir göstergesi oldu.

3.7. Adsorpsiyon kinetik modelleme

3.7. Adsorption kinetic modeling

Metallerin adsorpsiyon kinetiğini analiz etmek için, verilere yalancı birinci dereceden ve yalancı ikinci dereceden kinetik modeller uygulandı. Sahte ikinci dereceden model, deneysel verilere göre mükemmel bir uyum gösterdi. Deneysel adsorpsiyon kapasitelerinin ve yukarıdaki iki modelden tahmin edilen teorik değerlerin karşılaştırılması Tablo 5'te sunuldu. Birinci dereceden kinetik modelden tahmin edilen teorik q_e değerleri, deneysel değerlere göre önemli ölçüde farklı değerler verdi ve korelasyon katsayılarının da daha düşük olduğu görüldü. Bu sonuçlar, birinci dereceden kinetik modelin Pb(II), Cr(III), Zn(II) ve Co(II)'nin KB-A tarafından adsorpsiyonunu tanımlamadığını gösterdi. İkinci dereceden denklem için t / q t'nin t'ye karşı doğrusal grafikleri için korelasyon katsayıları, 60 dakikalık bir temas süresi için çalışılan tüm metaller için 1'e çok yakın olduğu görüldü. Kurşun, krom, çinko ve kobalt için teorik q_e değerleri, ikinci dereceden kinetik durumunda deneysel q_e değerlerine çok yakınlık gösterdi.

3.8. Başlangıç konsantrasyonunun metal adsorpsiyonu üzerine etkisi

3.8. Effect of initial concentration on metal adsorption

Başlangıç konsantrasyonu, metal iyonlarının sulu ve katı fazlar arasındaki tüm kütle transfer dirençlerinin

üstesinden gelmek için önemli bir sürüklenme kuvveti sağlar. Başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon üzerindeki etkisi Şekil 7' de gösterildi. Başlangıç konsantrasyonu 2' den 100 mg L⁻¹'e yükseltildiğinde, adsorbe edilen metallerin yüzdesi Pb (II) için % 100'den 83.86' ya, Cr (III) için % 100' den % 85.95' e, Zn (II) için % 100' den % 85.44' e ve Co (II) için % 100' den % 81.02' ye düşmüştür. KB-A'da tam tersi bir eğilim gösterdi. İlk metal konsantrasyonu 2' den 100 mg L⁻¹'e yükseltildiğinde, KB-A'nın yükleme kapasitesi Pb(II) için 0.67'den 27.95 mg g⁻¹'e, Cr (III) için 0.67'den 28.65 mg g⁻¹'e, Zn (II) için 0.67 den 28.48 mg g⁻¹'e ve Co (II) için 0.67 den 27.01 mg g⁻¹'e artış gösterdi.

Tablo 5. Yalancı birinci derece kinetik ve yalancı ikinci derece kinetik tablosu (60 dakika boyunca 50 ml'de 80 mg L⁻¹ metal çözeltileri (pH 7), 150 mg KB-A)

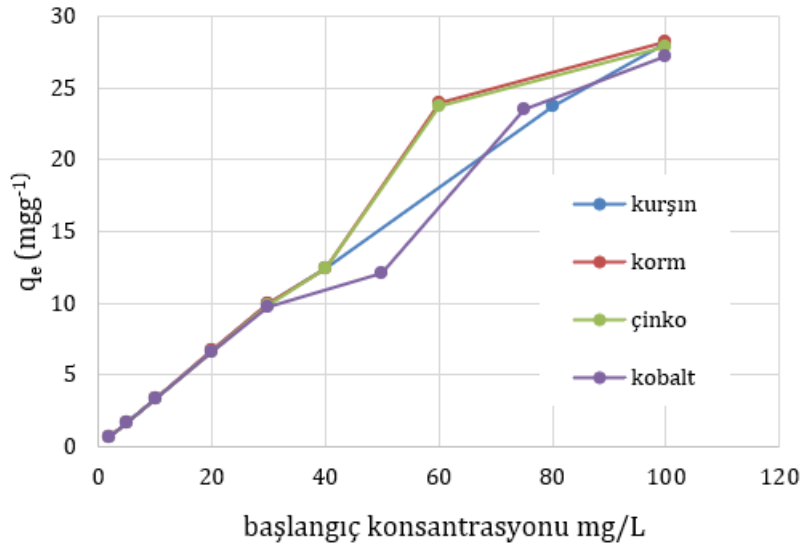
Table 5. Pseudo first degree kinetics and pseudo second degree kinetics table (80 Mg L⁻¹ metal solution (pH 7) in 50 ml for 60 min, 150 mg KB-A)

Yalancı birinci derece			Yalancı ikinci derece				
Metal	Deneyisel q _e (mg g ⁻¹)	k ₁ (gmg ⁻¹ dk ⁻¹)	q _e (mg g ⁻¹)	R ²	k ₂ (gmg ⁻¹ dk ⁻¹)	q _e (mg g ⁻¹)	R ²
Cr(III)	22.389	0.0254	1.592	0.6466	0.188	22.523	0,9999
Pb(II)	22.363	0.0299	1.562	0.6652	0.169	22.472	0,9998
Zn(II)	22.072	0.0315	1.446	0.6578	0.177	22.173	0,9999
Co(II)	21.605	0.0282	1.335	0.7051	0.201	21.690	0,9998

3.8. Başlangıç konsantrasyonunun metal adsorpsiyonu üzerine etkisi

3.8. Effect of initial concentration on metal adsorption

Başlangıç konsantrasyonu, metal iyonlarının sulu ve katı fazlar arasındaki tüm kütle transfer dirençlerinin üstesinden gelmek için önemli bir sürüklenme kuvveti sağlar. Başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon üzerindeki etkisi Şekil 7' de gösterildi. Başlangıç konsantrasyonu 2' den 100 mg L⁻¹'e yükseltildiğinde, adsorbe edilen metallerin yüzdesi Pb (II) için % 100'den 83.86' ya, Cr (III) için % 100' den % 85.95' e, Zn (II) için % 100' den % 85.44' e ve Co (II) için % 100' den % 81.02' ye düşmüştür. KB-A'da tam tersi bir eğilim gösterdi. İlk metal konsantrasyonu 2' den 100 mg L⁻¹'e yükseltildiğinde, KB-A'nın yükleme kapasitesi Pb(II) için 0.67'den 27.95 mg g⁻¹'e, Cr (III) için 0.67'den 28.65 mg g⁻¹'e, Zn (II) için 0.67 den 28.48 mg g⁻¹'e ve Co (II) için 0.67 den 27.01 mg g⁻¹'e artış gösterdi.



Şekil 7. Başlangıç konsantrasyonunun metal adsorpsiyonu üzerindeki etkisi (adsorbent ağırlığı: 50 ml başına 150 mg, başlangıç pH: 7, temas süresi: Pb(II) ve Cr(III) için 15 dakika, Zn(II) ve Co(II) için 30 dakika, sıcaklık: 293 K).

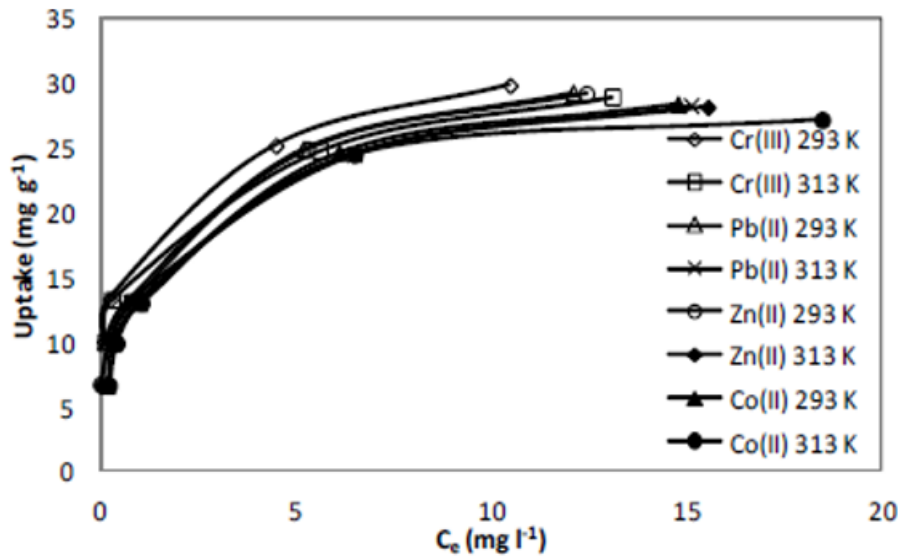
Figure 7. The effect of the initial concentration on metal adsorption (adsorbent weight: 150 mg per 50 ml, initial pH: 7, contact time: 15 minutes for Pb(II) and Cr(III), 30 min for Zn(II) and Co(II), temperature: 293 K).

3.9. Adsorpsiyon izotermi

3.9 Adsorption isotherms

Adsorpsiyon izotermi, adsorpsiyon işlemi bir denge durumuna ulaştığında adsorbat iyonlarının sıvı ve katı faz arasında nasıl dağıldığını gösterir. Adsorpsiyon sürecinin analizi ve tasarımı denge verileri gerektirir. Şekil 8’de Pb(II), Cr(III), Zn(II) ve Co(II)’nin iki farklı sıcaklıkta KB-A üzerine adsorpsiyonu için deneysel izotermi gösterildi. Şekil 8’deki verilerle, Langmuir ve Freundlich denklemleri, bu metallerin adsorpsiyon izotermi incelemek için kullanıldı.

Langmuir modeli, verileri 0.9963- 0.9996 aralığındaki bir korelasyon katsayısı değeri ile bunun tek katmanlı bir adsorpsiyon işlemi olduğu görüldü. Tablo 5’teki doğrusal regresyon değerleri göz önüne alındığında, çalışılan konsantrasyon ve sıcaklık aralıklarında Freundlich modeli, metallerin adsorpsiyon verilerine göre Langmuir modelinden biraz daha az uyum gösterdi.



Şekil 8. Farklı sıcaklıklarda elde edilen doğru olmayan adsorpsiyon izotermi (adsorbanın ağırlığı :150 mg/50 ml, başlangıç pH: 7, başlangıç metal konsantrasyonu :20 – mg g⁻¹, temas süresi:15 dakika)

Figure 8. Inaccurate adsorption isothermia obtained at different temperatures (weight of adsorbent: 150 mg/50 ml, starting pH : 7, initial metal concentration : 20 – mg g⁻¹, contact time: 15 minutes)

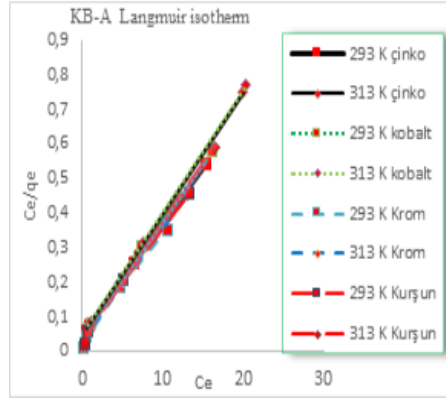
Tablo 6. Langmuir and Freundlich model farklı sıcaklıklardaki parametreleri.

Table 6. Langmuir and Freundlich model parameters under different temperature conditions.

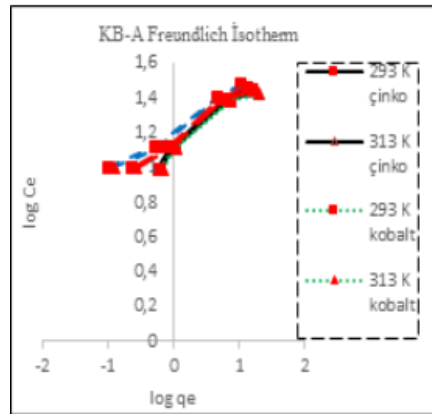
Metal	Adsorption temperature (K)	Langmuir constants			Freundlich constants		
		Q _m (mg g ⁻¹)	b (l mg ⁻¹)	R ²	k _F (mg g ⁻¹)	1/n	R ²
Cr(III)	293	30,9199	1,6914	0,994	16,7208	0,2452	0,9875
	313	29,0028	1,601	0,997	15,9378	0,2417	0,9874
Pb(II)	293	30,30	1,1858	0,9973	14,7482	0,2772	0,9866
	313	28,0914	1,1521	0,9987	14,0139	0,2662	0,9812
Zn(II)	293	29,3011	0,762	0,9998	12,5343	0,3222	0,9759
	313	28,3112	0,8281	0,9999	12,1231	0,2945	0,9518
Co(II)	293	28,1007	0,707	0,9989	12,1765	0,3173	0,9825
	313	25,8756	0,7765	0,9999	11,8809	0,2958	0,9

Tablo 6, şekil 9 ve şekil 10’a birlikte bakıldığında adsorpsiyon kapasitesi Cr(III) için 30.92’den 29,76 mg g⁻¹’ye, Pb(II) için 30.30’dan 28,09 mg g⁻¹ e, Zn(II) için 29.3011 den 28.3112 mg g⁻¹’e ve Co(II) için 27.70’den 25.72’mg g⁻¹ azaldı. Sıcaklık 293’ten 313 K’ne yükseltildiğinde Langmuir sabiti b’nin değeri de Cr(III) ve Pb(II) için artan sıcaklıkla birlikte azaldı. Ancak Langmuir sabiti b’nin değeri, Zn(II) ve Co(II) için artan

sıcaklıkla birlikte arttı.



Şekil 9. KB-A Langmuir İzotermi
Figure 9. KB-A Langmuir Isotherm



Şekil 10. KB-A Freundlich izoterm
Figure 10. KB-A Freundlich isotherm

3.10. Adsorpsiyon izotermi verilerinin termodinamik analizleri

3.10. Thermodynamic analyzes of adsorption isotherm data

Tablo 7'da gösterildiği gibi, ΔG^0 'ın negatif değerleri, her bir sıcaklıkta adsorpsiyon işleminin fizibilitesini ve KB-A üzerine Pb (II), Cr (III), Zn (II) ve Co (II) 'nin iyonlarının adsorpsiyonunun kendiliğinden olduğunu doğruladı. Entalpi değişiminin negatif ve pozitif değerleri, çalışılan metaller için hem ekzotermik hemde endotermik adsorpsiyon sürecini doğruladığını, ΔS^0 nin pozitif değerleri metal iyonlarının adsorbana olan afinitesini yansıtmaktadır.

Tablo 7. Farklı sıcaklıklarda Langmuir ve Freundlich model termodinamik parametreleri

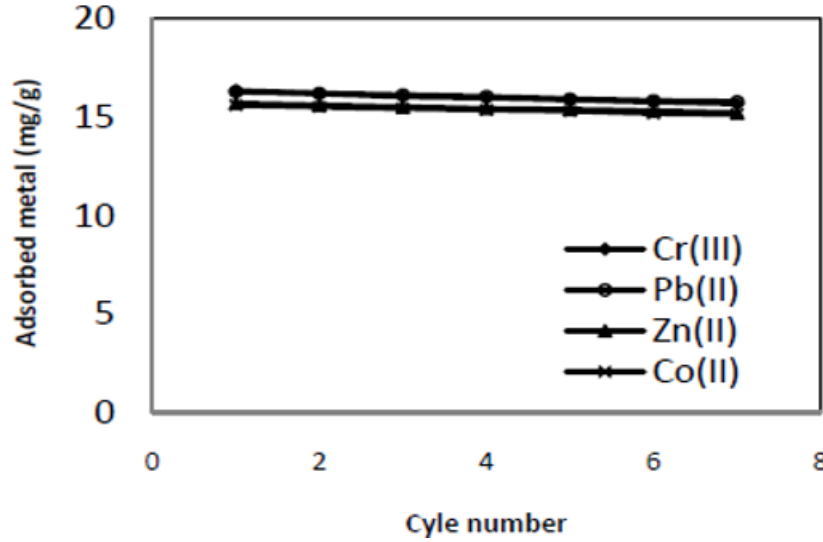
Table 7. Thermodynamic parameters of Langmuir and Freundlich model at different temperatures

Metal	Adsorption temperature (K)	ΔH^0 (kJ/mol)	ΔG^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/mol K)
Cr(III)	293	-8,5392	-13.8868	18.25
	313		-13.3412	18.25
Pb(II)	293	-7,0656	-11.9230	16.5783
	313		-11.4715	16.5783
Zn(II)	293	-4.2683	-9,5737	18,1071
	313		-9,3009	18.1071
Co(II)	293	-4,3909	-9.4316	17,2036
	313		-9.1511	17.2036

3.11. Desorpsiyon ve deneylerde yeniden kullanım

3.11. Desorption and reuse in experiments

Metal giderimi için kullanılan bir adsorban rejenere edilip tekrar kullanılmalıdır. Bu nedenle Desorpsiyon çalışmalarında 0,05 M HCl kullanıldı. Şekil 5 de 7 döngüden sonra Cr(III), Pb(II), Zn(II) ve Co(II) iyonları için tekrarlanan adsorpsiyon/desorpsiyon döngülerinin verilerini gösteren grafik Şekil 11’de görüldü.



Şekil 11. Tekrarlanan adsorpsiyon/desorpsiyon döngüleri sırasında KB-A'nın Cr(III), Pb(II), Zn(II) ve Co(II) iyonlarına yönelik adsorpsiyon kapasitesi (adsorbanın ağırlığı: 50 ml’de 250 mg ilk metal konsantrasyon: 50 mg L⁻¹, pH: 7. temas süresi : 20 dakika).

Figure 11. Adsorption capacity of KB-A to Cr(III), Pb(II), Zn(II) and Co(II) ions during repeated adsorption/desorption cycles (weight of the adsorbent: 250 mg initial metal concentration per 50 ml: 50 mg L⁻¹, pH: 7. contact time: 20 min).

Şekil 11’deki veriler, ilerleyen döngülerle KB-A’nın adsorpsiyon kapasitesinde hafif bir azalma olduğunu gösterdi. 7 kez rejenerasyon sonucunda KB-A’nın metal tutma kapasitesi sadece Cr(II) için %4.02, Pb(II) için %3.04, Zn(II) için %3.03 ve Co(II) için %2.93 azaldı.

Sonuçlara göre KB-A’nın Cr (II), Pb (II), Zn(II) ve Co(II) iyonlarına karşı adsorpsiyon prosesi için tekrar kullanılabilirliği sonucuna varıldı.

4. Tartışma ve sonuç

4. Discussion and conclusion

Bu çalışmada, Cr(III), Pb(II), Zn(II) ve Co(II) iyonlarının KB-A üzerine adsorpsiyonunun, pH , temas süresi, başlangıç metal konsantrasyonu ve sıcaklık ile nasıl değiştiği araştırıldı. Langmuir modeline göre, KB-A’nın maksimum adsorpsiyon kapasitesi pH 7’de, 293,13 K’da ve 15 dk temas süresinde Cr (III) için 30.89 mg g⁻¹, Pb (II) için 30.49 mg g⁻¹, Zn(II) için 30.30 mg g⁻¹ ve Co(II) için 27.70 mg g⁻¹ ve 2 bulundu. Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon modelleri, Cr (III), Pb (II), Zn(II) ve Co(II) iyonlarının sıcaklığa bağlı olarak KB-A adsorpsiyon dengesinin matematiksel tanımı için kullanıldı. KB-A’nın adsorpsiyon kabiliyeti Cr(III) > Pb(II) > Zn(II) > Co(II) sırasını takip ettiği görüldü. İncelenen her iki sıcaklıkta da adsorpsiyon denge verileri Langmuir modeline uygun olduğu belirlendi. Kinetik çalışmalar, adsorpsiyon prosesinin yalnızca ikinci dereceden kinetiğini takip ettiğini, termodinamik parametreler Cr(III), Pb(II) adsorpsiyonunun doğada ekzotermik olduğunu ve Zn(II) ve Co(II) ’nin adsorpsiyonunun doğada endotermik olduğunu ortaya koydu. ΔG° ’ın negatif değerleri, adsorpsiyon sürecinin kendiliğinden oluştuğunu gösterdi. ΔS° ’nin pozitif değerleri, Cr(III), Pb(II), Zn(II) ve Co(II) iyonlarının ΔS° nin pozitif değerleri metal iyonlarının adsorbana olan afinitesini yansıtmaktadır. Desorpsiyon verimliliği yaklaşık olarak % 96-98 olduğu bulundu.

Bu çalışma sonuçlarına göre Kavak ağacı talaşından imregnasyon ile elde edilen aktif karbon ile Cr (III),

Pb (II), Zn (II) ve Co (II) iyonlarını sulu çözeltilerden uzaklaştırılabileceğini ortaya koydu. Bu çalışma sonuçlarına göre, ağır metal içeren atıkların geri kazanım tesislerini tasarlamak için yararlı olacağı sonucuna varıldı.

Teşekkür

Acknowledgement

Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkürler.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışmada sorumlu yazar dışında herhangi bir yazar katkısı bulunmamaktadır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulmuştur. “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim. Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Bu makalede herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

Kaynakça

Referecnes

- Ahmet, C. & Sivrikaya, H. (2017). Mantar tahribatına uğramış titrek kavak odununun FT-IR yöntemiyle kimyasal analizi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19 (1), 139-147. <https://doi.org/10.24011/barofd.29936>
- Akçin, G., Saltabas, O., Yeşilçimen, F., & Aslan, A. (2001). Kurutulmuş likenler tarafından sulu çözeltilerden ağır metalin biyosorpsiyonu. *Int. Jour. Kimya* 11 (3), 141-146.
- Akar, T., & Tunali, S. (2005). Biosorption performance of *Botrytis cinerea* fungal by-products for removal of Cd (II) and Cu (II) ions from aqueous solutions. *Minerals Engineering*, 18(11), 1099-1109.
- Al-Oweini, R. & El-Rassy, H. (2009). Synthesis and characterization by FTIR spectroscopy of silica aerogels prepared using several Si (OR)₄ and R'' Si (OR')₃ precursors. *Journal of Molecular Structure*, 919 (1-3), 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.08.025>
- Argun, M. E. (2007). *Kimyasal olarak modifiye edilmiş adsorbanlar kullanılarak ağır metal iyonlarının adsorpsiyonu* [Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Bakıcı Tanaydın, Z., Tanaydın, M. K., Ince, M. & Demirkıran, N. (2022). Ponza ile bakır iyonlarının ve kurşun iyonlarının adsorpsiyon karakteristikleri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12 (2), 581-596. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1003279>
- Balakrishnan, K. & Schwank, J. (1992). FTIR study of bimetallic Pt-Sn/Al₂O₃ Catalysts, *Journal of Catalysis*, 138 (2), 491-499. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(92\)90301-W](https://doi.org/10.1016/0021-9517(92)90301-W)
- Beşergil, B. (2015). *Enstrümantal Analiz Temel İlkeler*. (1. Baskı). Ankara. Gazi Kitabevi.
- Celik, A., & Demirbaş, A. (2005). Removal of heavy metal ions from aqueous solutions via adsorption onto modified lignin from pulping wastes. *Energy sources*, 27(12), 1167-1177.

- Chen, Y., Mastalerz, M. & Schimmelmann, A. (2012). Characterization of chemical functional groups in macerals across different coal ranks via micro-FTIR spectroscopy. *International Journal of Coal Geology*, 104, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.09.001>
- Chompoothawat, N., Wongthanate, J., Ussawarujikulchai, A., & Prapagdee, B. (2010). Removal of cadmium ion from aqueous solution by exopolysaccharide-producing bacterium, *Ralstonia sp.* *Fresenius Environmental Bulletin*, 19, 2919- 2923.
- Corazzari, I., Nisticò, R., Turci, F., Faga, M. G., Franzoso, F., Tabasso, S. & Magnacca, G. (2015). Advanced physico-chemical characterization of chitosan by means of TGA coupled on-line with FTIR and GCMS: Thermal degradation and water adsorption capacity, *Polymer Degradation and Stability*, 112,1-9. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.12.006>
- El Nemr, A., El Sikaily, A., Khaled, A., & Abdelwahab, O. (2007). Removal of toxic chromium (VI) from aqueous solution by activated carbon using *Casuarina equisetifolia*. *Chemistry and Ecology*, 23(2), 119-129
- Gürten, İ. I. (2008). *Çay atığından adsorbent üretimi ve üretilen adsorbentin adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). Sorption of dye from aqueous solution by peat. *Chemical engineering journal*, 70(2), 115-124..
- Keklikcioğlu Çakmak, N. & Topal Canbaz, G. (2020). TiO₂ Nanopartikülü ve TiO₂/Aktif Çamur Sentezi ile Sulu Çözeltilerden Cu (II) İyonlarının Adsorpsiyonu. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (1), 86-98. <https://doi: 10.17714/gumusfenbil.514285>
- Kholodkov, I., Biederman, H., Slavinská, D., Choukourov, A. & Trchova, M. (2003). Plasma polymers prepared by RF sputtering of polyethylene, *Vacuum*, 70 (4),505-509. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00702-9](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00702-9)
- Kobayashi, H., Karasawa, H., Miyase, T. & Fukushima, S. (1984). Studies on the constituents of cistanchis herba. III. isolation and structures of new phenylpropanoid glycosides, *Cistanosides a and b*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 32 (8): 3009-3014. <https://doi.org/10.1248/cpb.32.3009>
- Krishnani, K. K., Meng, X., Christodoulatos, C., & Boddu, V. M. (2008). Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *Journal of hazardous materials*, 153(3), 1222-1234.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical society*, 40(9), 1361-1403.
- Lagergren, S. (1898). Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar*, 24, 1-39.
- Liu, Q., Wang, S., Zheng, Y., Luo, Z. & Cen, K. (2008). Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis. *Journal of Analytical And Applied Pyrolysis*, 82 (1), 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.03.007>
- Meena, A., K., Mishra, G., K., Rai, P., K., Rajagopal, C., Nagar, P., N., Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using carbon aerogel as an adsorbant. *Journal of Hazardous Materials*, B122: 161- 170 (2005).
- Mier, M. V., Callejas, R. L., Gehr, R., Cisneros, B. E. J., & Alvarez, P. J. (2001). Heavy metal removal with mexican clinoptilolite: multi-component ionic exchange. *Water research*, 35(2), 373-378.
- Nwuche, C. O., & Ugoji, E. O. (2008). Effects of heavy metal pollution on the soil microbial activity. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5, 409-414.
- Özcan, A. S. (2010). Doğal bentonitin karakterizasyonu ve kurşun iyonlarının adsorpsiyon yeteneği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 12(2), 85-97.
- Pandey, K. K., Pitman, A. J. (2003) Ftr Studies Of The Changes In Wood Chemistry Following Decay By Brown-Rot And White-Rot Fungi, *International Biodeterioration ve Biodegradation*, 52 (3), 151-160.
- Rajgopal, S., Karthikeyan, T., Kumar, B. P., & Miranda, L. R. (2006). Utilization of fluidized bed reactor for the production of adsorbents in removal of malachite green. *Chemical Engineering Journal*, 116(3), 211-217.

- Shen, D. K., Gu, S., Luo, K. H., Wang, S. R. & Fang, M. X. (2010). The pyrolytic degradation of wood-derived lignin from pulping process. *Bioresource technology*, 101(15),6136-6146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.078>
- Teker, M., Saltabaş, Ö., & İmamoğlu, M. (1997). Pirinç gövdelerinden aktif karbon ile kobaltın adsorpsiyonu. *Çevre Bilimleri ve Sağlık Dergisi, Bölüm A*, 32(8), 2077-2086.
- Yilgor, N., Dogu, D., Moore, R., Terzi, E. & Kartal, S. N. (2013). Evaluation of fungal deterioration in liquidambarorientalis mill heartwood by FT-IR and light microscopy, *Bio Resources*, 8(2), 2805-2826.
- Yuan, Y., Cai, X., Tan, B., Zhou, S. & Xing, B. (2018). Molecular Insights into reversible redox sites in solid-phase humic substances as examined by electrochemical in situ FTIR and two-dimensional correlation spectroscopy, *Chemical Geology*, 494, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.07.029>
- Zvinowanda, C. M., Okonkwo, J. O., Shabalala, P. N., & Agyei, N. M. (2009). A novel adsorbent for heavy metal remediation in aqueous environments. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6, 425-434.
- Zulkali, M. M. D., Ahmad, A. L., & Norulakmal, N. H. (2006). Oryza sativa L. husk as heavy metal adsorbent: optimization with lead as model solution. *Bioresource technology*, 97(1), 21-25.

Sillyon antik kenti stadyum alanındaki olası arkeolojik kalıntıların manyetik, yer radarı ve öz direnç çalışmaları ile araştırılması

Investigation of possible archaeological remains in the stadium area of the ancient city of Sillyon with magnetic, ground penetrating radar and resistivity studies

Engin ERÇETİN *¹ 

¹ İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Avcılar Yerleşkesi, 34320 İstanbul

• Geliş tarihi / Received: 11.06.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 28.07.2023

Öz

Arkeolojik alanlarda jeofizik çalışmalar, yeraltında gömülü kültürel mirasların konum ve geometrilerinin araştırılmasında klasik arkeolojik tekniklere göre daha ekonomik, hızlı ve ayrıca tahribatsız çözüm sunan etkin arkeojeofizik yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları manyetik, yer elektrik ve yer radarı (GPR) yöntemleridir. Bu çalışmada, Antalya'nın Serik ilçesi, Pamfilya bölgesinde Aspendos ile Perge'nin ortasında bulunan Sillyon antik kentinin Stadyum alanında olası gömülü arkeolojik yapı kalıntılarının görüntülenmesi için arkeojeofizik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda çalışma alanında arkeojeofiziğin tahribatsız yöntemlerinden olan düşey gradiyometrik manyetik toplam alan, dipol-dipol iki boyutlu elektrik öz direnç ve yer radarı yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular çerçevesinde kazı çalışmalarına yön verebilecek saptamalar gerçekleştirilmiştir. Stadyum bölgesinin orta kısmında tribünlere ait manyetik anomali bulguları elde edilmiş, yine stadyumun kuzey cephesinde ise alanı diklemesine kesen su akış yolu bulunduğu düşünülmektedir. Bu çalışma, Sillyon antik kentinin tarihi ve arkeolojik önemine katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Gradiyometrik manyetik yöntem, Sillyon, Yer radarı

Abstract

Geophysical studies in archaeological areas use effective archeogeophysical methods that offer a more economical, faster and non-destructive solution compared to classical archaeological techniques in investigating the location and geometry of buried cultural heritages. The most common of these are magnetic, ground electric and ground penetrating radar (GPR) methods. In this study, an archeogeophysical study was carried out to display possible buried archaeological remains in the Stadium area of the ancient city of Sillyon, located in the Pamphylia region of Antalya's Serik district, in the middle of Aspendos and Perge. In this context, vertical gradiometric magnetic total field, dipole-dipole two-dimensional electrical resistivity and ground radar methods, which are non-destructive methods of archeogeophysics, were used in the study area. Within the framework of the findings obtained, determinations were made that could guide the excavation works. Magnetic anomaly findings of the stands were obtained in the middle part of the stadium area, and it is thought that there is a water flow path that cuts the area vertically on the north side of the stadium. This study contributes to the historical and archaeological importance of the ancient city of Sillyon.

Keywords: Gradiometric magnetic method, Sillyon, Georadar

* Engin-Erçetin; engin.ercetin@ogr.iuc.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Arkeoloji, eski uygarlıkları keşfetmemizi ve anlamamızı sağlayan bir bilim dalıdır. Geleneksel olarak arkeologlar, yerin altına gömülü eserleri ve yapıları ortaya çıkarmak için önce yüzey araştırmaları yapmışlar, ardından bulunan sonuçlara göre kazım işlemine başlamışlardır. Ancak teknolojinin gelişmesiyle birlikte jeofizik bilimi, gömülü arkeolojik kalıntıları tespit etmek ve haritalamak için çeşitli bilimsel teknikler kullanarak arkeoloji bilimine zamandan ve maliyetten kazanmak adına yaklaşımlar sunmaktadır. Arkeolojik kültürel mirasın korunmasında jeofizik, her biri farklı türdeki yeraltı özelliklerini tespit etmek için tasarlanmış bir dizi yöntemi kapsar. Kullanılan en temel teknikler, yer radarı, yer elektrik ve manyetik yöntemlerdir.

Arkeolojik alanların araştırılmasında jeofizik yöntemlerden faydalanılması 1940'lı yıllara dayanır. Arkeolojik bir alanda ilk olarak [Atkinson \(1946\)](#) çalışmasında uygulanan elektrik özdirenç uygulamasından itibaren bu alandaki jeofizik uygulamalar giderek daha çeşitlenmiş ve sık kullanılır hale gelmiştir ([Wynn,1986](#)). [Pecchioli vd. \(2020\)](#) çalışmasında kültürel mirasın araştırılması ve korunması ile ilgili jeofiziğin yanı sıra sismolojiye de değinerek koruma kapsamında deprem gibi dinamik yükler karşısında arkeolojinin aradığı cevapların yanıtlanabileceğinden bahsetmişlerdir. Jeofizik yöntemlerin sahada uygulanması konusunda ise [Martorana vd. \(2023\)](#) genelleştirilmiş bir iş akış şeması oluşturmuşlar, yer elektirik özdirenç, yer radarı ve manyetik yöntemler arasında çözünürlük, araştırma derinliği, araştırma alanı, maliyet ve zaman karşılaştırması yapmışlardır. Kültürel mirasın araştırılması ve korunmasında elde edilen sonuçların doğruluğu ile ilgili çalışmalar ise hem sayısal ortamda modelleme çalışması yapılarak hem de arazi çalışmalarını bu modellemeler ile karşılaştırarak [Eppelbaum \(2022\)](#) tarafından başarılı bir şekilde gösterilmiştir.

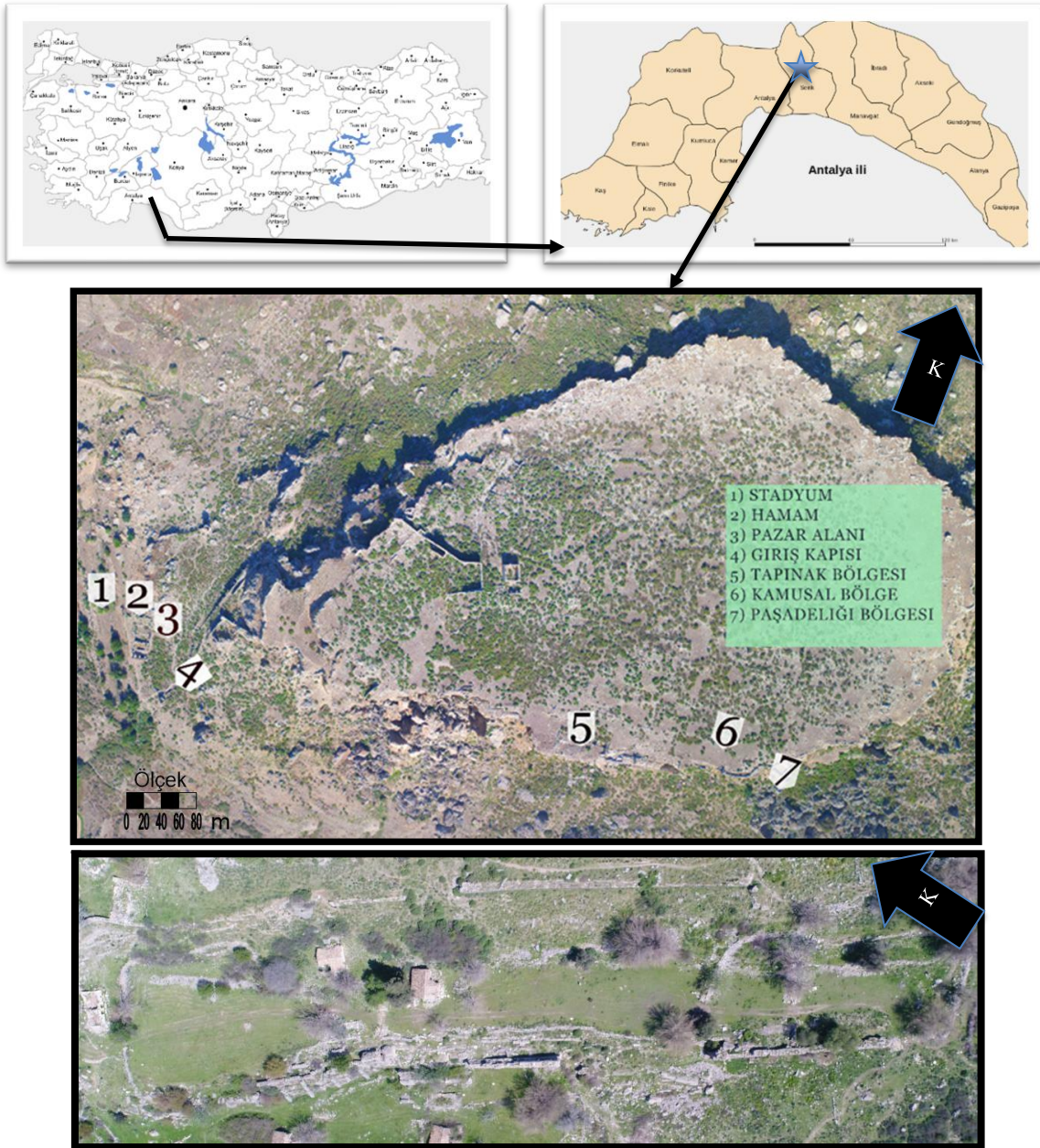
Dünya genelinde arkeolojik alanlarda jeofizik çalışmaların birçok başarılı uygulaması vardır. Örneğin 2015 yılında [Evangelista vd. \(2017\)](#) İtalya' nın Napoli şehrinde bulunan bir kültürel miras olan Santa Maria del Carmine kilisesinde zemin araştırmaları yapmışlardır. Çan kulesi ve kilisenin zeminini kapsayacak şekilde jeoradar çalışmaları yapılmış, özdirenç yöntemi ile zeminin yapısı belirlenmiştir. Yıkılma tehlikesi olan bu çan kulesi ile ilgili geoteknik hesapların yapılması gerektiğine kanaat getirmişlerdir. Deiana ve Previato (2023) ise İtalya'nın kuzeydoğu bölgesinde eski bir Roma tiyatrosunu yer elektrik özdirenç ve yer radarı yöntemleriyle araştırmışlar ve başarılı sonuçlar sunmuşlardır. [Piro vd. \(2023\)](#) İtalya' nın Roma şehrinde, Tusculum arkeolojik sahasında yaptıkları çalışma ile 400 MHz antene sahip yer radarı ile yüksek çözünürlükte sonuçlar elde etmişler ve bu çalışmalarını özdirenç ve manyetik yöntemler ile pekiştirerek araştırma sahasındaki gömülü yapısal bütünlüğü göstermeye çalışmışlardır. Türkiye'de ise [Sayın vd., 1995](#) yılında yayınladıkları çalışma ile Manyetik ve Doğal Uçlaşma (SP) yöntemi ile Menekçe Çatağı Höyüğünde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kazı çalışmaları da gerçekleştirilen bu bulgularda, Troya 2 olarak isimlendirilen açmalarda, çatısı büyük kiremitlerle örtülmüş helenistik döneme ait yapılar ve fırın bulunmuştur. [Sayın vd. \(1997\)](#), yaptıkları çalışmada manyetik gradiometre ölçümlerine farklı filtreler uygulayarak verilerin yorumunu kolaylaştırmışlardır.

[Rabbel vd. \(2015\)](#) ise İznik gölünde bulunan Bizans kilisesinde yer radarı ve özdirenç yöntemlerinin yanı sıra, manyetik ve gravimetrik çalışmalar da gerçekleştirmişler ve birbirleri ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. [Yılmaz vd. \(2018\)](#) ise Isparta ilinde bulunan Kılıç ören yerinde yer radarı, manyetik yöntem ve yer elektrik yöntemi ile başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, Antalya ili Serik ilçesi sınırlarında yer alan Sillyon antik kentinin öncelikli araştırma sahalarından biri olan Stadyum alanında olası gömülü arkeolojik yapı kalıntılarının araştırılması amacıyla gerçekleştirilen bir manyetik, yer elektrik ve yer radarı çalışmasının sonuçları sunulmaktadır. Sillyon antik kenti oldukça engebeli ve yüksek bir tepeye kurulmuş olmasından dolayı kale şehir olarak adlandırıldığı da bilinmektedir ([Özdemir & Taşkiran, 2021](#)). Şehrin batı cephesinde bulunan Stadyum, Roma İmparatorluk Dönemi zamanında kamusal kullanım amaçlı olarak inşa edilen, kent gelişimine uygun şekilde, halkın sosyalleşme alanı olarak 254 metre uzunluğunda ve 48 metre genişliğinde şehrin en büyük yapısıdır ([Taşkiran, 2021](#)). Özellikle batı yamacında bulunan doğal su kaynakları ve jeolojik koşullar, Roma imparatorluğu'nun savunma sistemini oluşturmuş ve stadyum, roma hamamı gibi önemli kamu binalarının inşa edilmesine sebebiyet vermiştir. Ayrıca bu jeolojik koşullar, Roma imparatorluğu zamanında savunma sisteminin de şekillendirmiştir ([Taşkiran & Bacanlı, 2022](#)). Arkeolojik sahalarda gerçekleştirilen jeofizik çalışmaların önemi ise, gömülü özellikleri yapıları ortaya çıkarma, eski uygarlıklar hakkındaki bilgimizi genişletme ve gelecek nesiller için değerli kültürel mirası koruma becerisinde yatmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak [Deiana vd.](#)

(2018), Rizzo vd. (2018), Herrmann vd. (2017), Masini vd. (2017), Casana vd. (2014), Dirix vd. (2013) gösterilebilir.

Sillyon antik kentinde ilk çalışmalar [Lurje \(1959\)](#) tarafından, şehirde bulunan yazıtların çevirileri ile ilgili olurken, bu çalışmaya ek olarak [Van Bremen \(1994\)](#) ise Sillyon yazıtlarında bulunan bir aile ile ilgili olarak ayrıntılı araştırmalar yapmıştır. Sillyon antik kentinde yüzey araştırmaları ise [Özer ve Taşkiran \(2009\)](#) önderliğinde başlamıştır. Bahsedilen bu ve diğer çalışmalarda, farklı kültürel katmanların bulunduğu oldukça ilginç ve karmaşık bir topoğrafyaya sahip olan Sillyon antik kentinde jeofizik araştırmalar gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle, bu çalışmada çeşitli ölçeklerde ve yerlerde jeofizik araştırmalar yapılmıştır. Çalışma alanlarındaki yıkıntılar, uzun ve sert bitki örtüsü ve eğimli arazi nedeniyle sınırlandırmalar olsa da iyi sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle manyetik çalışmalarda, toprak yüzeye değmeksizin havadan yapılan ölçümler olduğu için jeoradar yöntemine göre veri elde etmek daha kolaydır. Bu çalışma Sillyon antik kentinde gerçekleştirilen ilk jeofizik çalışma olup, kültürel mirasın araştırılması amacıyla, zamandan ve maliyetten kazanılarak, kazı çalışmalarına yön vermesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Sillyon antik kenti uydu fotoğrafı üzerinde stadyum bölgesi ve jeofizik çalışma alanının gösterimi (Google Earth-2019)

Figure 1. Representation of the geophysical study areas and the stadium area on the satellite photo of the ancient city of Sillyon

2. Uygulanan jeofizik yöntemler

2. Applied geophysical methods

Bu çalışma kapsamında, arazi koşulları ve topoğrafik özellikler göz önünde bulundurularak, jeofizik yöntemler arasında çoğunlukla manyetik yöntem tercih edilmiştir. Bununla birlikte, arkeolojik yapılardaki alterasyondan kaynaklanan kaya kopmaları ve yüzeyde yaygın arkeolojik kalıntıların varlığı, çalışma alanının bitki örtüsü gibi faktörler yer radarı ölçümlerini kısıtlamıştır. Bu nedenle yer radarı yöntemi ancak ölçüme uygun alanlarda gerçekleştirilmiştir. Dipol-dipol iki boyutlu öz direnç yöntemi ise diğer veriler ışığında sadece odaklanılmak istenen alanlarda uygulanmıştır. Çalışma alanlarında toplanan, düşey gradiyometrik manyetik, dipol-dipol iki boyutlu öz direnç ve yer radarı verilerinin değerlendirme sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için ölçümler aynı karelej sisteminde elde edilmiştir.

Manyetik yöntem ilk olarak 1950'lerde kullanılmaya başlandı ve halen arkeolojik sorunların çözümüne yönelik araştırmalarda en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Manyetik yöntem, yeraltındaki yapıların ve etrafındaki toprak malzeme ile arasındaki süseptibilite kontrastını ve yapıların şekillerindeki farklılıkları nedeniyle meydana gelen manyetik alan değişimlerini ölçmek için kullanılır. Fırınlara, ocaklara, yanma çukurlarına, demir mineralleri ve özellikle pişmiş kilden yapılmış su kanalları, tuğla, kiremit ve çanak çömlekler bu yöntem ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ölçüm tekniği olarak düşey gradiyometrik manyetik ölçüm tekniği kullanılmıştır. Bu ölçüm tekniği, aynı düşey ekseninde üst üste konumlandırılmış iki farklı algılayıcı manyetik sensörün okuma değerlerinin farkları esasına dayanmakta ve böylece sığ derinlikteki yapıların araştırılmasında etkin olmaktadır (Şekil 2).



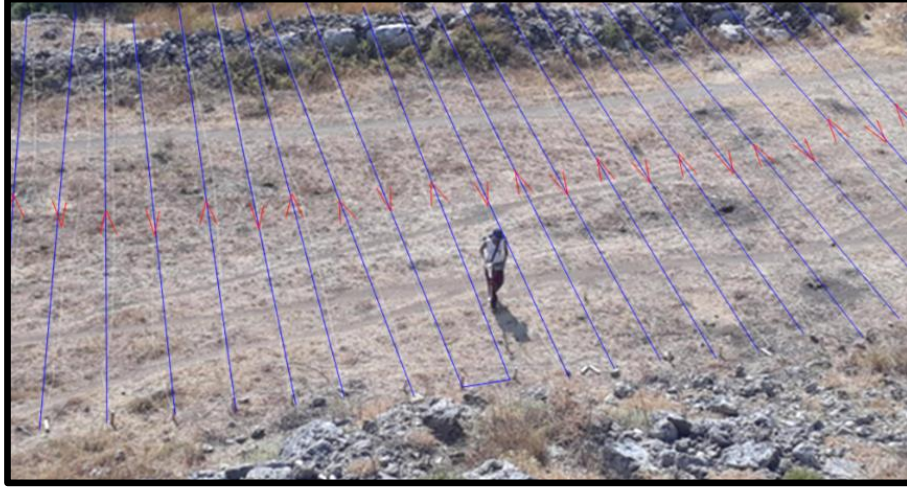
Şekil 2. Geometrics G-858 sezyum manyetometresi ve ölçüm alımı

Figure 2. Geometrics G-858 cesium magnetometer and measurement

Proton ve fluxgate manyetometreleri, arkeolojik araştırmalarda kullanılmaya başlanan ilk manyetometreler olarak bilinmekle beraber, 0.1 nT duyarlılıkta ölçümler yapabilmektedir. Alkali-buharlı manyetometreler, Picotesla (pT) mertebesinde ölçüm yaparlar. Kullanılan alkali metallere göre bu manyetometreler sezyum veya potasyum manyetometreleri olarak adlandırılır. Bu çalışmada Geometrics G-858 sezyum manyetometresi kullanılmıştır. Bu cihaz 0.001 nT hassasiyetli, 250.000 ölçü kapasiteli, harici GPS ile konumlandırma imkânı sunan ve gradiyometrik ölçüm tekniğine uygun olarak tasarlanmıştır. Cihaza ve ölçüm tekniğine ilişkin arazi çalışmasından bir görünüm Şekil 2'de gösterilmiştir. Çalışma sahasında manyetik ölçümler, 0.5 metre profil aralıklarında toplam stadyum kuzey bölgesinde 96 hat, stadyum orta zemin bölgesinde 134 hat, stadyum orta tribün bölgesinde 130 hat boyunca zig-zag ölçüm tekniğinde ve profiller üzerinde saniyede 10 ölçüm ile sürekli okuma modunda gerçekleştirilmiştir. Ölçü düzenine ilişkin arazi çalışmasından bir görünüm Şekil 3'te gösterilmiştir.

Yakın yüzey araştırmaları için kullanılan ikincil bir yöntem olan yer radarı yöntemi, yüksek frekanslı elektromanyetik bir yöntemdir. Yer içinde ilerleyen elektromanyetik dalgalar, anomali oluşturabilecek

herhangi bir nesne ile karşılaştıklarında yansıma ve saçılmaya uğrayarak tekrar yüzeye geri ulaşırlar. Ardından, alıcı anten, kontrol ünitesi ve kayıtçı tarafından zamanla kaydedilir ve elde edilen izler yorumlanır. Bu yöntem arkeolojik sahalarda temel duvarların ve boşlukların araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada yer radarı ölçümleri için GSSI SIR 3000 marka yer radarı sistemi ve 400 Mhz anten kullanılmıştır. Ölçümler 0.5 metre aralıklı birbirine paralel hatlar boyunca zig-zag ölçü düzeniyle gerçekleştirilmiştir. Yer radarı ölçümlerine ilişkin arazi çalışmasından bir görünüm Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Stadyum orta bölgesinde manyetik ölçümlerin alındığı profillerin gösterimi
Figure 3. Display of profiles where magnetic measurements are taken in the stadium middle area



Şekil 4. GSSI SIR-3000 yer radarı cihazı ile stadyum bölgesinde ölçü alımı
Figure 4. Measurement in the stadium area with GSSI SIR-3000 ground penetration radar

Elektrik yöntem arkeolojik sahalarda gömülü kültürel mirasın tahribatsız olarak araştırılmasında yine yaygın olarak kullanılan diğer bir jeofizik yöntemdir. Araştırılan yapıya göre çeşitli elektrot dizilimleri uygulanmaktadır. Bu çalışmada, olası yapı kalıntılarının konumlarının araştırılması için yanal yöndeki öz direnç değişimlerini belirleyebilmek amacıyla dipol-dipol elektrot dizilimi uygulanmıştır. Bu dizilimde ölçümler akım elektrotları ve potansiyel elektrotları arası 1 metre olacak şekilde 12 metrelik hat üzerinde potansiyel elektrotların kaydırılması ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Geoves marka cihaz ile stadyum bölgesinde ölçü alımı
Figure 5. Measurement in the stadium area with Geoves

3. Gradiyometrik manyetik, dipol-dipol iki boyutlu öz direnç ve yer radarı ölçüm bulguları

3. Gradiometric magnetic, dipole-dipole two dimension resistivity and ground penetrating radar measurement findings

Sillyon antik kentinde gömülü kalmış kültürel mirasın araştırılmasına yönelik çalışmalar Şekil 6'da verilmiştir. 1 numaralı mor renk ile çizilmiş alan stadyum kuzey manyetik ölçüm alanı, 2 numaralı siyah renk ile çizilmiş alan stadyum kuzey yer radarı ölçüm alanı, 3 numaralı siyah renk ile çizilmiş alan stadyum orta yer radarı ölçüm alanı, 4 numaralı mor renk ile çizilmiş alan stadyum orta zemin manyetik ölçüm alanı, 5 numaralı mor renk ile çizilmiş alan ise stadyum orta tribün manyetik ölçüm alanıdır. Dipol-dipol iki boyutlu öz direnç ölçü hatları ise, E1, E3 ve E4 olarak mavi renkle gösterilmiştir. Manyetik, yer radarı ve dipol-dipol ölçülerinin gösterildiği haritalar farklı renk skalaları kullanılarak hazırlanmıştır.



Şekil 6. Stadyum bölgesinde düşey gradiyometrik manyetik, öz direnç ve jeoradar ölçümlerinin alındığı alanlar (1) stadyum kuzey manyetik, (2) stadyum kuzey yer radarı, (3) stadyum orta yer radarı, (4) stadyum orta zemin manyetik, (5) stadyum orta tribün manyetik

Figure 6. Vertical Gradiometric magnetic, resistivity and ground radar measurements area in the stadium (1) Stadium north magnetic, (2) Stadium north ground radar, (3) Stadium middle ground radar, (4) Stadium middle ground magnetic, (5) Stadium center grandstand magnetic

3.1. Gradiyometrik manyetik bulguları

3.1 Gradiometric magnetic measurement findings

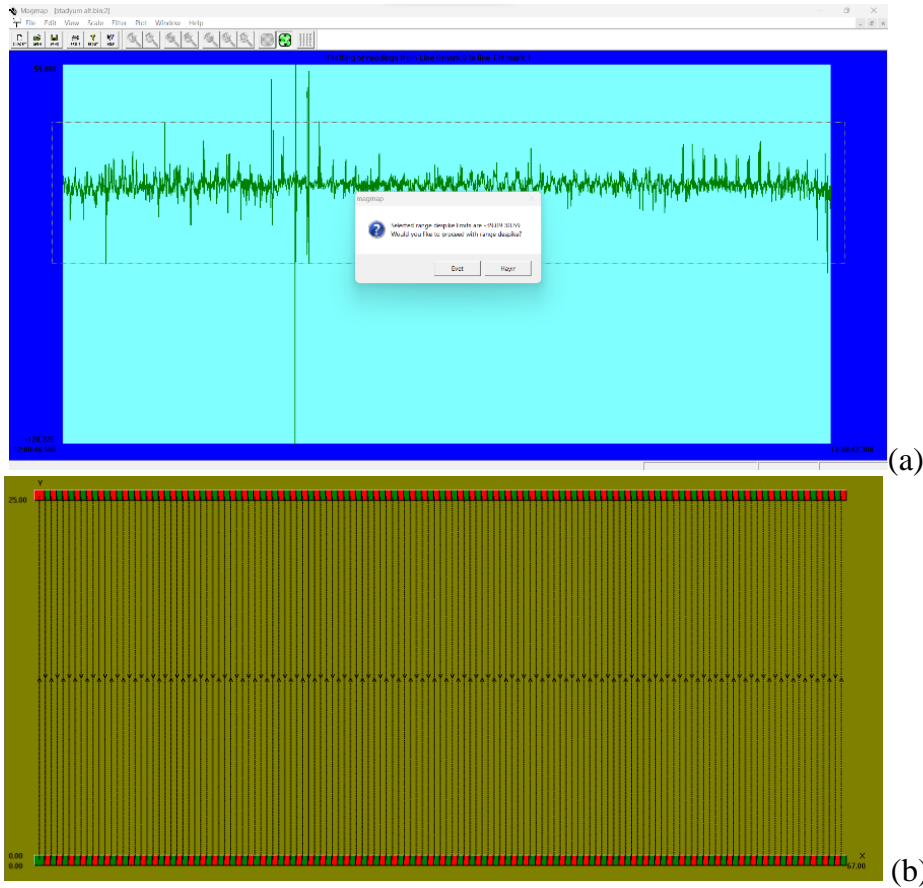
Stadyum olarak tanımlanan alanda, mor bir çizgi ile sınırlanan stadyum kuzey bölgesinde 96 hat, stadyum orta zemin bölgesinde 134 hat, stadyum orta tribün bölgesinde 130 hat üzerinde düşey gradiyometrik manyetik ölçümleri alınmıştır. Elde edilen düşey gradiyometrik manyetik anomali haritalarında, mavi renk düşük değerli anomalileri gösterirken, yüksek değerli anomaliler kırmızı renk kullanılarak ayrılmıştır.

Düşey gradiyometrik manyetik ölçümlerin verileri Magmap programında okutulmuş, geometrileri oluşturulmuş, bozucu etkilerin giderilmesi (range despike) ile baskın olan gürültülü veriler temizlenmiş, ardından Geosoft Oasis montaj programında yukarı analitik uzanım işlemi gerçekleştirilip, kutba indirgeme işlemi uygulanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Veri işlem akış diyagramı

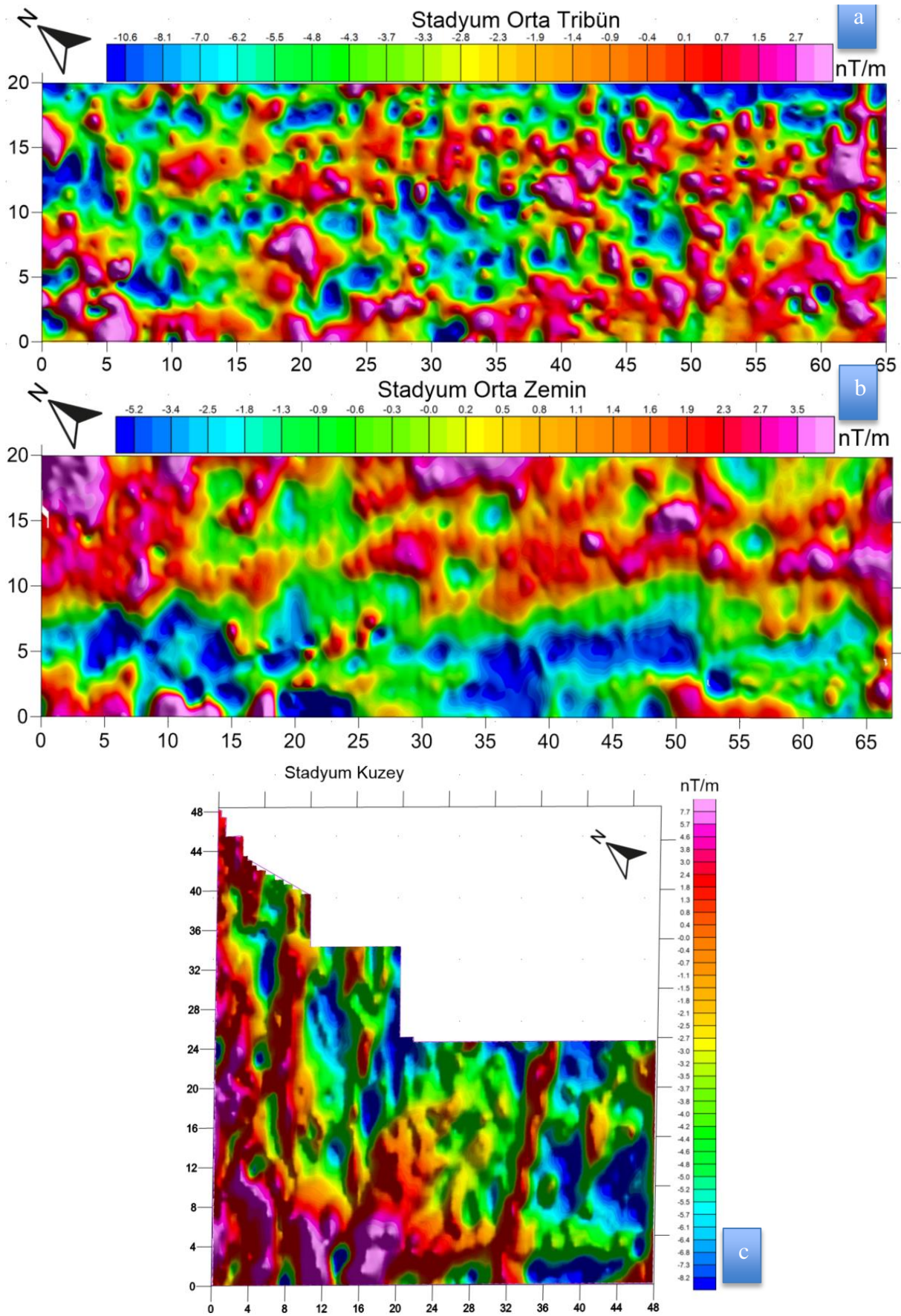
Figure 7. Data processing diagram



Şekil 8. (a)Bozucu etkilerin giderilmesi (range despike) ve (b) ölçü profillerinin gösterimi
Figure 8. (a) removal of disruptive effects (range despiking) and (b) measurement profiles

Tablo 1. Manyetik yöntemde gerçekleştirilen filtrelemelere ilişkin değerler
Table 1. Values for filtering performed in the magnetic method

Yukarı analitik uzanım		Kutba indirgeme	
Yukarı uzanım değeri	0.2	Eğim açısı (inklinasyon)	46.1417
		Sapma açısı (deklınasyon)	3.267

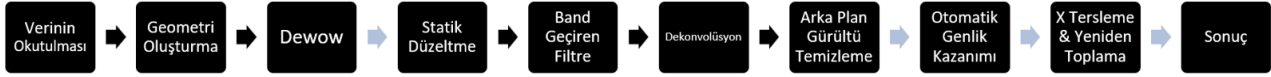


Şekil 9. Manyetik yöntem bulguları (a) stadyum orta tribün, (b) stadyum orta zemin, (c) stadyum kuzey
Figure 9. Magnetic method elements (a) stadium middle tribune, (b) stadium middle ground, (c) stadium north

3.2. Yer radarı bulguları

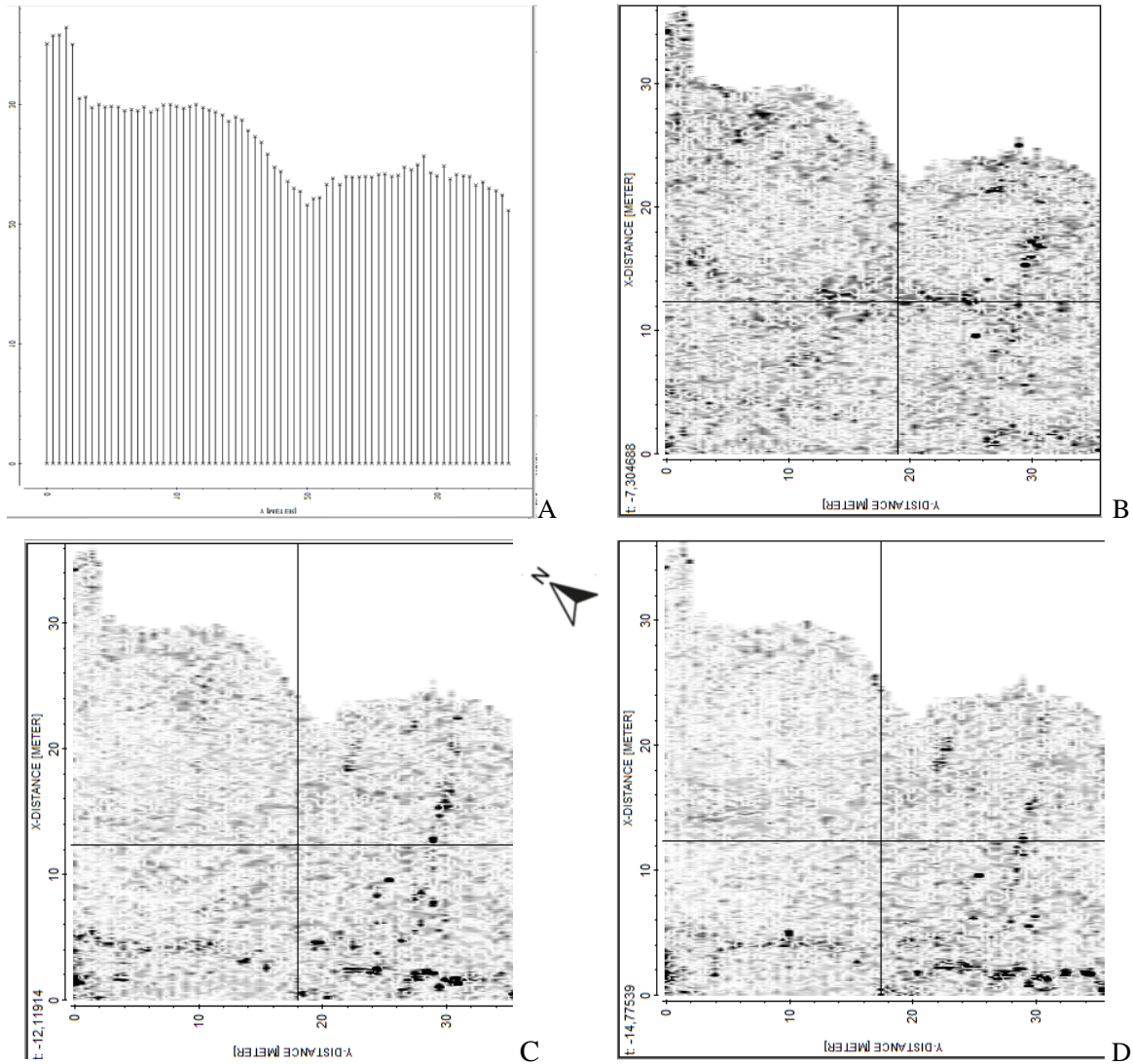
3.2. Ground penetrating radar measurement findings

Yer radarı kat haritalarında, siyah yüksek genlikli sinyalleri temsil ederken, düşük genlikli sinyalleri ise beyaz renk temsil etmektedir. Manyetik ölçümler ile karşılaştırma yapmak ve bağlantı kurmak için sınırları siyah çizgilerle gösterilen alanlarda yer radarı ölçümleri yapılmıştır (Şekil 6). Hem satdum kuzey hem de satdum orta bölge çalışmada, ölçümler birbirine paralel 0.50 metre aralıklı profiller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Jeoradar ölçümlerinde ise ilk olarak Reflexw programında. dzt uzantısından .dat uzantısına dönüştürülüp, geometrileri tanımlanmıştır. Sonrasında ise akım dewow, statik düzeltme, band geçiren filtre (band-pass), dekonvolüsyon ve arka plan gürültü temizleme (back ground removal) işlemleri uygulanarak, otomatik genlik kazanımları (AGC) gerçekleştirilmiştir (Şekil 10). En son aşamasında ise zig-zag yöntemi ile ölçü alınmasından dolayı, çift haneli datalar ters çevirilip, resampling komutu ile tüm datalar bir yere toplanılmıştır.



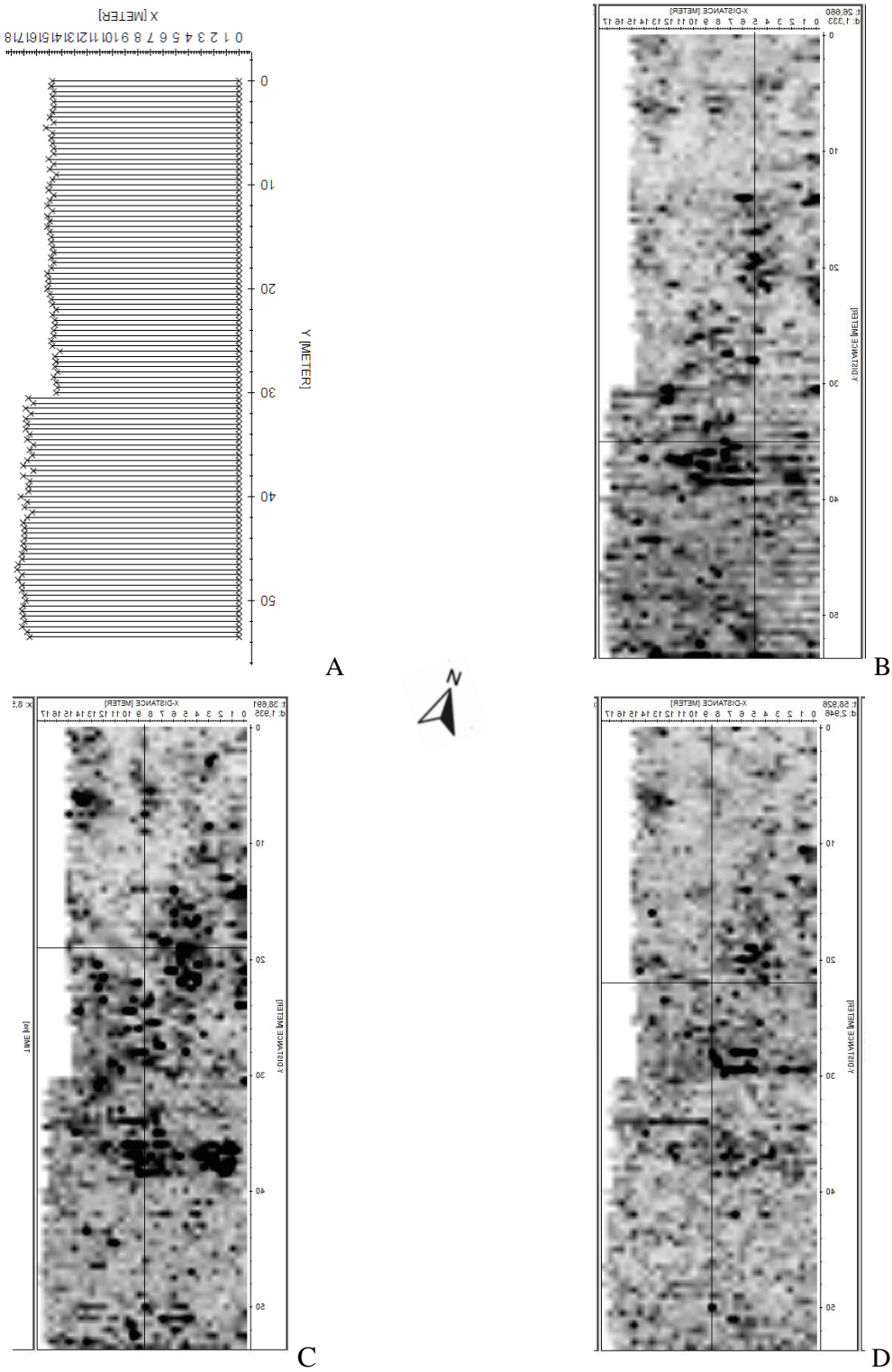
Şekil 10. Veri işlem akış diyagramı

Figure 10. Data processing diagram



Şekil 11. Stadyum kuzey bölgesi yer radarı kesitleri (a) ölçü profilleri, (b) 0,35 m., (c) 0,58 m., (d) 0,73 m.

Figure 11. Ground radar sections of the stadium north area (a) measurement profiles, (b) 0.35 m., (c) 0.58 m., (d) 0.73 m.



Şekil 12. Stadyum orta bölgesi yer radarı kesitleri (a) ölçü profilleri, (b) 1,33 m., (c) 1,93 m., (d) 2,94 m.

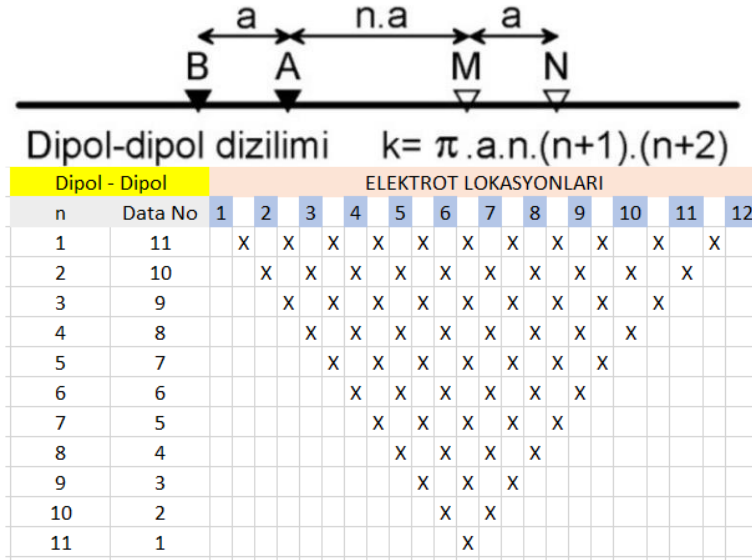
Figure 12. Ground radar sections of the stadium middle area (a) measurement profiles, (b) 1,33 m., (c) 1,93 m., (d) 2,94 m.

3.3. Yer elektrik öz direnç bulguları

3.3. Ground electric resistivity measurement findings

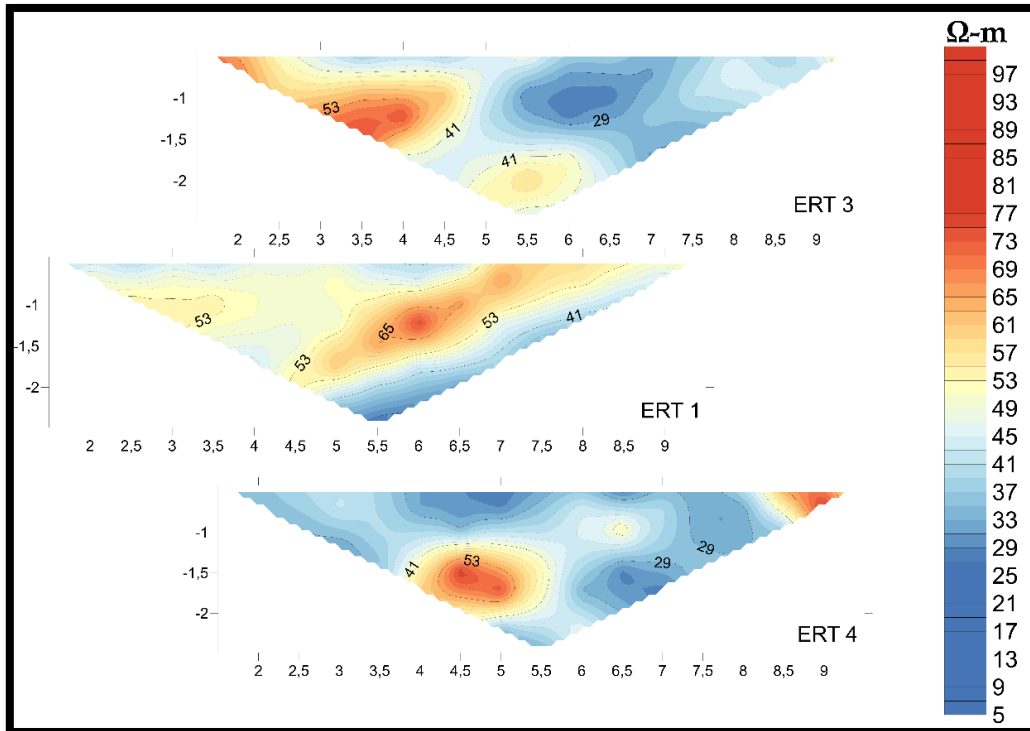
Manyetik yöntem ve yer radarı ölçümlere ek olarak iki boyutlu dipol-dipol öz direnç çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elektrik yöntemler arkeolojik sahalarda gömülü kalmış kültürel mirasın araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Araştırılan konuya göre elektrot dizimleri çeşitli varyasyonlarda

uygulanmaktadır. Söz konusu çalışma sahasında düşey yönde bir değişimden, yanal yönde bir değişimin araştırıldığı için, dipol-dipol dizilimi ile akım elektrotları ve potansiyel elektrotları arası 1 metre olacak şekilde 12 metrelik hat üzerinde potansiyel elektrotları kaydırılarak, manyetik ve yer radarı ölçü profillerine dik olacak şekilde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda amaç, manyetik ve yer radarı kat haritalarında gözlemlenen anomalilerin düşey kesitlerini irdelemektir. Akım ve potansiyel elektrotlarının arası birer metre olacak şekilde, akım elektrotları başta, potansiyel elektrotları ise kaydırmalı olacak şekilde 12 metrelik hat üzerinde ölçüm alınmıştır. Dipol-dipol iki boyutlu öz direnç yönteminde ise renk skalası düşük öz dirençli kısımlar mavi renkte yüksek öz dirençli kısımlar ise kırmızı renkte olacak şekilde ayrılmıştır.



Şekil 13. İki boyutlu dipol-dipol ölçü formülü ve elektrot şematığı (Griffiths ve Barker, 1993'ten değiştirilmiştir)

Figure 13. Two dimension dipole-dipole measurement formula and electrode scheme (revised via Griffiths ve Barker, 1993)



Şekil 14. Stadyum bölgesinde dipol-dipol iki boyutlu öz direnç sonuçları

Figure 14. Dipole-dipole two dimension resistivity anomaly maps in the stadium

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Arkeolojik alanlarda jeofizik çalışmalar, geleneksel kazı tekniklerine göre çok sayıda avantaj sunarak arkeoloji bilimine yardımcı olmaktadır. Kazıdan farklı olarak, jeofizik yöntemler sahanın fiziksel olarak bozulmasını gerektirmediği için, kazı sırasında zarar görebilecek hassas eserlerin ve yapıların korunmasına yardımcı olmaktadır. Jeofizik araştırmalar, geniş alanları nispeten hızlı bir şekilde kapsayarak, arkeologların tam ölçekli kazılara başlamadan önce potansiyel ilgi alanlarını belirlemelerine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım zamandan ve kaynaklardan tasarruf elde ettirirken, daha odaklı kazı stratejileri sağlar.

Bu çalışmada Sillyon antik kenti stadyum alanında olası gömülü arkeolojik kalıntıların görüntülenmesi amacıyla arkeolojik sahalarda tahribatsız araştırma kapsamında manyetik yöntem, yer radarı yöntemi ve yer elektrik yöntemlerinin kullanıldığı bir arkeojeofizik çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında bazı ölçüm alanlarında mevcut yıkıntılar, yoğun bitki örtüsü ve topoğrafik şartlar özellikle yer radarı uygulamasının bir kısım ölçülerinin gerçekleştirilmesini sınırlandırmıştır. Verilerin korelasyonlarının yapılabilmesi için aynı karelej sistemi kullanılmaya çalışılmıştır. Ancak, arkeolojik alanlardaki yıkıntılar ve zeminin düz olmaması nedeniyle ölçüler birebir örtüşmemiştir.

Bu çalışmada stadyumun kuzeyinde, ortasında ve tribünlerde olmak üzere 3 farklı alanda ölçüler yapılmıştır (Şekil 6).

Tribün Bölümü: Şekil 6' da 5 numara ile gösterilmiş bölümdür. 65 metre uzunluğunda ve 20 metre genişliğinde bir alanı kaplamaktadır. Şekil 17' de verilen düşey gradiyent manyetik anomali haritasına bakıldığında manyetik anomalilerde yatay birbirlerine paralel çizgisellikler harita üzerinde takip edilebilmektedir. Harita üzerinde beyaz kesikli çizgilerle bu alanlar işaretlenmiş ve B1 ve B2 olarak adlandırılmıştır. Bu anomaliler ölçü profillerine diktir. Dolayısıyla bu anomalilerin gürültü olarak değerlendirilmeyip bu alanların stadyumun tribünleri olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Bu alanın taşlık ve eğimin fazla olması nedeniyle jeoradar ve ERT çalışması yapılamamıştır.

Kuzey Bölümü: Şekil 6' da 1 ve 2 olarak belirtilen karelej alanında sırasıyla manyetik ve radar yöntemiyle ölçüler alınmıştır. Ayrıca E1, E3 ve E4 ile gösterilen 3 adet profil boyunca 2D dipol-dipol rezistivite alınmıştır. Şekil 18' de stadyumun kuzey bölümünde yapılan radar ölçülerinden elde edilen kat haritalarının yanında düşey gradiyent manyetik anomali haritası ve 2D dipol-dipol sonuçlarına da yer verilmiştir. Düşey gradiyent manyetik anomali haritasının güney kısmında verev olarak yüksek bir anomali izlenmiştir. Harita üzerinde bu hat siyah kesikli çizgilerle işaretlenmiştir. Bu hat aynı şekil üzerinde verilen 2D GPR profillerinden elde edilen 0.35m, 0.58 m ve 0.73 m kat haritalarında da izlenmektedir. Ayrıca Şekil 17' de bu hat üzerinde E1, E3 ve E4 hatlarının sonuçları verilmiştir. Dipol-dipol iki boyutlu görünür öz direnç veri işleminin neticesinde ise görüldüğü üzere birbirine paralel olarak dizilmiş üç farklı hatta da, bulunduğu düşük öz dirençli homojen zeminle karşılaştırıldığında, yüksek öz direnç değerine sahip, silindirik şeklinde bir yapı gözlemlenmiştir. Bu yapı ise tahmini olarak yüzeyden 1.50 m aşağıdadır. Genişliği ise 0.5 m çapındadır. Yanı sıra ERT sonuçlarında görüldüğü üzere ERT 4 isimli öz direnç haritasında, düşük öz direnç değerlerine sahip alanın, diğer iki profile göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bulunan anomalilerin çoğunun yeraltında gömülü kalmış duvar kalıntılarına işaret ettiği düşünülmektedir.

Orta Bölümü: Şekil 9' da stadyum bölgesinin orta kısmının düşey gradiyent manyetik anomalisi haritasını göstermektedir. Haritanın yukarı kısmında irili ufaklı birbirleriyle ilişkili anomaliler izlenmektedir. Stadyumun oturma alanlarında bulunan blok halindeki sıralı taş malzemenin bu anomalilere sebep olduğu düşünülmektedir. Ancak çalışma alanının yüzeyinde bulunan taş ve kaya döküntülerinin izleri de olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, yer radar verilerinin bu bölgedeki 1,93 m derinliği için elde edilen kat haritasında, anomalisi az belirgin olmasına karşın aynı alanın manyetik verisinde anomali varlığı gözlemlenmektedir (Şekil 12).

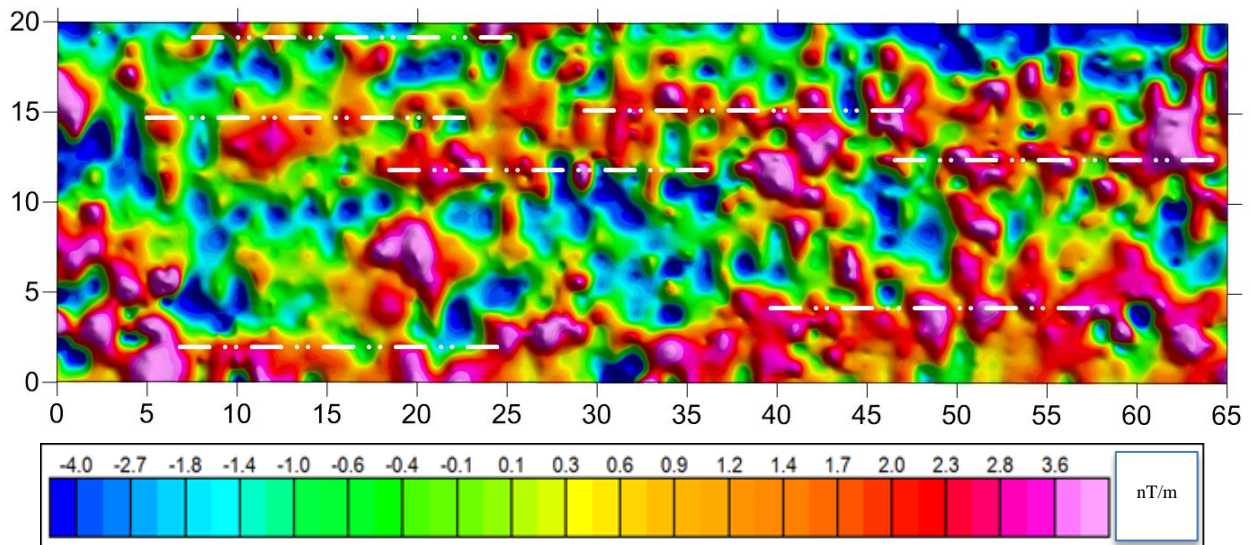
Şekil 15'te tribün bölgesinde gerçekleştirilen kazı çalışmaları, Şekil 16'da ise kazı planlaması yapılan tribünlerin görüntüsü bulunmaktadır.



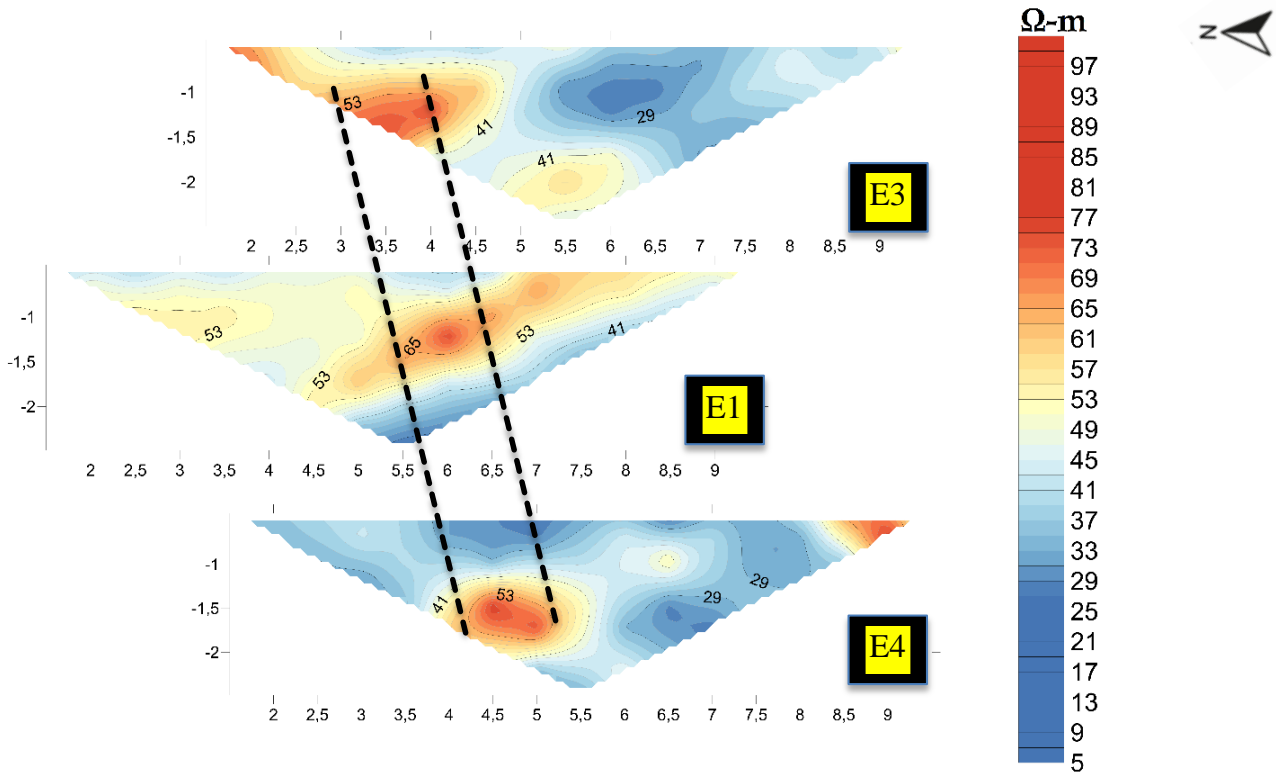
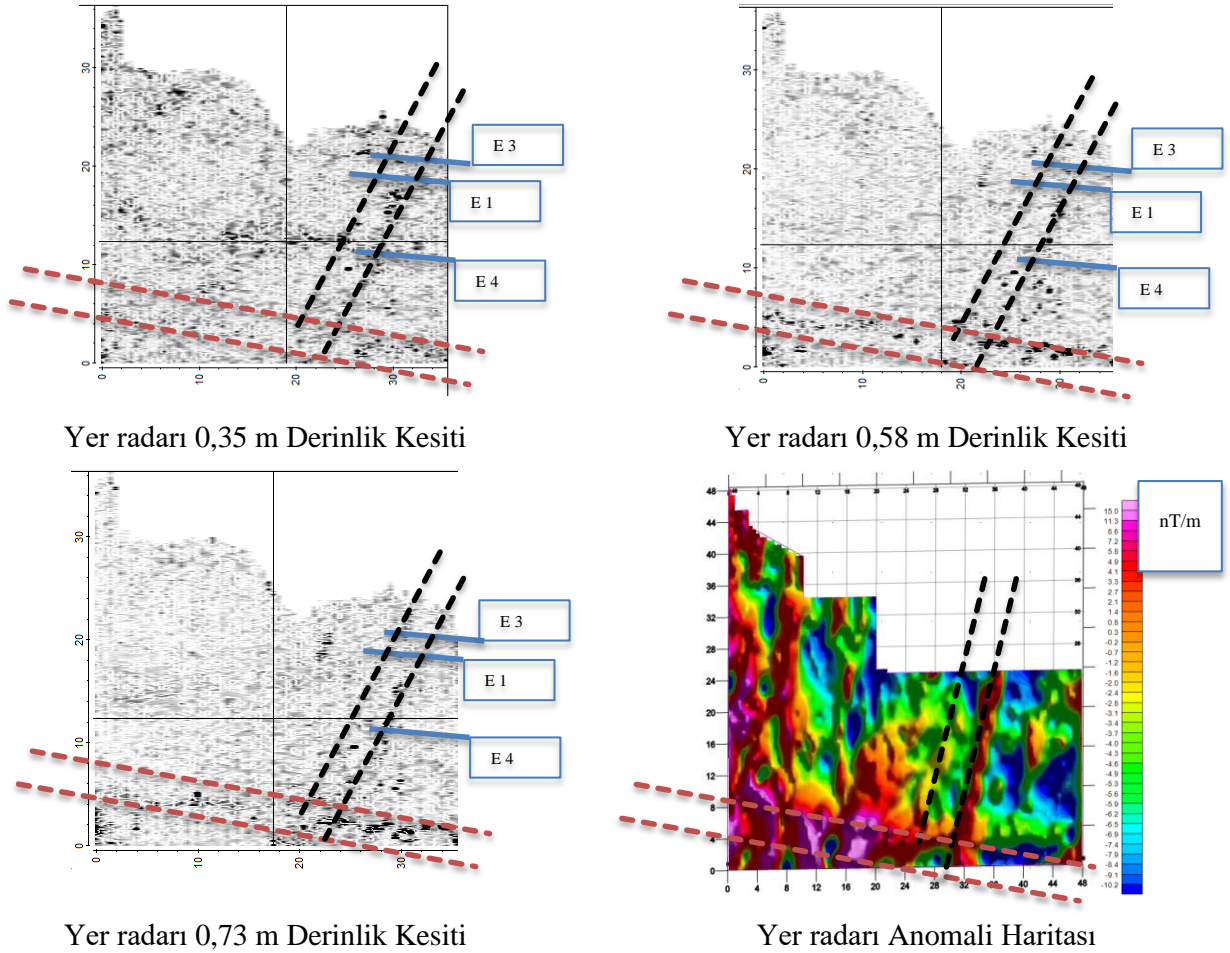
Şekil 15. Stadyum tribün bölgesinde gerçekleştirilen kazı çalışmaları
Figure 15. Excavations carried out in the stadium grandstand area



Şekil 16. Stadyum tribün bölgesinde kazılması planlanan alan
Figure 16. The area planned to be excavated in the stadium tribune area

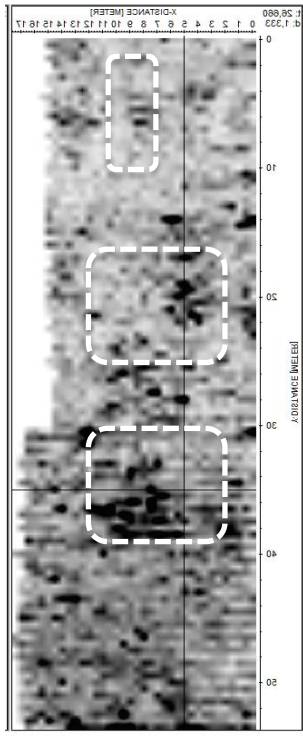


Şekil 17. Stadyum tribün bölgesinde düşey gradiyometrik manyetik anomali haritaları
Figure 17. Vertical gradiometric magnetic measurements anomaly maps in the stadium grandstand area

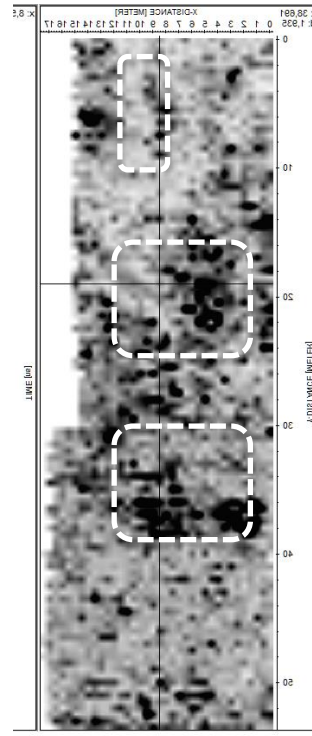


Şekil 18. Stadyum kuzey bölgesinde düşey gradiyometrik manyetik ve jeoradar kesitleri

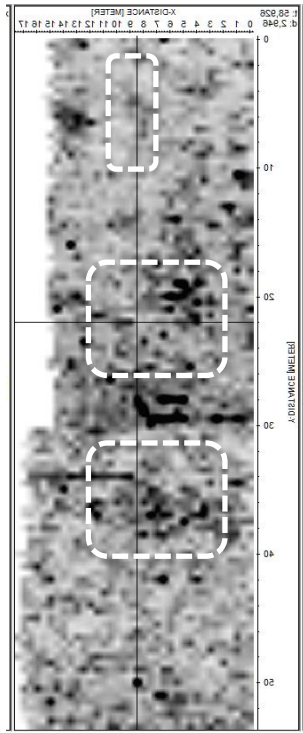
Figure 18. Vertical gradiometric magnetic and ground radar measurements anomaly maps in the stadium tribune area



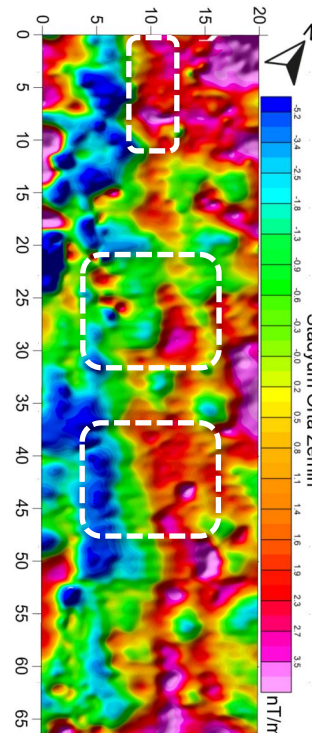
Yer radarı 1,33 m Derinlik Kesiti



Yer radarı 1,93 m Derinlik Kesiti



Yer radarı 2,94 m Derinlik Kesiti



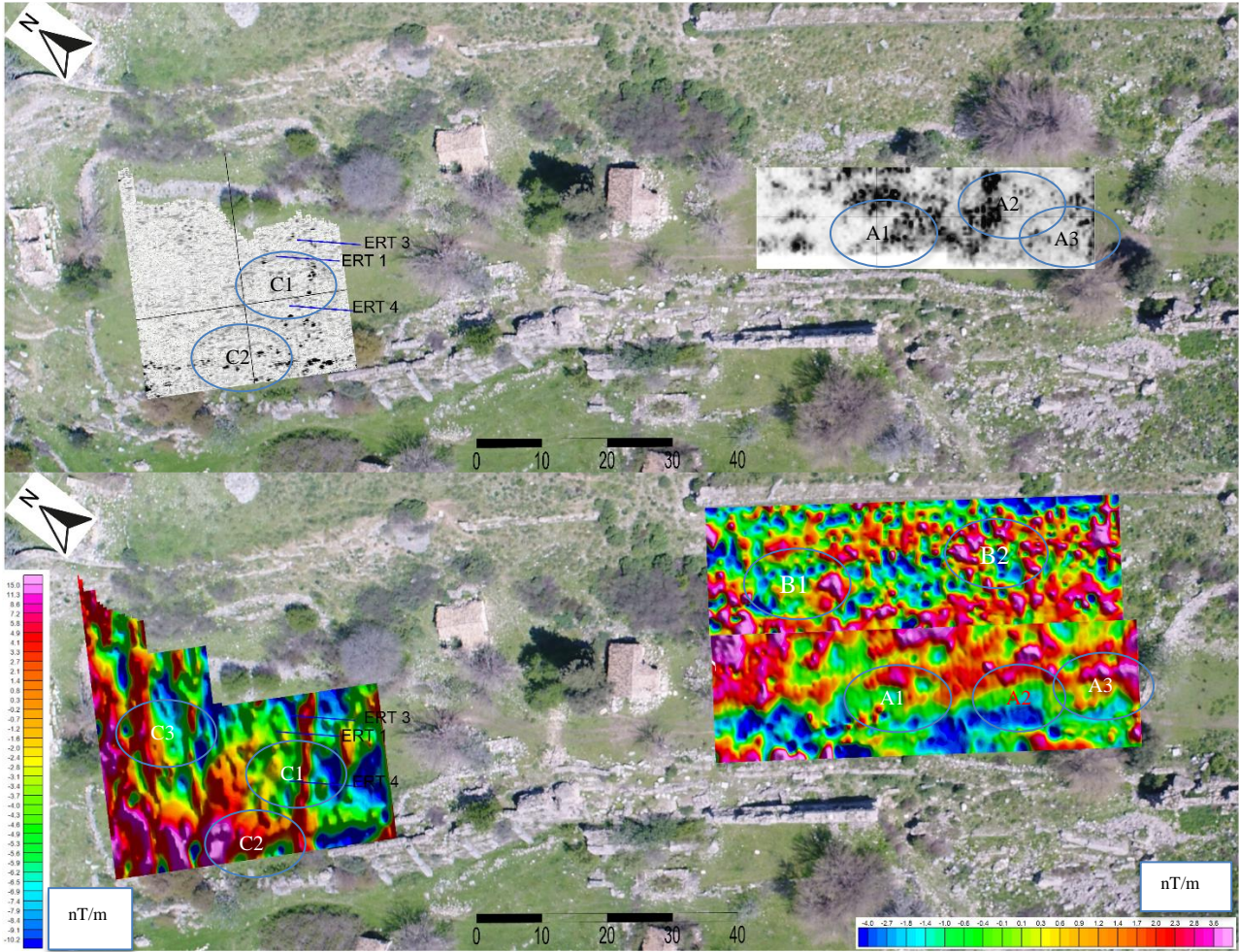
Manyetik Anomali Haritası

Şekil 19. Stadyum tribün bölgesinde düşey gradiyometrik manyetik anomali haritaları

Figure 19. Vertical gradiometric magnetic measurements anomaly maps in the stadium grandstand area

Şekil 19' da stadyum alanına ait jeoradar ve manyetik ölçüler birlikte değerlendirilmiştir. Yukarıda tarif edilen manyetik ve jeoradar kat haritalar üzerinde tespit edilen anomaliler bir yapı ile ilişkilendirilmiş ve harflerle gösterilmiştir. A1, A2, A3 ve A4 ile gösterilen bölgeler stadyumun orta alanı olup hem radar hem manyetik verilerde bir anomali olarak karşımıza çıkmaktadır. Stadyum ortasında gerek manyetik ve gerekse yer radarı

kat haritalarında satdyumun ortasında düzenli bir yapıya işaret eden anomaliler izlenmiştir. Özellikle manyetik haritada A2 ile gösterilen anomalinin yeraltındaki muhtemel duvarlara ya da yamaçtan yıkılan kaya bloklara ait olduğu düşünülmektedir (Şekil 20). Roma dönemi stadyum modelleri incelendiği zaman stadyumun ortasında bulunan dikili taş figürleri göze çarpmaktadır. Muhtemel duvar kalıntıları olarak düşünülen A2 anomalisi, antik çağlarda dikili taşın ayakta durduğu platform olarak değerlendirilebilir. Fakat yapılan araştırmalar neticesinde Sillyon kentinde nüfus yoğunluğu çevre kentlere göre daha az olması sebebiyle tarihsel açıdan böyle bir yapı olası görünmemektedir (Wimmer, 2016). O yüzden söz konusu anomalinin yıkılmış kaya bloklar olduğu üzerine yoğunlaşmıştır. Yine bu noktada stadyumun sınırlarının korunmuş olması ve jeomorfolojik açıdan herhangi bir yıkıntının olmadığı bölgede bulunması da yorum kısmını sınırlamaktadır.



Şekil 20. Stadyum bölgesinde düşey gradiometrik manyetik ve jeoradar ölçümleri anomali haritaları

Figure 20. Vertical gradiometric magnetic and ground radar measurements anomaly maps in the stadium area

Stadyum bölgesinin orta kısmının tribün bölgesinde ise, irili ufaklı birçok anomali katmanlarda görülebilir durumdadır. Stadyumun oturma alanlarında bulunan blok halindeki sıralı taş malzemenin bu anomalilere sebep olduğu düşünülmektedir. Ancak çalışma alanının yüzeyinde bulunan taş ve kaya döküntülerinin izleri de olduğu düşünülmektedir. Roma Hamamı ile stadyum bölgesinin arasında kalan tribün bölgesinde hamamdan yıkılmış olan kaya bloklar tribün bölgesine doğru devrilmiştir. Bu kaya bloklar ölçü alma şartlarını sınırlamaktadır. Anomali haritalarında negatif ve pozitif değerler ölçü hattına dik gelecek şekilde nizami sıralanmasının, kazı yapılan bölgenin güney cephesinde tribünlerin devam ettiğine ilişkin gösterge olarak yorumlanmıştır. İleriki bir kazı döneminde bu çalışmadan elde edilen bulgular ışığında çalışma sahasının arkeologları tarafından bir kazı planlaması düşünülmektedir.

Stadyum bölgesinin kuzey alanında ise, stadyumu diklemesine kesen bir su yolu olduğu olduğu düşünülmektedir. Manyetik anomali haritaları ve jeoradar sonuçlarında C1 isimli anomalinin açılı bir şekilde

KD-GB uzanımlı olduğu görülmektedir. Jeoradar sonuçlarında 0,73 metre derinliğe kadar devam eden anomali daha derinlerde bastırılmakta olup, gözlemlenmemektedir. Fakat elektrik yöntemin neticesinde derinlik analizi 1,50 metre derinliğe kadar devam ettiğini göstermektedir. Su taşıma amacıyla yamaçtan ovaya doğru inşa edilmiş olduğu düşünülen bu su kanalının, Roma döneminin mimarisine uygun olmadığı için, Bizans İmparatorluk dönemi ya da Osmanlı İmparatorluk döneminde, ovada bulunan köye içme suyu sağlamak ya da verimli tarım arazilerinin sulamak amacıyla inşa edildiği düşünülmektedir. Yamaç aşağı boyunca süzülen yer altı ve yer üstü sularının stadyumun güneybatı kısmında surların olduğu bölgede birikme gösterdiği düşünülmekte olup, bu su kanalının surlarla birleştiği noktada ise yıkılmalar meydana gelmiştir. Özdirenç değerlerine göre killi-siltli bir yapısı olduğu düşünülen stadyum bölgesinin içi, su beslenimi ile şişmeye maruz kalıp, surların olduğu bölgeyi yamaç aşağıya doğru ilerletmektedir. Deprem gibi dinamik yükler etkisinde ise alanda göçmeler ve stabilite problemleri ortaya çıkmaktadır.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Bilimsel Araştırma Projeleri birimi (İÜCBAP) tarafından 35071 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Bu araştırma, yazarın doktora tez çalışmasının bir parçasını oluşturmaktadır. Yazar, arazi çalışmalarındaki katkılarından dolayı Prof. Dr. Zihni Mümtaz Hisarlı'ya, yüzey araştırması başkanı Dr. Murat Taşkiran'a ve tüm kazı ekibine desteklerinden dolayı teşekkür eder.

Semboller (Gerekli durumlarda veya tercihen kullanılır)

Symbols

nT; nanoTesla

cm; Santimetre

Ωm; Ohm-Metre

MHz; MegaHertz

Yazar katkısı

Author contribution

Engin Erçetin: Makalenin her aşaması ve değerlendirilmelerinde katkı sağlamıştır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Casana, J., Kantner, J., Wiewel, A., & Cothren, J. (2014). Archaeological aerial thermography: a case study at the Chacoera Blue J community, New Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 45, 207-219. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.02.015>
- Deiana, R., Leucci, G., & Martorana, R. (2018). New perspectives on geophysics for archaeology: A special issue. *Surveys in Geophysics*, 39, 1035-1038. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9500-4>
- Deiana, R., & Previato, C. (2023). Geophysical surveys for archaeological research in urban areas: The case of the roman theatre in Padua. *Heritage*, 6(2), 946-956. <https://doi.org/10.3390/heritage6020052>

- Dirix, K., Muchez, P., Degryse, P., Kaptijn, E., Mušič, B., Vassilieva, E., & Poblome, J. (2013). Multi-element soil prospection aiding geophysical and archaeological survey on an archaeological site in suburban Sagalassos (SW-Turkey). *Journal of Archaeological Science*, 40(7), 2961-2970. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.02.033>
- di Santolo, A. S., Evangelista, L., Silvestri, F., Cavuoto, G., Di Fiore, V., Punzo, M., & Evangelista, A. (2015). Investigations on the stability conditions of a tuff cavity: the Cimitero delle Fontanelle in Naples. *Rivista Italiana di Geotecnica XLIX*, (3), 28-46.
- Eppelbaum, L. (2022). System of potential geophysical field application in archaeological prospection. S. D'Amico & V. Venuti (Eds.), *Handbook of Cultural Heritage Analysis*, 771-809. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7_27
- Evangelista, L., de Silva, F., d'Onofrio, A., Di Fiore, V., Silvestri, F., di Santolo, A. S., & Tarallo, D. (2017). Application of ERT and GPR geophysical testing to the subsoil characterization of cultural heritage sites in Napoli (Italy). *Measurement*, 104, 326-335. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.042>
- Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90005-J](https://doi.org/10.1016/0926-9851(93)90005-J)
- Herrmann, J. T., King, J. L., & Buikstra, J. E. (2014). Mapping the internal structure of Hopewell tumuli in the Lower Illinois River Valley through archaeological geophysics. *Advances in Archaeological Practice*, 2(3), 164-179. <https://doi.org/10.7183/2326-3768.2.3.164>
- Jol, H. M. (Ed.). (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier.
- Lurje, S. (1959). Burgfrieden in Sillyon. *Klio*, 37(1), 7-20. <https://doi.org/10.1524/klio.1959.37.jg.7>
- Martorana, R., Capizzi, P., Pisciotta, A., Scudero, S., & Bottari, C. (2023). An overview of geophysical techniques and their potential suitability for archaeological studies. *Heritage*, 6(3), 2886-2927. <https://doi.org/10.3390/heritage6030154>
- Masini, N., Capozzoli, L., Chen, P., Chen, F., Romano, G., Lu, P., & Lasaponara, R. (2017). Towards an operational use of geophysics for archaeology in Henan (China): Methodological approach and results in Kaifeng. *Remote Sensing*, 9(8), 809. <https://doi.org/10.3390/rs9080809>
- Özdemir, B. Ş., & Taşkıran, M. (2021). Sillyon'da Ares kültü. *Arkhaia Anatolika*, 4, 109-122. <https://doi.org/10.32949/Arkhaia.2021.28>
- Özer, E., & Taşkıran, M. (2010). Sillyon antik kenti ve çevresi yüzey araştırması 2009.
- Pappalardo, G., Imposa, S., Mineo, S., & Grassi, S. (2016). Evaluation of the stability of a rock cliff by means of geophysical and geomechanical surveys in a cultural heritage site (south-eastern Sicily). *Italian Journal of Geosciences*, 135(2), 308-323. <https://doi.org/10.3301/IJG.2015.31>
- Pecchioli, L., Panzera, F., & Poggi, V. (2020). Cultural heritage and earthquakes: Bridging the gap between geophysics, archaeoseismology and engineering. *Journal of Seismology*, 24, 725-728. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09936-1>
- Piro, S., Beolchini, V., Peña-Chocarro, L., & Pizzo, A. (2023). High resolution multi-methodological geophysical investigations to enhance the knowledge of Tusculum archaeological site (Roma, Italy). *Exploration Geophysics*, 2023,1-16. <https://doi.org/10.1080/08123985.2023.2210155>
- Rabbal, W., Erkul, E., Stümpel, H., Wunderlich, T., Pašteka, R., Papco, J., & Pekşen, E. (2015). Discovery of a Byzantine church in Iznik/Nicaea, Turkey: an educational case history of geophysical prospecting with combined methods in urban areas. *Archaeological Prospection*, 22(1), 1-20. <https://doi.org/10.1002/arp.1491>
- Rizzo, E., Santoriello, A., Capozzoli, L., De Martino, G., De Vita, C. B., Musmeci, D., & Perciante, F. (2018). Geophysical survey and archaeological data at Masseria Grasso (Benevento, Italy). *Surveys in Geophysics*, 39, 1201-1217. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9494-y>
- Solla, M., Gonçalves, L. M., Gonçalves, G., Francisco, C., Puente, I., Providência, P., & Rodrigues, H. (2020). A building information modeling approach to integrate geomatic data for the documentation and preservation of cultural heritage. *Remote Sensing*, 12(24), 4028. <https://doi.org/10.3390/rs12244028>

- Sayın, N., Tuncer, M., Orbay, N., Özdoğan, M., Özdoğan, A., Özçep, F. Menekşe Çatağında Arkeojeofizik Çalışmalar. *Jeofizik Dergisi*, 9(1).
- Taşkıran, M. (Ed.) (2021). *Sillyon çalışmaları II Pamphylia'nın mağrur kenti Sillyon (Karahisar-I Teke Kalesi) başlangıçtan günümüze bir kent panoraması (I)*. Ege Yayınları
- Taşkıran, M., & Bacanlı, Ü. G. (2022) Sillyon antik kenti su sistemi üzerine bir değerlendirme. *Mediterranean Journal of Humanities XII*, (2022), 143-163 <https://doi.org/10.13114/MJH.2022.579>
- Van Bremen, R. (1994). A family from Sillyon. *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik*, 43-56.
- Wimmer, M., Humann, I., & Martovitskaya, A. (2016). *Stadium Buildings*. DOM publishers.
- Wynn, J. C. (1986). A review of geophysical methods used in archaeology. *Geoarchaeology*, 1(3), 245-257. <https://doi.org/10.1002/gea.3340010302>
- Yılmaz, S., Oksum, E., Cakmak, O., Dogan, O., & Tekelioğlu, E. (2018). Preliminary results of an integrated archaeo-geophysical survey on the basis of ancient finds unearthed by an illegal excavation at Kılıç Ören site (Isparta, Turkey). *Archaeological Prospection*, 25(3), 197-207. <https://doi.org/10.1002/arp.1702>

Kaz Dağı civarındaki Kazdağ Masifi metamorfitlelerinin metamorfizma özellikleri, Edremit - Balıkesir

Metamorphism characteristics of Kazdağ Massif metamorphites around Kaz Mountain, Edremit - Balıkesir

Gürsel KANSUN *¹ , Gülçin ÖKMEN² 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

² Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 42250, Konya

• Geliş tarihi / Received: 16.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 28.07.2023

Öz

Kazdağ Masifi, amfibollü gnayslar, mikaşistler ve metakarbonatlardan oluşan Fındıklı formasyonu ile başlar. Üstte tektonik dokanakla, amfibolit ve metaofiyolitlerden yapılmış Tozlu formasyonu ve kristalize kireçtaşlarından oluşan Sarıkız formasyonu gözlenir. En üstte, yine tektonik bir dokanakla, çoğunlukla gnayslardan yapılmış Sütüven formasyonu yer alır. Kazdağ Masifi başlangıçta, etkileri Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında izlenen, epidot-amfibolit fasiyesinden (430-500 °C sıcaklık - 5-8 kbar basınç) amfibolit fasiyesinin staurolit-almandin alt fasiyesi'ne (550-625 °C sıcaklık - 5-8 kbar basınç - 20-30 km derinlik) doğru ilerleyen metamorfizmaya uğramıştır. Tozlu formasyonunda başlangıçta amfibolit fasiyesinde metamorfizma izlenir. Masif, daha sonra, etkileri Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında izlenen, 650-725 °C sıcaklık - 3-6 kbar basınç ve 10-20 km derinlikte, üst amfibolit fasiyesinin sillimanit-almandin-ortoklas alt fasiyesi'nde ilerleyen metamorfizmaya uğramıştır. Bu ikinci metamorfizma etkileri Tozlu formasyonunda gözlenmemektedir. Dolayısıyla, Tozlu formasyonunun amfibolit fasiyesindeki başlangıç metamorfizması, farklı bir ortamda gelişmiştir. Tozlu formasyonu Kazdağ Masifi içerisinde ayrı bir tektonik dilimdir. Tozlu formasyonunun Kazdağ Masifi içerisine yerleşmesi, dolayısıyla Kazdağ Masifi'nin kendi içerisinde tektonik dilimlenmesi, üst amfibolit fasiyesindeki ikinci metamorfizma evresinden sonra olmalıdır. Bu tektonik dilimlenmeden sonra, Masif'in tümü 375-430 °C sıcaklık - 2-3.5 kbar basınç ve ~10 km derinlikte yeşilist fasiyesinde gerileyen metamorfizmaya uğramıştır.

Anahtar kelimeler: Kazdağ Masifi, Polimetamorfizma, Porfiroblast-foliasyon ilişkisi

Abstract

The Kazdağ Massif begins with Fındıklı formation, which consists of amphibole gneisses, micaschists and metacarbonates. On top, with a tectonic contact, Tozlu formation consisting of amphibolites and metaophiolites and Sarıkız formation consisting of crystallized limestones are observed. At the top, again with a tectonic contact, Sütüven formation, which is mostly made of gneisses, is located. Initially, Kazdağ Massif was exposed to a progressive metamorphism from epidote-amphibolite facies (430-500 °C temperature - 5-8 kbar pressure) to staurolite-almandine sub-facies of amphibolite facies (550-625 °C temperature - 5-8 kbar pressure - 20-30 km depth) whose effects are observed in Fındıklı and Sütüven formations. In the Tozlu formation, the metamorphism is initially observed in amphibolite facies. Later, the Massif underwent the progressive metamorphism in the sillimanite-almandine-orthoclase sub-facies of the upper amphibolite facies at 650-725 °C temperature - 3-6 kbar pressure and at 10-20 km depth. This metamorphism is observed in Fındıklı and Sütüven formations. These second metamorphism effects are not observed in Tozlu formation. Therefore, amphibolite facies metamorphism of Tozlu formation developed in a different environment. Tozlu formation is the separate tectonic slice within Kazdağ Massif. The emplacement of Tozlu formation into Kazdağ Massif, and therefore the tectonic slicing of Kazdağ Massif within itself, must have been after second metamorphism stage in upper amphibolite facies. After this tectonic slicing, the whole of Massif underwent the regressive metamorphism in greenschist facies at 375-430 °C temperature - 2-3.5 kbar pressure and at depth of ~10 km.

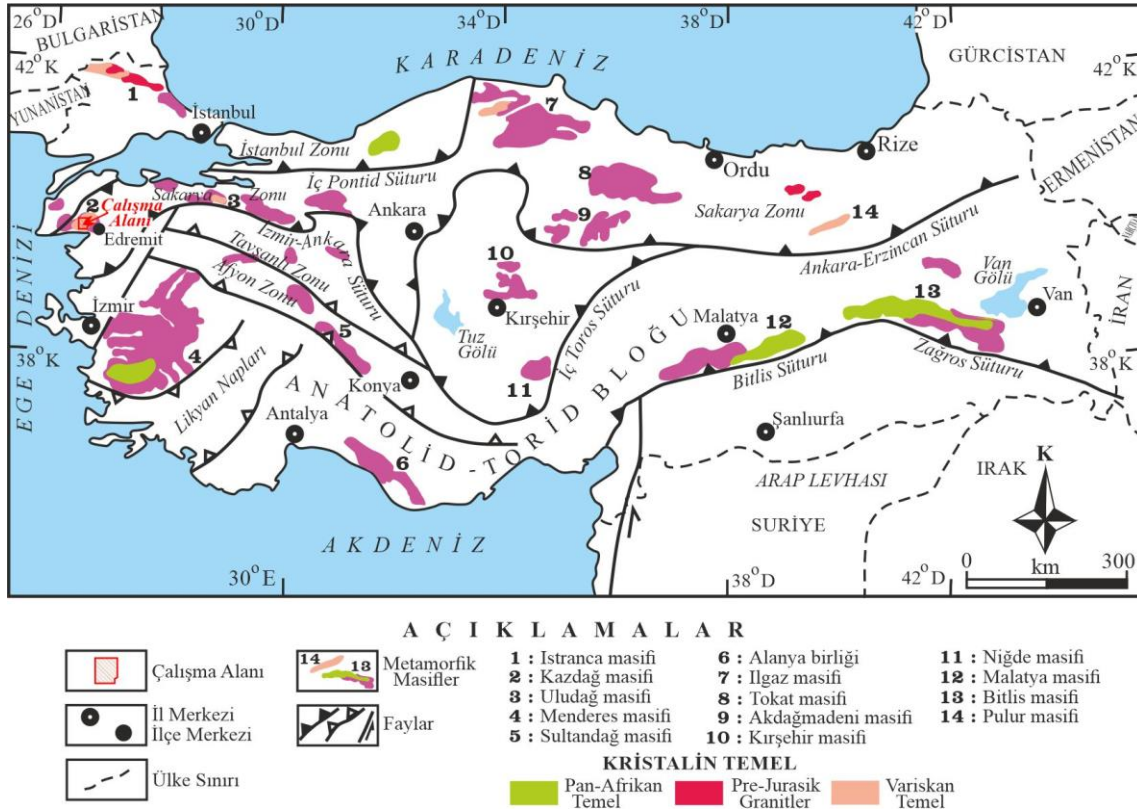
Keywords: Kazdağ Massif, Polymetamorphism, Porphyroblast-foliation relationship

* Gürsel Kansun; gkansun@ktun.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Çalışma alanı, Pontidler Tektonik Birliği içerisindeki Sakarya Kıtası'nın temelinde yüzeyleyen Kazdağ Masifi'ni (Okay vd., 1990) kapsar (Şekil 1 ve 2). Sakarya Kıtası'nın temelinde tektonik bir pencere şeklinde yüzeyleyen (Okay vd., 1990) ve Variskan temel özelliği gösteren (Okay & Tüysüz, 1999) Kazdağ Masifi, migmatitleşmeye kadar ulaşan yüksek sıcaklık - orta basınç metamorfizması ve polimetamorfizma özellikleriyle, Türkiye'nin önemli metamorfik masiflerinden bir tanesidir (Şekil 1).



Şekil 1. Türkiye'nin tektonik birlikleri ve kristalin temeller (Okay & Tüysüz, 1999) ile Türkiye'deki metamorfik masiflerin (Okay (2008)'den modifiye edildi) gösterimi.

Figure 1. Representation of Turkey's tectonic units and crystalline basements (Okay & Tüysüz, 1999) and metamorphic massifs in Turkey (modified from Okay (2008)).

Bingöl vd. (1973), bölgede Karakaya Kompleksi tarafından örtülen metamorfik kayalar Kazdağ Masifi olarak tanımlamışlardır. Kazdağ Masifi'nin stratigrafik özelliklerine yönelik bazı çalışmalar, sırasıyla Schuiling (1959), Gümüş (1964), Bingöl (1968, 1969, 1971) ve Bingöl vd. (1973) tarafından gerçekleştirilmiştir. Gözler vd. (1984), bu metamorfiklerin alta amfibolit fasiyesinde metamorfizmaya uğrayan migmatit, sillimanitli ve stavrolitli gnays, biyotitli gnays ve amfibollü gnaysdan oluştuğunu, üstte ise yeşilşist fasiyesinde metamorfizmaya uğrayan kuvars şist, mermer, kalkışist, yeşilşist, serpantin ve fillitden yapıldığını belirtmişlerdir. Gözler (1986) Kazdağ Masifi içerisinde metaofiyolitlerin yer aldığını ve bunların da amfibolit fasiyesinde metamorfizmaya uğradığını söylemektedir. Duru vd. (2004) ve Şentürk (2005), amfibolit fasiyesinde metamorfizma geçiren Kazdağ Masifi'nin alt seviyelerinde amfibollü gnays - mermer - amfibolit ardalanmasının yer aldığını, orta seviyelerinde mermerler ile örtülen metaofiyolitik kayaların bulunduğunu, üst seviyelerinde ise paragnays, ortognays ve migmatitlerin gözlemlendiğini belirtirler. Kazdağ Masifi'ndeki formasyonlar son metamorfizma öncesi yan yana gelmiş naplar şeklinde gözlenir (Duru vd., 2004). Okay ve Satır (2000) ve Erdoğan vd. (2013) Kazdağ Masifi'nin Alpin orojenezi sırasında sıkışma rejimi altında amfibolit - granülit fasiyesinde metamorfizmaya uğradığını söylemişlerdir. Okay ve Satır (2000), gnays, amfibolit ve mermerden oluşan Kazdağ Masifi metamorfik çekirdek kompleksinde gözledikleri "kuvars + plajiyoklas + biyotit + muskovit ± granat ± sillimanit" ve "kuvars + plajiyoklas + diyopsit + hornblend ± granat ± epidot ± skapolit" mineral parajenezlerine göre, Kazdağ Masifi'nde en yüksek şartlarda gerçekleşen metamorfizmanın Geç Oligosen - Erken Miyosen'de, 5±1 kbar basınç ve 640±50 °C sıcaklık şartlarında

meydana geldiğini ve bu metamorfizma ile Kazdağ metamorfitlelerinin birbiriyle uyumlu foliasyon ve lineasyon kazandıklarını belirtmektedirler. Şengün (2016), Kazdağ Masifi içerisindeki meta-ofiyolitik kayaçların, Masif içerisinde daha yüksek basınçlı ayrı bir tektonik dilim olduğunu ve ~660 °C sıcaklık - ~10 kbar basınç şartlarında amfibolit fasiyesinde metamorfizmaya uğradığını belirtmektedirler. Hasözbek vd. (2017), Kazdağ Masifi'nin altta okyanusal kabuk kökenli ultramafik kayaçlarla, üzerine uyumsuzlukla gelen kalın platform birlikleriyle (mermer ve migmatitler) ve bunlarla ardalanmalı metalavlar, yer yer ilksel dokusunu korumuş metagranitoidlerle temsil edildiğini ileri sürerler.

Kazdağ Masifi ile ilgili yapılan önceki çalışmalarda Masifin metamorfizma yaşı ile ilgili şu görüşler ileri sürülmüştür: Bingöl (1969), Kazdağ Masifi'ndeki iki gnays örneğinden K-Ar mika yaşlarını 26 ± 3 My ve 27 ± 3 My (Oligosen) olarak belirlemiştir. Sütüven formasyonu gnayslarından alınan iki örnekte Pb buharlaştırma yöntemiyle yapılan zirkon radyometrik yaşı 308 ± 16 my (Karbonifer) olarak belirlenmiş ve bu Kazdağ metamorfitlelerinin yüksek dereceli metamorfizma ve migmatitleşme yaşı olarak yorumlanmıştır (Okay vd., 1996). Okay ve Satır (2000), Kazdağ Masifi metamorfik çekirdek kompleksinde yer alan gnayslarda ortalama muskovit ve biyotit Rb ve Sr yaşlarının sırasıyla 19 my ve 22 my olduğunu ve bunun Geç Oligosen zamanda yüksek sıcaklık metamorfizmasına uğradığını belirtmektedirler. Hasözbek vd. (2017), Kazdağ Masifi'ndeki metagranitoidlerden elde edilen zirkonların metamorfik kökenli oldukları ve Kazdağ Masifi ana metamorfizma başlangıcının yaklaşık 60-69 My (Geç Kretase – Paleosen) olduğunu ve son evre yaşlarının da 22-26 My (Oligosen – Erken Miyosen) aralığında olduğunu söyler. Kazdağ Masifi'nde önceki çalışmalarda tespit edilen bu yaş farklılıkları, "Tartışma ve sonuçlar" bölümünde ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Kazdağ Masifi, özellikle alt seviyelerinde gözlenen amfibollü ve biyotitli gnayslardaki polimetamorfizma özellikleri ve üst seviyelerindeki paragnayslarda anateksiye kadar ulaşan sıcaklık şartlarıyla önemli bir metamorfizma - deformasyon tarihçesine sahiptir. Önceki çalışmalarda bu polimetamorfizma özellikleri ayrıntılı olarak verilmemiştir. Bu çalışmada, Kazdağ Masifi'ndeki bu polimetamorfik kayaçların porfiroblast – foliasyon ilişkileri de gözönüne alınarak, Kazdağ Masifi'nin metamorfizma tarihçesinin yorumlanması amaçlanmıştır.

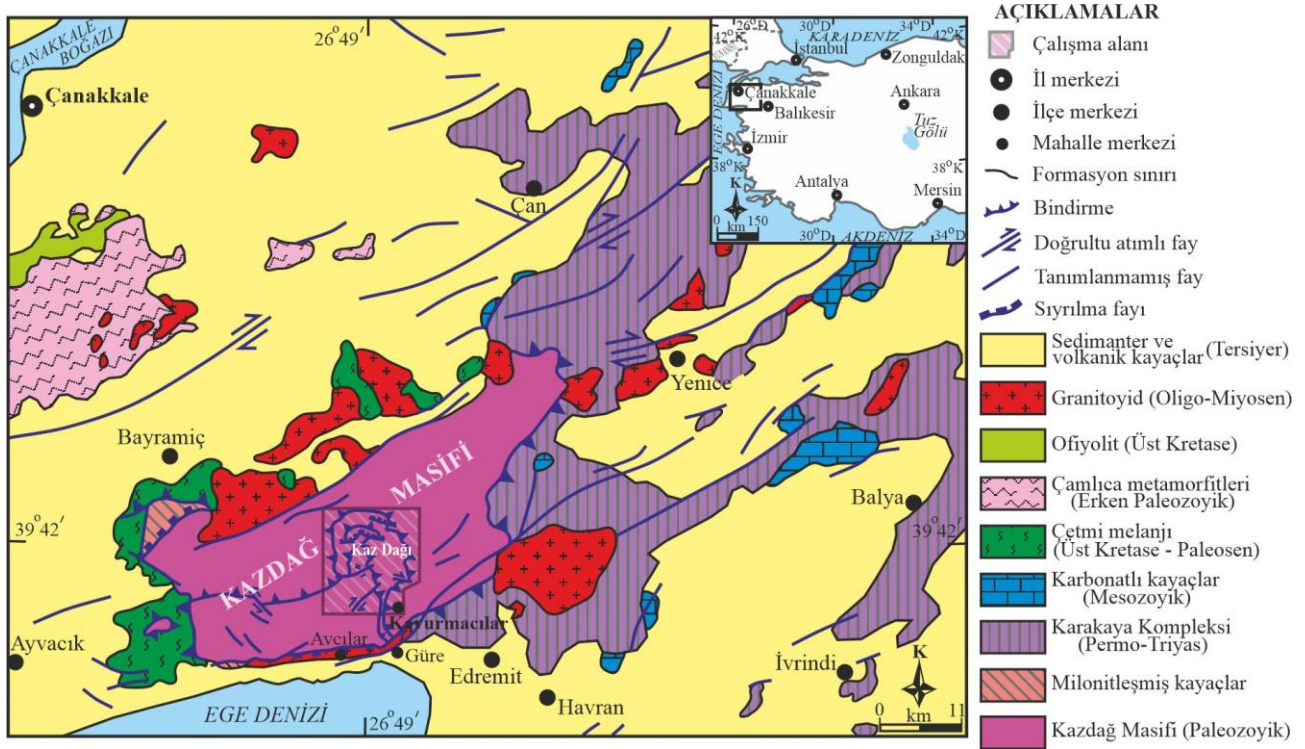
2. Bölgesel stratigrafi ve Kazdağ Masifi'nin konumu

2. Regional stratigraphy and location of Kazdağ Massif

Kuzeybatı Anadolu'da Biga Yarımadası'nda yer alan Kazdağ Masifi (Şekil 2) Sakarya Kıtası'nın temelinde tektonik bir pencere şeklinde gözlenir (Okay vd., 1990). Kazdağ Masifi'nin yapısı, kıvrım eksenini KD-GB doğrultulu ve her iki yöne dalımlı bir antiklinoryum şeklindedir (Duru vd., 2004).

Bölgede Kazdağ Masifi'nin tabanı izlenememektedir. Kazdağ Masifi üstten Permiyen - Miyosen yaşlı litolojilerle tektonik dokanaklıdır (Okay vd., 1990; Okay & Satır, 2000; Duru vd., 2004). Kazdağ Masifi'nin kuzey ve doğusunda Permo-Triyas yaşlı Karakaya kompleksi tektonik bir dokanakla yer alır (Okay vd., 1990; Duru vd., 2004). Bu birim Bingöl vd. (1973) tarafından, Permo-Karbonifer yaşlı kireçtaşı olistolit blokları içeren ve düşük dereceli metamorfik ve sedimanter kayaçlardan oluşan Triyas yaşlı Karakaya formasyonu olarak tanımlanmıştır. Okay vd. (1990) ise farklı tektonostratigrafik birimlerden (Nilüfer birimi, Çal birimi, Orhanlar grovağı ve Hodul birimi) oluşan bu birimi Triyas yaşlı Karakaya Kompleksi olarak adlandırmıştır. Kazdağ Masifi batıda Geç Kretase – Paleosen yaşlı Çetmi melanjı (Okay vd., 1991; Okay & Satır, 2000) tarafından yine tektonik bir dokanakla örtülür. Çetmi melanjı mafik volkanik ve volkanoklastik kayaçlar, Geç Triyas – Geç Kretase yaşlı kireçtaşı blokları ve şeyl, grovak, çört, serpantinit, granat-mika şist ve eklojit tektonik dilimleri içerir (Duru vd., 2004). Bölgede, Karakaya kompleksi ve Çetmi melanjı Tersiyer yaşlı sedimanter ve volkanik kayaçlar tarafından uyumsuzlukla örtülür (Duru vd., 2004; Şengün, 2016). Oligo-Miyosen yaşlı granitoidler hem Kazdağ Masifi'ne hem de çevredeki kayaçlar içerisine sokulum yapmıştır (Okay vd., 1990; Duru vd., 2004; Şentürk, 2005; Şengün, 2016).

Kazdağ Masifi'ne ait gnaysların üzerinde kalın bir milonitik zon gözlenir (Okay vd., 1991; Okay & Satır, 2000). Kazdağ Masifi'nin batı kenarında bulunan Alakeçi milonit zonundan 14-17 My (Miyosen) apatit iz yaşları elde edilmiştir. Bu yaşlar Kazdağ Masifi'nin yüzeylemesiyle ilişkilidir (Cavazza vd., 2009). Kazdağ metamorfitlelerinin son metamorfizma koşulları, masifin 15 km derinde olduğunu ve Oligo-Miyosen'den itibaren çevresindeki sıyrıma ve yanıl atımlı faylarla dom şeklinde yükselerek bugünkü konumunu kazandığını göstermektedir (Okay & Satır, 2000).



Şekil 2. Çanakkale – Ayvacık – İvrindi – Çan civarının (Biga yarımadası) genelleştirilmiş jeoloji haritası (Duru vd., 2004; Şengün, 2016 ve Özden vd., 2018'den değiştirilerek alınmıştır).

Figure 2. Generalized geological map of Çanakkale – Ayvacık – İvrindi – Çan vicinity (Biga peninsula) (modified from Duru et al., 2004; Şengün, 2016 and Özden et al., 2018).

3. Materyal ve metod

3. Material and method

Edremit İlçesi'ne (Balıkesir) ait Güre, Avcılar ve Kavurmacılar Mahallelerinin kuzeyinde yer alan Kaz Dağı ve civarında yapılan (Şekil 2) arazi çalışmaları 1/25000 ölçekli Ayvalık – İ 17-c1 ve İ 17-c2 topoğrafik harita paftaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araziye yer alan birimlerin sınırları ve çizgisel-düzlemsel yapılar topoğrafik haritalar üzerine çizilerek, bölgenin ayrıntılı 1/25000 ölçekli jeolojik haritası oluşturulmuştur. Çalışma alanından derlenen altere olmamış toplam 105 adet kayaç örneğinden Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü İnce Kesit Laboratuvarında ince kesitler yaptırılmıştır. Bunlar; mineralojik bileşim, doku-yapı özellikleri, porfiroblast – foliasyon ilişkileri, metamorfizma – deformasyon ilişkileri, mineral parajenezleri ve indeks minerallere göre metamorfizma özellikleri açısından Nikon marka polarizan mikroskop altında incelenmiştir.

Kazdağ Masifi'nde gözlenen kayaçların adlandırılmasında gnayslar, amfibolitler ve mikaşistler için Winkler (1979)'un düşük ve yüksek sıcaklıklı metamorfik kayaçların sınıflandırma diyagramları kullanılmıştır. Serpantinitler, bileşenlerinin yüzde miktarları ve kayaç yapıları dikkate alınarak adlandırılmıştır. Meta dunit, meta proksenit ve meta proksen-hornblendit olarak adlandırılan kayaçların, köken kayaç dokularını kısmen koruyarak metamorfizmaya uğradığı görülmüştür. Bu kayaçlar; mineralojik bileşim ve doku-yapı özellikleri göz önüne alınarak gabro, dunit, proksenit ve proksen-hornblendit şeklinde adlanmış, bu adlamaların başına metamorfizma geçirdiklerini gösteren meta- ön eki getirilmiştir. Kazdağ Masifi'ndeki metamorfizma şartları, metamorfitlelerdeki indeks mineraller ve mineral parajenezlerine göre, uygun basınç-sıcaklık diyagramları kullanılarak belirlenmiştir.

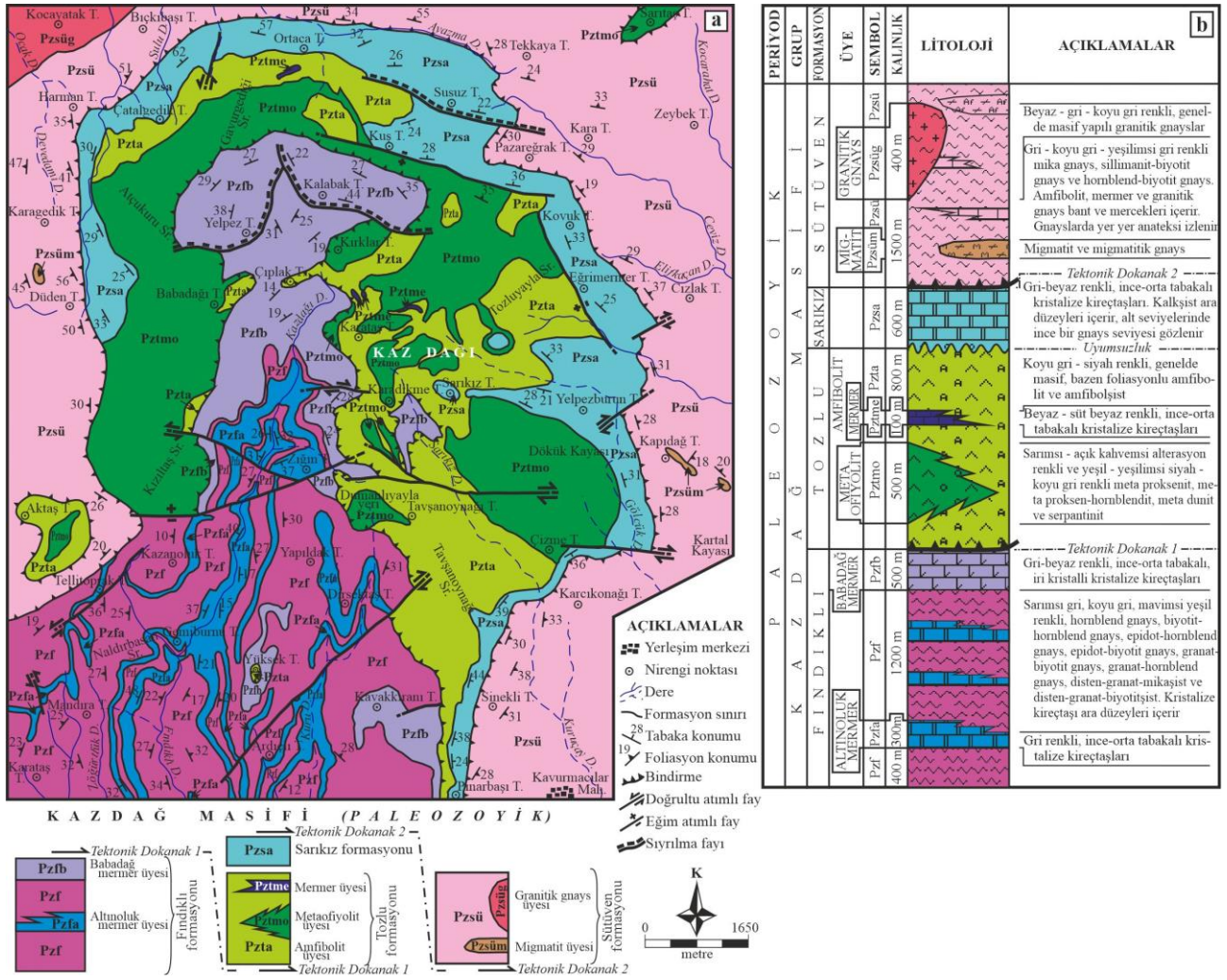
4. Bulgular

4. Results

4.1. Stratigrafi

4.1. Stratigraphy

Kazdağ Masifi tabanda, kristalize kireçtaşı aradüzeyle amfibollü gnaylardan ve mika şistlerden oluşan Fındıklı formasyonu (Duru vd., 2004) ile başlar (Şekil 3a ve 3b).



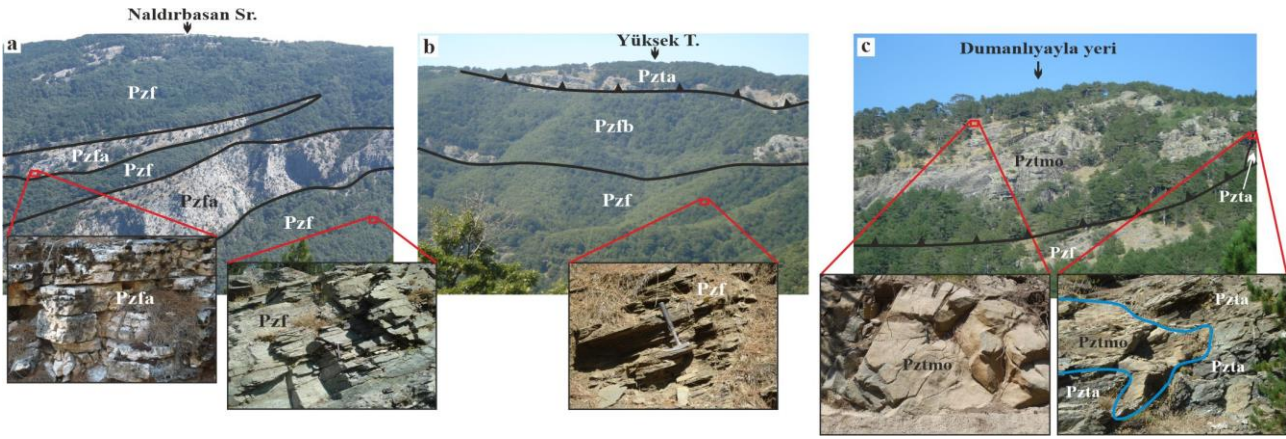
Şekil 3. (a) Çalışma alanının jeoloji haritası, Şentürk (2005)'den revize edilerek alınmıştır (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan). (b) Çalışma alanının tektono-stratigrafik dikme kesiti, Duru vd. (2004)'den kısmen revize edilerek alınmıştır (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

Figure 3. (a) The geological map of the study area, it was revised from Şentürk (2005) (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019). (b) The tectono-stratigraphic columnar section of the study area, it was partly revised from Duru et al. (2004) (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Fındıklı formasyonu yaygın olarak sarımsı gri, koyu gri, mavimsi yeşil renkli hornblend gnays, biyotit-hornblend gnays, epidot-hornblend gnays, epidot-biyotit gnays, granat-biyotit gnays, granat-hornblend gnays, disten-granat-mika şist ve disten-granat-biyotit şistlerden oluşur (Şekil 4a ve 4b). Bu amfibollü ve biyotitli gnayslar; hornblend + plajioklas (albit-oligoklas-andezin) + kuvars ± ortoklas + biyotit + granat (prop-almandin-grossular) ± epidot ± zoisit/kliozoisit ± klorit (ripidolit-piknoklorit, pennin-klioklor) ± disten ± stavrolit + muskovit ± kalsit ± sillimanit ± mikroklin ± aktinolit + turmalin (yeşil, kahve) + sfen ± rutil ± apatit mineral topluluğu (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019) içerir. Formasyonunun üst seviyelerinde, gri - koyu gri renkli disten-granat-mika şist ve disten-granat-biyotit şistler açığa çıkar (Şekil 4b). Bu metapelitik şistler; biyotit + kuvars + granat (prop-almandin-grossular) + disten + sillimanit + plajioklas (albit-oligoklas-andezin) ± muskovit + klorit (ripidolit-piknoklorit, pennin-klioklor) ± epidot ± zoisit/kliozoisit ± ortoklas + turmalin (yeşil) ± sfen ± rutil ± apatit mineral topluluğu (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019) ile belirgindir. Üste doğru, ince bir seviye halinde sarımsı gri renkli kuvars şistler gözlenir. Özellikle Kaz Dağı'nın güneybatısında, gnays ve şistler arasında kalınlığı 10 - 120 m arasında değişen çok sayıda kristalize kireçtaşı seviyeleri (Altnoluk mermer üyesi; Duru vd., 2004) yer alır (Şekil 4a).

Fındıklı formasyonunun en üst seviyesinde gri-beyaz renkli, iri kristalli ve ince-orta tabakalı kristalize kireçtaşları (Babadağ mermer üyesi; Duru vd., 2004) gözlenmektedir (Şekil 4b).

Kazdağ Masifi'nin orta düzeylerini oluşturan ve birbirleriyle yan-al-düsey geçişli amfibolit - amfibol şist (amfibolit üyesi; Şentürk & Ünlü, 2009), meta dunit - meta proksenit - meta proksen-hornblendit - serpantin (meta ofiyolit üyesi), az miktarda kristalize kireçtaşlarından (mermer üyesi; Şentürk & Ünlü, 2009) oluşan Tozlu formasyonu (Bingöl vd., 1973), Fındıklı formasyonu üzerinde tektonik dokanakla yer alır (Şekil 3a, 3b, 4b, 4c). Koyu gri - siyah renkli, masif, yer yer foliasyonlu amfibolit ve amfibolşistler (Şekil 4c); *hornblend* (soluk yeşil-yeşil) + *plajioklas* (*albit-oligoklas-andezin*) + *klorit* (*ripidolit-piknoklorit*, *klinoklor*) ± *granat* ± *epidot* ± *zoisit/kli노zoisit* ± *kuvars* ± *sfen* ± *apatit* ± *rutil* mineral topluluğu (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019) ile karakteristiktir. Sarımsı-açık kahvemsi alterasyon renkleri ve yeşil, yeşilimsi siyah, koyu gri taze yüzey renkleri ile belirgin meta ofiyolitik kayalardan (Şekil 4c) meta dunitler; *relikt olivin* ± *relikt klinoproksen* (*diyopsit/ojit*) + *serpantin* (*krizotil*) + *klorit* (*klinoklor*, *ripidolit-piknoklorit*), meta proksenitler; *relikt klinoproksen* (*diyopsit/ojit*) + *klorit* (*klinoklor*, *ripidolit-piknoklorit*) + *relikt ortoproksen* (*enstatit*) ± *epidot* ± *zoisit/kli노zoisit* ± *sfen* ± *apatit* ± *rutil*, meta proksen-hornblenditler; *relikt hornblend* + *relikt klinoproksen* (*diyopsit/ojit*) + *klorit* (*klinoklor*, *ripidolit-piknoklorit*) ± *epidot* ± *zoisit/kli노zoisit* ± *sfen* ± *apatit* ± *rutil* ve serpantinler; *serpantin* (*antigorit* ve *krizotil*) + *relikt olivin* + *tremolit* ± *klorit* (*klinoklor*) ± *talk* mineral topluluğu (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019) ile belgindir.



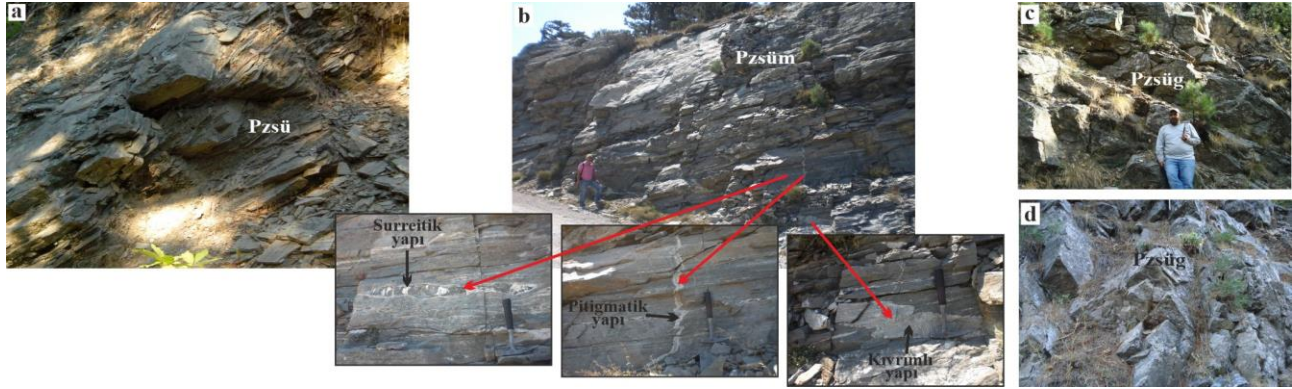
Şekil 4. (a) Fındıklı formasyonuna ait amfibollü-biyotitli gnayslar (Pzf), ve kristalize kireçtaşlarından oluşan Altınoluk mermer üyesi (Pzfa). (b) Altta Fındıklı formasyonuna ait disten-granat-mika şistler (Pzf), bunun üzerinde Fındıklı formasyonunun Babadağ mermer üyesine ait kristalize kireçtaşları (Pzfb) ve en üstte Tozlu formasyonuna ait Amfibolit üyesi (Pzta). (c) Tozlu formasyonuna ait meta ofiyolit (Pzta) ve amfibolit (Pzta) üyeleri ile Fındıklı formasyonuna (Pzf) ait amfibollü gnays ve metapelitik şistler (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

Figure 4. (a) The gneisses containing amphibole and biotite belonging to the Fındıklı formation (Pzf), and the Altınoluk marble member (Pzfa), which consists of crystallized limestones. (b) The disthene-garnet-mica schists belonging to the Fındıklı formation (Pzf) at the bottom, crystallized limestones belonging to the Babadağ marble member (Pzfb) of the Fındıklı formation on these schists, and the Amphibolite member (Pzta) of the Tozlu formation at the top. (c) The metaophiolite (Pzta) and amphibolite (Pzta) members of the Tozlu formation, and the amphibole gneisses and metapelitic schists belonging to the Fındıklı formation (Pzf) (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Tozlu formasyonu üzerinde uyumsuzlukla yer alan Sarıkız formasyonu (Bingöl vd., 1973) altta kalınlığı 5 m'ye kadar ulaşan ince bir gnays seviyesi ve bunun üzerinde kalkıştıradüzeyleri içeren gri-beyaz renkli ve ince-orta tabakalı kristalize kireçtaşlarından oluşur. Gnayslar *kuvars* + *plajioklas* + *biyotit* + *muskovit*, metakarbonatlar ise *kalsit* ± *kuvars* ± *muskovit* ± *epidot* mineral parajenezleri ile belgindir.

Sütüven formasyonu (Duru vd., 2004) amfibolit-mermer-granitik gnays bant-mercekleri ve migmatit düzeyleri içeren mika gnays, sillimanit-biyotit gnays ve hornblend-biyotit gnayslardan oluşur (Şekil 5). Sarıkız ve Tozlu formasyonları üzerinde tektonik dokanakla yer alır (Şekil 3). Gri - koyu gri - yeşilimsi gri renkli ve orta-iri taneli gnayslar ve migmatitler içerisinde; *plajioklas* (*albit-oligoklas-andezin*) + *kuvars* ± *ortoklas* + *biyotit* ± *sillimanit* + *hornblend* ± *granat* (*prop-almandin-grossular*) ± *epidot* ± *zoisit/kli노zoisit* ± *klorit* (*ripidolit-*

piknoklorit, pennin-klinoklor) + *muskovit* ± *disten* ± *kalsit* ± *stavrolit* ± *mikroklin* + *turmalin* (*yeşil, kahve*) + *sfen* ± *rutil* ± *apatit* mineral topluluğu (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019) gözlenir. Granitik gnayslar (granitik gnays üyesi; Duru vd., 2007 ve Şentürk & Ünlü, 2009) beyaz-gri-koyu gri renkli ve genelde masif görünümündedir. Buna karşılık, granitik gnayslar içerisindeki hornblendler, mika gnays ve biyotit gnaysların foliasyonuna uyumlu bir şekilde aynı yönde dizilmişlerdir. Granitik gnayslar; *plajioloklas* (*albit-oligoklas-andezin*) + *ortoklas* + *kuvars* + *biyotit* ± *hornblend* ± *granat* ± *klorit* (*ripidolit-piknoklorit, pennin-klinoklor*) ± *epidot* ± *zoisit/klinozoisit* ± *aktinolit* + *sfen* ± *rutil* ± *apatit* mineral topluluğu (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019) içerir. Koyu gri-siyahımsı renkli ve masif yapılı amfibolit bant-mercekleri; *hornblend* + *plajioloklas* (*albit-oligoklas-andezin*) ± *biyotit* ± *kuvars* ± *epidot* ± *zoisit/klinozoisit* ± *klorit* (*ripidolit-piknoklorit, pennin-klinoklor*) + *sfen* mineral topluluğu (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019) ile belirlenir.



Şekil 5. (a) Düden Tepe'nin batısında izlenen Sütüven formasyonuna (Pzsü) ait mika gnayslar. (b) Kapıdağ Tepe'nin doğu yamacında sillimanit-biyotit gnayslardan itibaren oluşan surreitik, pitigmatik ve kıvrımlı yapılar gösteren migmatitler (Pzsüm). Kocayatak Tepe'nin güneybatısında (c) ve güneyinde (d) izlenen granitik gnayslar (Pzsüg) (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

Figure 5. (a) Mica gneisses belonging to the Sütüven formation (Pzsü) observed to the west of Düden Hill. (b) Migmatites (Pzsüm) showing surreitic, pyritigmatic and folded structures formed from sillimanite-biotite gneisses on the eastern slope of Kapıdağ Hill. Granite gneisses (Pzsüg) observed in the southwest (c) and south (d) of Kocayatak Tepe (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

4.2. Kazdağ Masifi'nin metamorfizma özellikleri

4.2. The metamorphic characteristics of Kazdağ Massif

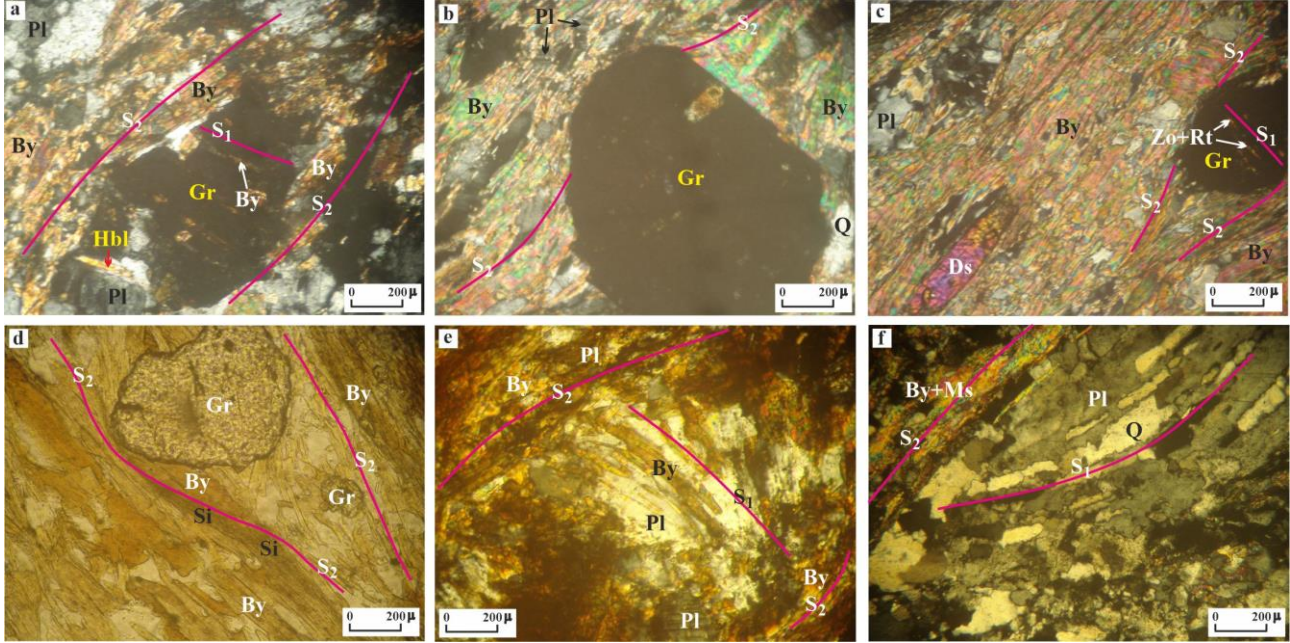
Özellikle, Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında gözlenen metapelitik ve metabazik kayalarda farklı metamorfizma şartlarında açığa çıkan mineral parajenezleri ve indeks mineraller yer almaktadır. Ayrıca, Masif yoğun tektonik hareketlere maruz kalmıştır. Bu özellikler Kazdağ Masifi'nin çok evreli metamorfizmaya uğradığını gösterir.

4.2.1. Kazdağ Masifi'nde birinci metamorfizma evresi

4.2.1. The first metamorphism phase within the Kazdağ Massif

Fındıklı formasyonu içerisinde iki farklı metamorfizma evresinde oluşmuş granat kristalleri gözlenir. Fındıklı formasyonuna ait amfibollü gnays, biyotitli gnays ve metapelitikşistlerde gözlenen ilk evre granatları porfiroblast haldedir. Bunlar özşekilsiz - bazen yarıözşekilli prizmatik kristaller halinde, renksiz - soluk kahverengimsi sarı renkli ve bol kapanımlıdır. Bu kapanımlar; amfibollü ve biyotitli gnayslarda kuvars, hornblend (soluk yeşil-yeşil), stavrolit, epidot, zoisit ve kahve renkli biyotitiden, metapelitikşistlerde zoisit ve rutilden oluşur. Granat porfiroblastları içerisinde S_1 foliasyonunu oluşturan bu kapanımlar granatlara helisitik bir doku kazandırır (Şekil 6a ve 6c). Bu doku granatların posttektonik olduğunu, F_1 deformasyon evresinden sonra da büyümeye devam ettiğini gösterir. Bu granatlar; epidot-biyotit gnays ve granat-biyotit gnayslarda biyotit + hornblend (kahvemsi yeşil) + distenin oluşturduğu, metapelitikşistlerde ise kahve renkli biyotit + muskovit + distenin oluşturduğu S_2 foliasyonu tarafından sarılmıştır (Şekil 6a, 6b, 6c ve 6d). Bu durum, granatların F_2 deformasyon evresine göre pretektonik olduğunu gösterir. Bu granatların yer yer S_2 foliasyonunu kesmesi ve yarıözşekilli olması, büyümesinin F_2 deformasyon evresinden sonra da devam ettiğine işaret eder (Şekil 6a, 6b ve 6c). Granatların amfibollü gnays ve biyotitli gnayslarda stavrolit, hornblend (soluk yeşil-yeşil)

ve zoisit kapanımlarını, metapelitikşistlerde ise rutil ve zoisit kapanımlarını içermesi, yüksek basınç alanlarına işaret eder. Dolayısıyla, bu granatlar muhtemelen ilk evre metamorfizması olan orta dereceli metamorfizmanın yüksek basınç alanlarında gerçekleşen metamorfizma ile oluşmuştur (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).



Şekil 6. Fındıklı formasyonuna ait; (a) granat-biyotit gnays içerisinde S_2 foliasyonuna göre pretektonik ve S_1 foliasyonuna göre helisitik dokulu ve posttektonik granat (Gr) porfiroblastı, (b) Disten-granat-mika şistte gözlenen S_2 foliasyonuna göre pretektonik ve posttektonik gelişmiş granat porfiroblastı, (c) Disten-granat-biyotit şistte S_2 foliasyonuna göre pretektonik ve post tektonik, F_1 deformasyon evresine göre posttektonik büyüyen helisitik dokulu granat porfiroblastı, (d) Disten-granat-mika şistte gözlenen S_2 foliasyonuna göre pretektonik ve posttektonik büyüyen yarı özşekilli granat (Gr) porfiroblastı ve biyotitten (By) dönüşen lifsi sillimanitler (Si). Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit gnays (e) ve Sütüven formasyonuna ait mika gnays (f) içerisinde S_1 foliasyonunu oluşturan bir yöne uzamış kuvars (Q) ve biyotit kapanımları içeren ve muskovit (Ms)+biyotitten oluşan S_2 foliasyonu tarafından sarılmış plajiyoklas (Pl) porfiroblastları. Hbl: Hornblend (soluk yeşil-yeşil), Ds: Disten, Zo: Zoisit, Rt: Rutil, a, b, c, e, f: // Nikol, d: / Nikol (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

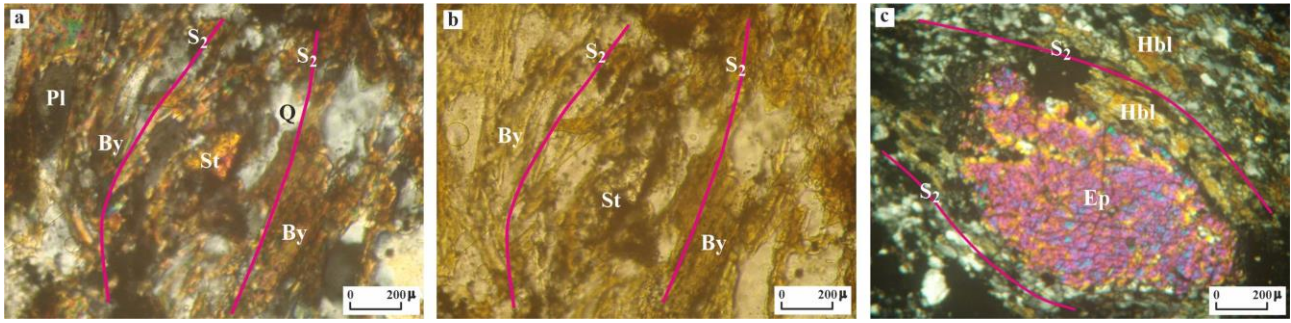
Figure 6. In Fındıklı formation; (a) in garnet-biotite gneiss, pre-tectonic according to S_2 foliation and helicitic textured and posttectonic garnet (Gr) porphyroblast according to S_1 foliation, (b) pre-tectonic and posttectonic garnet porphyroblast according to the S_2 foliation observed in kyanite-garnet-mica schist, (c) Garnet porphyroblast with helicitic texture, growing posttectonic according to F_1 deformation stage and pre-tectonic and post-tectonic according to S_2 foliation, in kyanite-garnet-biotite schist, (d) Pre-tectonic and posttectonic growing subidioblast garnet (Gr) porphyroblast according to S_2 foliation and fibrous sillimanites (Si) transformed from biotite (By) observed in kyanite-garnet-mica schist. In garnet-biotite gneiss belonging to Fındıklı formation (e) and mica gneiss belonging to Sütüven formation (f), plagioclase (Pl) porphyroblasts surrounded by S_2 foliation consisting of muscovite (Ms)+biotite and containing inclusions of quartz (Q) and biotite elongated in one direction forming the S_1 foliation. Hbl: Hornblende (pale green-green), Ds: Kyanite, Zo: Zoisite, Rt: Rutile, a, b, c, e, f: // Nicol, d: / Nicol (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Plajiyoklas porfiroblastları; Fındıklı formasyonuna ait amfibollü ve biyotitli gnayslarda hornblend (kahvemsi yeşil), kahve biyotit ve distenin oluşturduğu S_2 foliasyon düzlemi tarafından, Sütüven formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnayslarda kahve biyotit, muskovit ve hornblendin (kahvemsi yeşil) oluşturduğu S_2 foliasyon düzlemi tarafından sarılmıştır (Şekil 6e ve 6f). Dolayısıyla bu plajiyoklaslar S_2 foliasyon düzlemine (F_2 deformasyon evresi) göre pretektoniktir. Bazı plajiyoklas porfiroblastları yer yer S_2 foliasyonunu kesmektedir. Dolayısıyla plajiyoklasların büyümesi F_2 deformasyon evresinden sonra da devam etmiştir. Bu plajiyoklas porfiroblastları içerisinde; Fındıklı formasyonuna ait amfibollü ve biyotitli gnayslarda bir yöne uzamış hornblend (soluk yeşil-yeşil), granat, kahve renkli biyotit, epidot, kuvars ve opak mineral kapanımları, Sütüven

formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnayslarda ise bir yöne uzamış muskovit, kahve renkli biyotit, hornblend (soluk yeşil-yeşil) kapanımları, bu kayaçların S_1 foliasyon düzlemini oluşturur (Şekil 6e ve 6f). Bu kayaçlarda, S_1 foliasyonunu oluşturan bu kapanımlar, yüksek basınç – orta sıcaklıkta amfibolit fasiyesi şartlarında oluşan ilk evre metamorfizma ürünü olmalıdır (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

Fındıklı formasyonuna ait amfibollü ve biyotitli gnayslarda; plajioklas ve granat porfiroblastları içerisinde, bazen soluk - çoğunlukla belirgin yeşil renkli ve düşük açılı eğik sönmeli ($18^\circ-22^\circ$) hornblendler ile, prizmatik şekilli, yeşil-koyu yeşil renkli ve düşük açılı eğik sönmeli ($21^\circ-23^\circ$) hornblendler gözlenir (Şekil 6a). Bu hornblendler, plajioklas ve granat porfiroblastları içerisinde S_1 foliasyonunu oluşturan, bir yöne uzamış kapanımlar halindedir. Ayrıca, bu soluk yeşil – yeşil renkli hornblendler, plajioklas ve granat porfiroblastını çevreleyen, kahvemsi yeşil renkli ve $17^\circ-21^\circ$ arası eğik sönmeli hornblendlerin (çermakit ?) oluşturduğu S_2 foliasyonu ile uyumsuzdur. Dolayısıyla, S_1 foliasyonunu oluşturan soluk yeşil-yeşil renkli hornblendler, yüksek basınç – orta sıcaklıkta amfibolit fasiyesinde gelişen ilk evre metamorfizma ürünü olmalıdır (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

Stavrolitler prizmatik şekilli, sarı renkli ve bazen bol kuvars kapanımlıdır. Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit gnays ve Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit gnays içerisinde gözlenen stavrolit porfiroblastları, levhamsı biyotit ve uzun prizmatik hornblendlerin (kahvemsi yeşil) oluşturduğu S_2 foliasyonu tarafından nispeten sarılmış olup, F_2 deformasyon evresine göre pretektoniktir. Bunlar muhtemelen ilk evre metamorfizması olan, orta dereceli metamorfizmanın yüksek basınç alanlarında amfibolit fasiyesinde oluşmuştur. Ayrıca, bu stavrolitlerin yer yer S_2 foliasyonunu kesmesi (Şekil 7a ve 7b), büyümesinin F_2 deformasyon evresinden sonra da devam ettiğini gösterir (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).



Şekil 7. (a) ve (b) Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit gnaysda stavrolit (St), biyotit (By), plajioklas (Pl) ve kuvars (Q). **(c)** Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnaysda S_2 foliasyonuna göre pretektonik epidot (Ep) porfiroblastı. Hbl: Hornblend (kahvemsi yeşil), **a, c:** // Nicol, **b:** / Nicol (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019‘dan).

Figure 7. (a) and (b) Staurolite (St), biotite (By), plagioclase (Pl) and quartz (Q) in the garnet-biotite gneiss belonging to the Fındıklı formation. **(c)** Pretectonic epidote (Ep) porphyroblast according to S_2 foliation in epidote-hornblende gneiss belonging to Fındıklı formation. Hbl: Hornblende (brownish green), **a, c:** // Nicol, **b:** / Nicol (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Epidot ve zoisit/klinozoisitler, Fındıklı formasyonuna ait; epidot-hornblend gnayslarda kahvemsi yeşil renkli hornblendlerin oluşturduğu (Şekil 7c), epidot-biyotit gnayslarda ise biyotit+hornblend (kahvemsi yeşil)+distenin oluşturduğu S_2 foliasyonu tarafından sarılmıştır. Bu durum epidot ve zoisit/klinozoisitlerin F_2 deformasyon evresine göre pretektonik olduğuna işaret eder. Fındıklı formasyonuna ait; amfibollü gnayslarda plajioklas porfiroblastları içerisinde S_1 foliasyon düzlemini oluşturan bir yöne uzamış kahve biyotit, hornblend (soluk yeşil-yeşil), klorit, epidot kapanımları ve ayrıca, epidot-biyotit gnays ve granat-biyotit gnayslarda ilk evre granat porfiroblastları içerisindeki S_1 foliasyonunu oluşturan kuvars, hornblend (soluk yeşil-yeşil), stavrolit, epidot, zoisit ve kahve biyotit kapanımları helisitik dokuyu gösterir. Dolayısıyla, bu kayaçlardaki epidot ve zoisit/klinozoisitler, ilk evre metamorfizması olan orta dereceli metamorfizmanın yüksek basınç alanlarındaki amfibolit fasiyesinde oluşmuştur (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

Sonuç olarak Kazdağ Masifi'nin Fındıklı, Sütüven ve Tozlu formasyonlarına ait metapelitik, metapsammitik, metasemipelitik ve metabazik kayaçlarda gözlenen bütün bu özellikler, Kazdağ Masifi'nin başlangıçta yüksek basınçlı amfibolit fasiyesi şartları altında metamorfizmaya uğradığına işaret eder.

Fındıklı formasyonuna ait amfibollü gnayslarda plajioklas porfiroblastları içerisinde S₁ foliasyonunu oluşturan epidotlar hornblend (soluk yeşil-yeşil) ve klorit ile birlikte bulunur. Ayrıca, bu kayalarda albit bileşimli plajioklaslar gözlenir. Dolayısıyla bu durum, amfibolit fasiyesindeki bu metamorfizmanın başlangıcının “epidot-amfibolit fasiyesi”nde gerçekleştiğine işaret eder. Epidot-amfibolit fasiyesi “hornblend + oligoklas + epidot + Mg-klorit” parajenezi ile belirgindir.

Fındıklı ve Sütüven formasyonlarına ait metapelitik (mikaşist ve biyotitşistler), metapsammitik-metasemipelitik (mika gnays ve biyotit gnays) ve metanötr (amfibollü gnays) kayalarda;

Stavrolit + Disten + Muskovit + Biyotit + Oligoklas + Kuvars (Şekil 8 – (1)),

Stavrolit + Muskovit + Almandin + Biyotit + Kuvars (Şekil 8 – (2)),

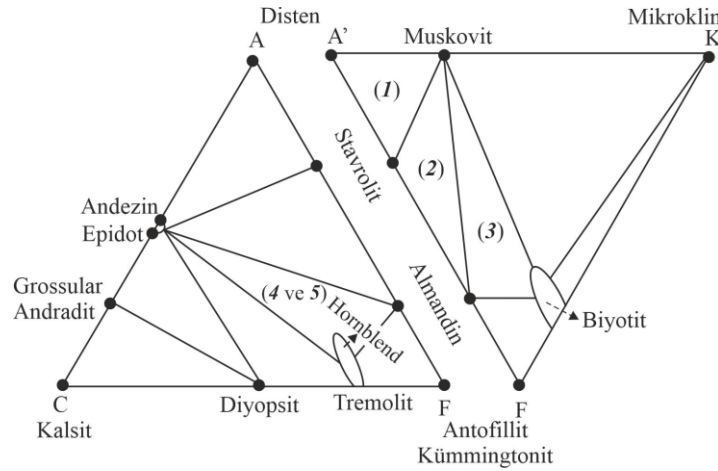
Muskovit + Biyotit + Almandin + Kuvars + Andezin (Şekil 8 – (3))

ve Tozlu formasyonuna ait metabazik kayalarda (amfibolit ve amfibolşist);

Hornblend (soluk yeşil-yeşil) + Almandin + Epidot + Zoisit (Şekil 8 – (4)),

Hornblend (soluk yeşil-yeşil) + Andezin + Epidot (Şekil 8 – (5))

parajenezleri, amfibolit fasiyesinin “stavrolit-almandin” alt fasiyesi”nde metamorfizmaya işaret eder (Şekil 8).



Şekil 8. Amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesinde gözlenen topluluklar (Winkler, 1967). $A=(Al_2O_3)+(Fe_2O_3)-(Na_2O)-(K_2O)$, $C=(CaO)$, $F=(FeO)+(MgO)+(MnO)$, $A'=(Al_2O_3)+(Fe_2O_3)-(Na_2O)-(K_2O)-(CaO)$, $K=(K_2O)$.

Figure 8. The assemblages observed in the staurolite-almandine sub-facies of amphibolite facies (Winkler, 1967). $A=(Al_2O_3)+(Fe_2O_3)-(Na_2O)-(K_2O)$, $C=(CaO)$, $F=(FeO)+(MgO)+(MnO)$, $A'=(Al_2O_3)+(Fe_2O_3)-(Na_2O)-(K_2O)-(CaO)$, $K=(K_2O)$.

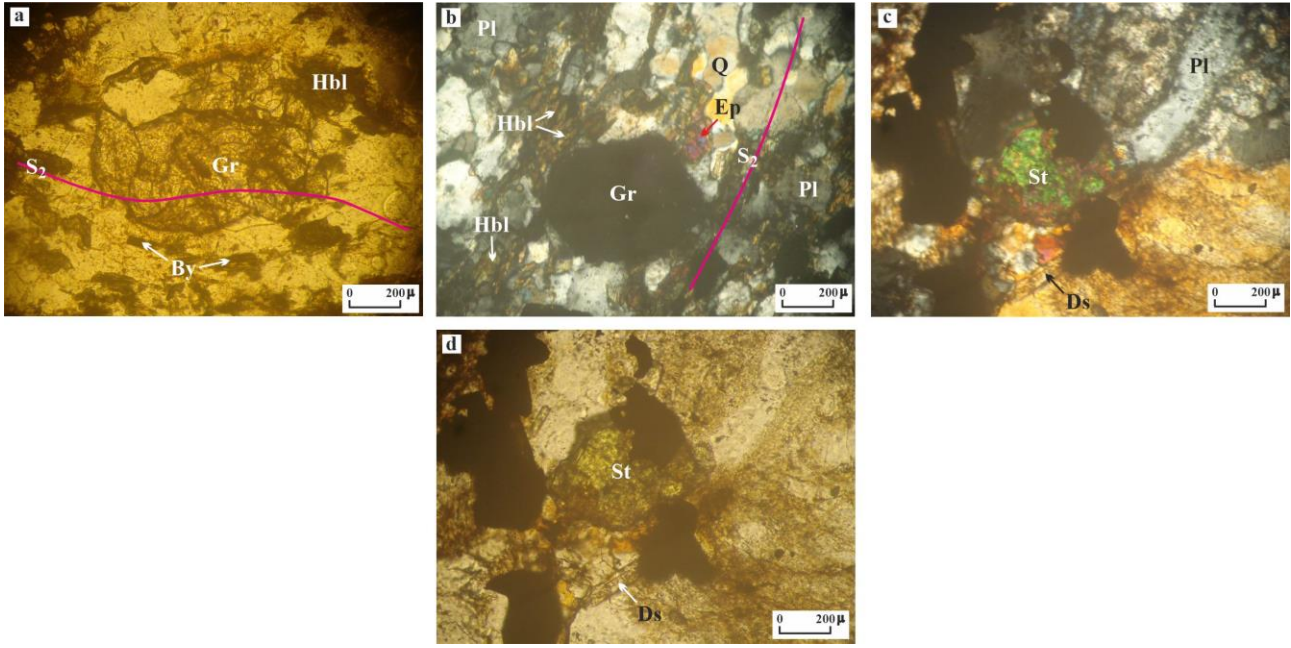
Sonuç olarak, Kazdağ Masifi'nin başlangıçta amfibolit fasiyesinde bir metamorfizma geçirmiştir. Bu metamorfizmanın; Fındıklı formasyonunda “epidot-amfibolit fasiyesi”nden “amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”ne doğru ilerleyen tarzda, Sütüven formasyonunda ise “amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gerçekleştiği söylenebilir. Tozlu formasyonunun mineral parajenezleri, bu formasyonun da amfibolit fasiyesinde (muhtemelen stavrolit-almandin alt fasiyesi) bir metamorfizmaya uğradığına işaret eder.

4.2.2. Kazdağ Masifi'nde ikinci metamorfizma evresi

4.2.2. The second metamorphism phase within the Kazdağ Massif

Fındıklı formasyonuna ait amfibollü gnays ve biyotitli gnayslarda izlenen ikinci evre granatları; genelde altıgen-sekizgen kristaller halinde özşekilli-yarıözşekilli, çoğunlukla porfiroblast bazen daha küçük boyutlu kristaller halindedir. Bu granatlar kahve renkli biyotit, hornblend (kahvemsi yeşil), sillimanit ve uzun prizmatik distenin oluşturduğu S₂ foliasyonu tarafından yer yer sarılmıştır. Dolayısıyla oluşumu F₂ deformasyon evresinden önce başlamıştır. Biyotit-hornblend gnayslarda bu granatlar S₂ foliasyon düzlemine göre sentektonik kristalleşmiştir (Şekil 9a). Aynı zamanda, bu kayalarda, S₂ foliasyonunu keserek büyümüş özşekilli granat porfiroblastları da görülmektedir (Şekil 9b). Bu tür granatlarda bazen altıgen-sekizgen şekiller korunmuştur. Dolayısıyla, amfibollü gnays ve biyotitli gnayslar içerisinde görülen ikinci evre granatları, F₂ deformasyon evresinden önce kristallenmeye başlamış ve bu evreden sonra da büyümeye devam etmiştir. Bu

ikinci evre granatları, Kazdağ Masifi'ndeki epidot-amfibolit fasiyesinden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almadin alt fasiyesine doğru ilerleyen tarzda gelişen başlangıç metamorfizmasından sonra, ortamda azalan basınç ve artan sıcaklıkla birlikte, yüksek sıcaklıklı üst amfibolit fasiyesi metamorfizması şartları altında açığa çıkmış olmalıdır. Fındıklı formasyonuna ait mikaşit ve biyotitistlerde gözlenen ilk evre granatlarının kahve renkli biyotit, muskovit ve distenin oluşturduğu S_2 foliasyonunu (F_2 deformasyon evresi) yer yer kesmesi ve özşekilli olması, bu granatların büyümesinin F_2 deformasyon evresinden sonra da devam ettiğini gösterir (Şekil 6b, 6c ve 6d) (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

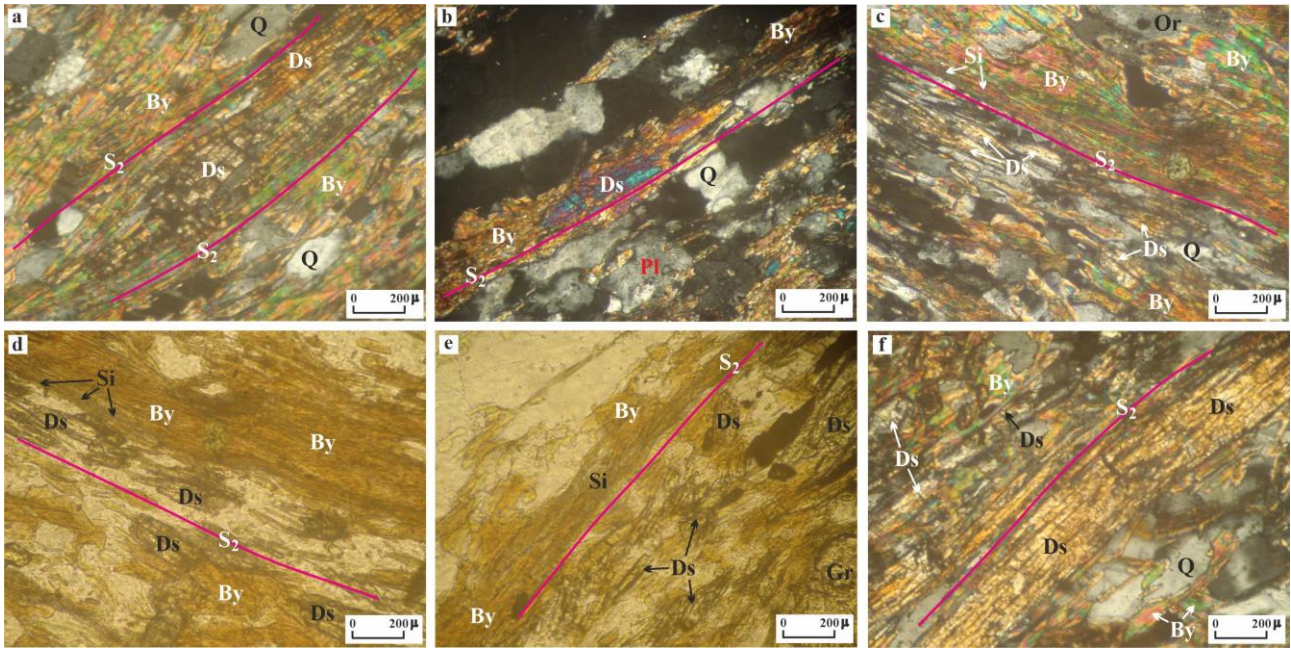


Şekil 9. Fındıklı formasyonuna ait biyotit-hornblend gnaysda; sintektonik granat (Gr) porfiroblastı (a), S_2 foliasyonunu keserek büyüyen yarıözşekilli – altıgen granat porfiroblastı (b). (c) ve (d) Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit gnays içerisinde izlenen stavrolit (St). By: Biyotit, Hbl: Hornblend (kahvemsi yeşil), Ds: Disten, Pl: Plajiyoklas, Ep: Epidot, Q: Kuvars. a, d: / Nikol, b, c: // Nikol (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

Figure 9. In the biotite-hornblende gneiss belonging to the Fındıklı formation; syntectonic garnet (Gr) porphyroblast (a), subidioblast-hexagonal garnet porphyroblast growing by cutting the S_2 foliation (b). (c) and (d) Staurolite (St) observed in sillimanite-biotite gneiss belonging to the Sütüven formation. By: Biotite, Hbl: Hornblende (brown green), Ds: Kyanite, Pl: Plagioclase, Ep: Epidote, Q: Quartz. a, d: / Nicol, b, c: // Nicol (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Kazdağ Masifi içerisinde stavrolitler başlangıçta, ilk evre metamorfizması olan, orta dereceli metamorfizmanın yüksek basınç alanlarındaki amfibolit fasiyesi şartları altında oluşmuştur. Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit gnayslarda prizmatik stavrolit kristallerinin yer yer S_2 foliasyonunu oluşturan levhamsı biyotit ve uzun prizmatik hornblendleri (kahvemsi yeşil) keserek büyümesi, bunların F_2 deformasyon evresinden sonra da büyümeye devam ettiğini gösterir (Şekil 7a, 7b). Özellikle, Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit gnayslarda ve Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit gnayslarda stavrolitin disten ve sillimanitle birlikte gözlenmesi (Şekil 9c, 9d), ortamda Barrow tipte azalan basınç – artan sıcaklığa (ilerleyen metamorfizma) bağlı olarak üst amfibolit fasiyesi şartları altında gelişen ikinci metamorfizma evresinde stavrolitlerin korunduğuna işaret eder. İkinci metamorfizma evresinde oluşan granat porfiroblastları içerisinde bazen stavrolit kapanımlarına rastlanılmaktadır. Bu durum, ortamda ilerleyen reaksiyonlarla (artan sıcaklık) birlikte stavrolitin yerini granatın aldığını gösterir. Sonuç olarak, stavrolitler Kazdağ Masifi içerisinde ilk metamorfizma olarak izlenen, orta dereceli metamorfizmanın yüksek basınç alanlarındaki amfibolit fasiyesi şartlarında açığa çıkmış, sıcaklık artışıyla birlikte yüksek sıcaklıktaki üst amfibolit fasiyesi şartları altında yerini granat ve/veya distene bırakmıştır; $9 \text{ Stavrolit} + \text{Muskovit} + \text{Kuvars} \rightarrow 17 \text{ Sillimanit} + 2 \text{ Granat} + \text{Biyotit} + \text{H}_2\text{O}$ (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

Distenler tipik olarak birbirine dik çift yönlü dilinimleri prizmatik kristalleri ve düşük açılı eğik sönmeleri ($4^\circ - 8^\circ$) ile belirlenir (Şekil 10). Bazen çok iri olmayan porfiroblast halde izlenir.



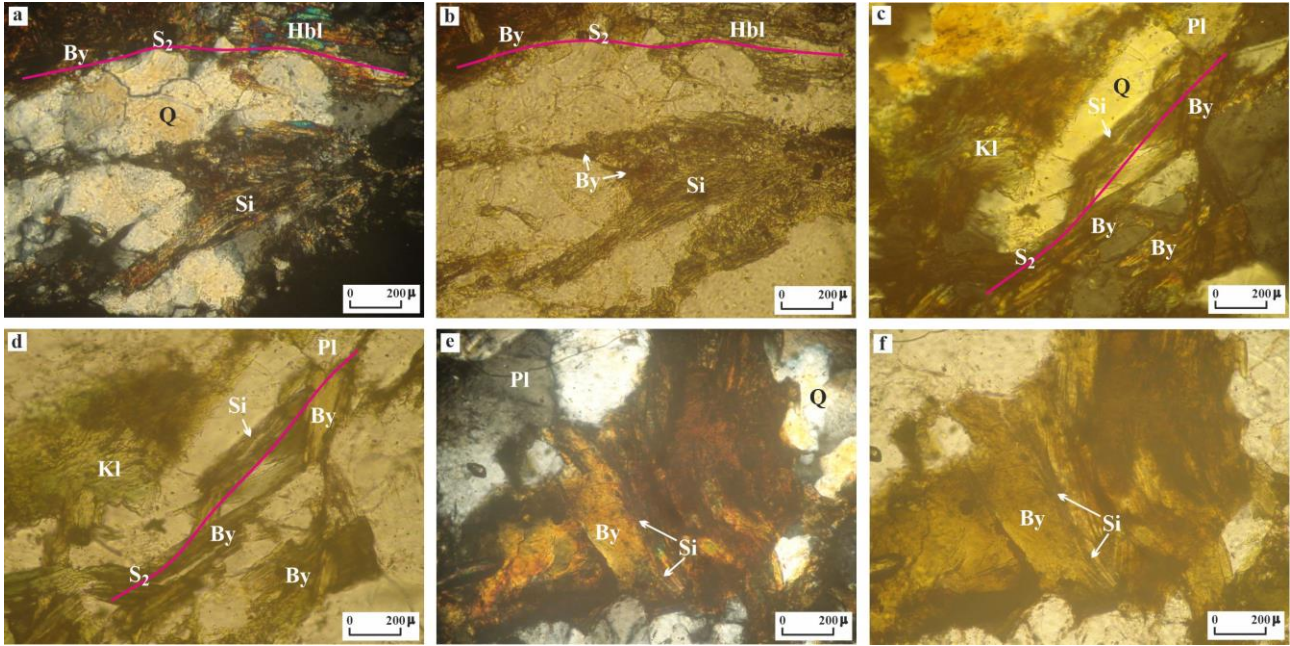
Şekil 10. Fındıklı formasyonuna ait; (a) disten-granat-mikaşistte gözlenen S_2 foliasyonuna göre pretektonik ve posttektonik gelişmiş disten (Ds) porfiroblastı, (b) epidot-biyotit gnays içerisinde izlenen S_2 foliasyonunu oluşturan biyotit (By) ve disten, (c) (d) and (e) disten-granat-mikaşistlerde izlenen biyotitten dönüşen sillimanit (Si), biyotit, disten, granat (Gr) ve kuvars (Q) kristalleri, (f) disten-granat-biyotitışistte S_2 foliasyonu yönünde gelişen disten porfiroblastı, Pl: Plajyoklas. a, b, c, f: // Nikol, d, e: / Nikol (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

Figure 10. In Fındıklı formation; (a) in kyanite-garnet-micaschist, kyanite (Ds) porphyroblast, which developed pre-tectonic and post-tectonic according to the S_2 foliation, (b) biotite (By) and kyanite, constituting the S_2 foliation observed in epidote-biotite gneiss, (c) (d) and (e) sillimanite (Si) transformed from biotite, biotite, kyanite, garnet (Gr) and quartz (Q) crystals observed in kyanite-garnet-micaschists, (f) Kyanite porphyroblast in the direction of S_2 foliation in kyanite-garnet-biotiteschist, Pl: Plagioclase. a, b, c, f: // Nicol, d, e: / Nicol (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Fındıklı formasyonuna ait biyotit-hornblend gnays, epidot-biyotit gnays, granat-biyotit gnays, mikaşist ve biyotitışistlerde gözlenen disten porfiroblastları, bazen, üst amfibolit fasiyesi şartlarını yansıtan S_2 foliasyonu tarafından belli-belirsiz bir şekilde sarılmıştır (Şekil 10a). Dolayısıyla distenler F_2 deformasyon evresine göre pretektoniktir. Buna karşılık, çoğunlukla; Fındıklı formasyonuna ait gnayslarda S_2 foliasyonunu oluşturan levhamsı biyotit ve prizmatik hornblendlere (kahvemsi yeşil) (Şekil 10b), Fındıklı formasyonuna ait mikaşist ve biyotitışistlerde S_2 foliasyonunu oluşturan uzamış-levhamsı biyotit ve muskovitlere (Şekil 6c ve 10c, 10d, 10e, 10f), Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit gnayslarda ise S_2 foliasyonunu oluşturan levhamsı biyotitlere paralel dizilmiş uzun prizmatik kristaller halindedir. Özellikle, Fındıklı formasyonuna ait mikaşist ve biyotitışistlerde, bazen S_2 foliasyonunu kısmen keser durumdadır (Şekil 10a). Bu durum, distenlerin F_2 deformasyon evresine göre aynı zamanda sintektonik ve kısmen posttektonik olduğuna işaret eder. Dolayısıyla, distenlerin oluşumu F_2 deformasyon evresinden önce başlamış ve bu evrede de oluşumu devam etmiştir. Fındıklı ve Sütüven formasyonları içerisindeki distenler, Kazdağ Masifi'ndeki ilk evre metamorfizması olan, orta dereceli metamorfizmanın yüksek basınç alanlarındaki amfibolit fasiyesi şartlarından sonra, özellikle biyotit, bazen muskovit ve muhtemelen stavrolitden itibaren ilerleyen reaksiyonlarla açığa çıkmıştır. Fındıklı formasyonuna ait amfibollü gnays ve biyotitli gnayslar içerisinde, bazı disten porfiroblastlarının kristal kenarlarından itibaren lifsi sillimanitlere dönüşmesi ortamda artan sıcaklığa bağlı olarak ilerleyen bir metamorfizmaya işaret eder. Fındıklı ve Sütüven formasyonlarına ait gnays ve metapelitik şistler içerisinde disten ve sillimanitin birlikte bulunması; üst amfibolit fasiyesinde gelişen ikinci evre metamorfizma şartları altında da distenin hala korunduğunu gösterir (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

Sillimanitler lifsi şekilleri ve düz sönmeleri ile belirgindir. Bu lifsi sillimanit kristalleri; Fındıklı formasyonuna ait biyotitli ve amfibollü gnayslarda kahve renkli biyotit ve hornblendlerin (kahvemsi yeşil) oluşturduğu (Şekil 11a ve 11b), Fındıklı formasyonuna ait metapelitik şistler ile Sütüven formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnayslarda ise kahve renkli biyotit ve muskovitlerin oluşturduğu (Şekil 6d, 10c, 10d, 10e, 11c ve 11d) S_2

foliasyonuna paralel dizilmişlerdir. Sillimanitler, içerisinde yer aldığı tüm gnays ve metapelitik şistlerde ortoklasla birlikte görülmektedir (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

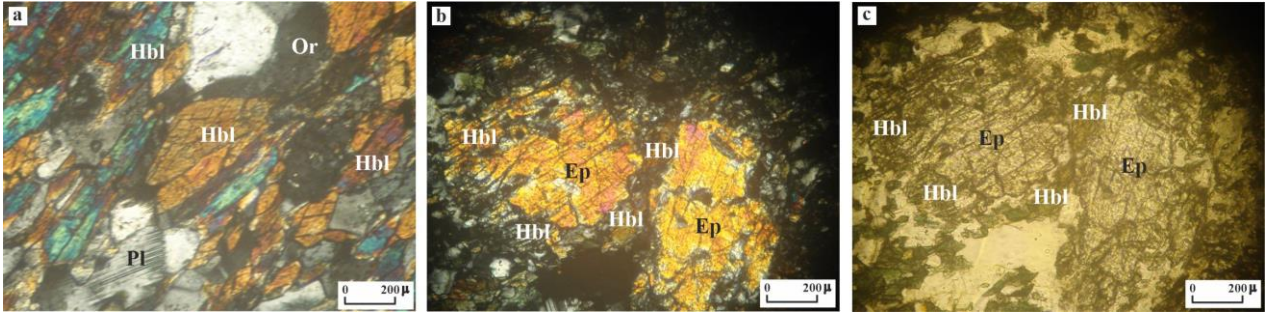


Şekil 11. (a) ve (b) Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit gnays içerisinde izlenen biyotitden dönüşen sillimanit (Si), biyotit (By) ve kuvars (Q). (c) ve (d) Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit-gnays içerisinde yer alan biyotit, biyotitden dönüşen lifsi sillimanit, biyotitden dönüşen klorit (Kl), plajiyoklas (Pl) ve kuvars. (e) ve (f) Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit-gnays içerisinde yer alan biyotit, biyotitden dönüşen lifsi sillimanit, plajiyoklas ve kuvars. Hbl: Hornblend (kahvemsi yeşil). a, c, e: // Nikol, b, d, f: / Nikol (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

Figure 11. (a) and (b) Sillimanite (Si) transformed from biotite, biotite (By) and quartz (Q) observed in garnet-biotite gneiss belonging to the Fındıklı formation. (c) and (d) Biotite, fibrous sillimanite transformed from biotite, chlorite (Kl) transformed from biotite, plagioclase (Pl) and quartz in sillimanite-biotite-gneiss belonging to the Sütüven formation. (e) and (f) Biotite, fibrous sillimanite transformed from biotite, plagioclase and quartz in sillimanite-biotite-gneiss belonging to the Sütüven formation. Hbl: Hornblende (brownish green). a, c, e: // Nicol, b, d, f: / Nicol (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Fındıklı formasyonu içerisindeki sillimanit kristalleri; amfibolit fasiyesinde gelişen ilk evre metamorfizmasından sonra; biyotitli ve amfibollü gnayslarda özellikle biyotit ve bazen de distenden itibaren (Şekil 11a ve 11b), metapelitik şistlerde ise özellikle biyotit ve bazen de muskovitten itibaren (Şekil 6d, 10c, 10d ve 10e) ilerleyen reaksiyonlarla, üst amfibolit fasiyesindeki ikinci metamorfizma şartları altında açığa çıkmıştır. Sütüven formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnayslarda gözlenen lifsi sillimanit kristalleri ise, amfibolit fasiyesinde gelişen ilk evre metamorfizmasından sonra, üst amfibolit fasiyesindeki ikinci metamorfizma şartlarında, biyotitden itibaren ilerleyen reaksiyonlarla oluşmuştur (Şekil 11c, 11d, 11e ve 11f) (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).

Fındıklı formasyonuna ait amfibollü gnayslar ve biyotitli gnayslar ve Sütüven formasyonuna ait hornblend-biyotit gnayslarda izlenen kahvemsi yeşil renkli ve 17°-21° arası eğik sönmeli hornblendler (çermakit ?) S₂ foliasyonuna paralel dizilmiş uzun prizmatik kristaller halindedir (Şekil 7c, 9a, 9b, 11a, 11b, 12a). Özellikle, Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnayslarda, biyotit+hornblend+distenin oluşturduğu S₂ foliasyonu tarafından çepeçevre sarılan ve F₂ deformasyon evresine göre pretektonik kristalleşen, dolayısıyla ilk evre metamorfizması olan amfibolit fasiyesindeki metamorfizma ile gelişen epidot porfiroblastları (Şekil 7c), kenarlarından itibaren ilerleyen reaksiyonlarla kahvemsi yeşil renkli hornblende dönüşmüştür (Şekil 12b ve 12c). Bu Epidot → Hornblend (kahvemsi yeşil) dönüşümü, ortamda sıcaklık artışı ile birlikte, orta dereceli metamorfizmanın yüksek basınç alanlarında amfibolit fasiyesinde gelişen ilk evre metamorfizmasından sonra, Kazdağı Masifi içerisinde gelişen ve ikinci evre metamorfizma olarak izlenen yüksek sıcaklıklı üst amfibolit fasiyesi şartlarını yansıtır (Kansun & Ökmen, 2019; Kansun vd., 2019).



Şekil 12. Fındıklı formasyonuna ait; (a) hornblend gnays. (b) ve (c) Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnays içerisinde kenarlarından itibaren kahvemsi yeşil renkli hornblende (Hbl) dönüşmüş epidot (Ep) porfiroblastı. Pl: Plajiyoklas, Or: Ortoklas. a, b: // Nicol, c: / Nicol (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019'dan).

Figure 12. In Fındıklı formation; (a) hornblende gneiss. (b) and (c) Epidote (Ep) porphyroblast transformed into brownish green hornblende (Hbl) from the its edges in epidote-hornblende gneiss belonging to the Fındıklı formation. Pl: Plagioclase, Or: Orthoclase. a, b: // Nicol, c: / Nicol (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).

Sütüven formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnayslar yer yer anateksiye uğramıştır. Özellikle inceleme alanının batısında Kapıdağ Tepe civarında gnayslardan itibaren anateksi ve migmatit oluşumları yaygın olarak izlenir (Şekil 5b). Ayrıca, migmatitlere geçiş gösteren gnaysları ifade eden bantlı yapı lit-par-lit oluşumları gözlenmektedir.

Kazdağ Masifi'nde, özellikle Fındıklı ve Sütüven formasyonlarına ait metapelitik (mikaşist ve biyotitistler), metapsammitik-metasemipelitik (mika gnays ve biyotit gnays) ve metanötr (amfibollü gnays) kayaçlarda izlenen tüm bu özellikler, Kazdağ Masifi'ndeki epidot-amfibolit fasiyesinden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesine doğru ilerleyen tarzda gelişen orta sıcaklık - yüksek basınçlı başlangıç metamorfizmasından sonra, Masif'in, etkileri özellikle Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında izlenen, ilerleyen tarzda (artan sıcaklık) ikinci bir metamorfizmaya uğradığına işaret eder.

İlerleyen bu metamorfizma sonucu, Fındıklı ve Sütüven formasyonlarına ait metapelitik (mikaşist ve biyotitistler), metapsammitik-metasemipelitik (mika gnays ve biyotit gnays) ve metanötr (amfibollü gnays) kayaçlarda;

- Sillimanit + Ortoklas + Almandin + Biyotit + Kuvars (Şekil 13 – (1)),
- Almandin + Biyotit + Ortoklas + Andezin + Kuvars (Şekil 13 – (2)),
- Sillimanit + Disten + Biyotit + Ortoklas + Kuvars,
- Sillimanit + Ortoklas + Almandin + Biyotit + Andezin + Kuvars

parajenezleri; Fındıklı formasyonunda “epidot-amfibolit fasiyesinden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”ne doğru ilerleyen tarzda, Sütüven formasyonunda ise “amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gelişen orta sıcaklık-yüksek basınçlı başlangıç metamorfizmasından sonra, ortamda sıcaklığın arttığını ve *Kazdağ Masifi'nin, etkileri sadece Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında tipik olarak izlenen, üst amfibolit fasiyesi şartlarını gösteren ve “sillimanit-almandin-ortoklas alt fasiyesi”ne kadar ulaşan ikinci bir metamorfizmaya uğradığını* gösterir (Şekil 13).

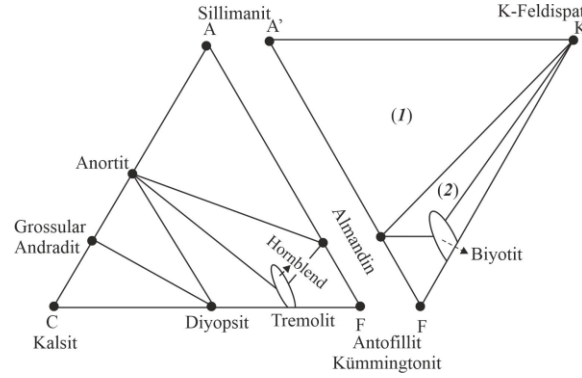
4.2.3. Kazdağ Masifi'nde birinci evre metamorfizmanın P-T şartları

4.2.3. P-T conditions of first phase metamorphism within the Kazdağ Massif

Kazdağ Masifi'nde izlenen ve yukarıda bahsedilen “epidot-amfibolit fasiyesinden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesine doğru ilerleyen tarzda gelişen orta-sıcaklık-yüksek basınçlı başlangıç metamorfizması”nın basınç – sıcaklık şartları hakkında şu yorumlar yapılabilir:

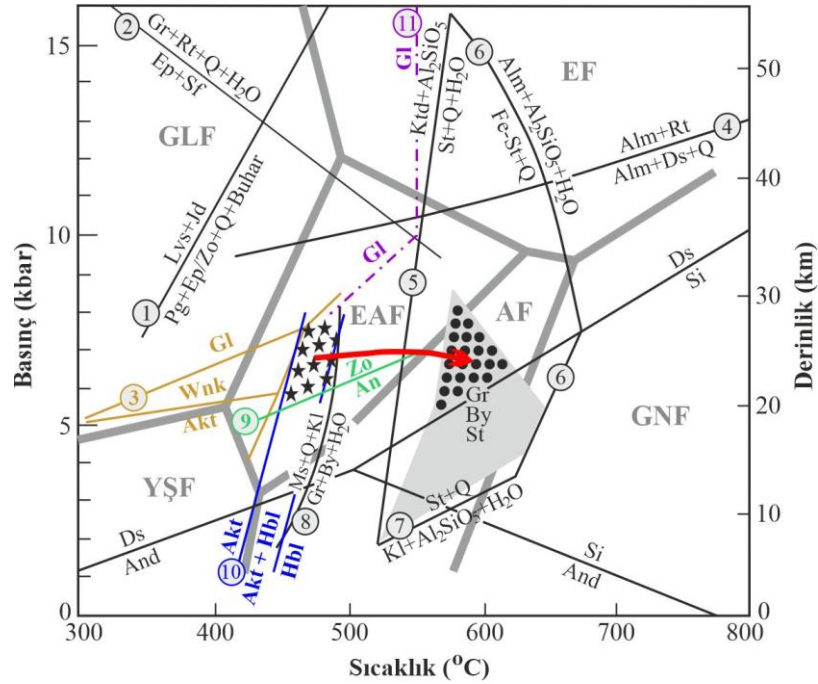
Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnayslarda plajiyoklas porfiroblastları içerisinde S₁ foliasyonunu oluşturan epidotların hornblend (soluk yeşil-yeşil) ve kloritle birlikte bulunması ve bu kayaçlarda albit bileşimli plajiyoklaslara rastlanması, bu amfibolit fasiyesindeki metamorfizmanın başlangıcının “epidot-amfibolit fasiyesi”nde gerçekleştiğini göstermektedir. Epidot-amfibolit fasiyesi metamorfizması “hornblend + oligoklas + epidot + Mg-klorit” parajenezi ile belirlenmiştir.

Epidot-amfibolit fasiyesinin kararlılık alanı (Takasu, 1989) Şekil 14 'deki basınç-sıcaklık diyagramında görülmektedir.



Şekil 13. Amfibolit fasiyesinin sillimanit-almandin-ortoklas alt fasiyesinde gözlenen topluluklar (Winkler, 1967). A, A', C, F ve K formülleri Şekil 8 'de verilmiştir.

Figure 13. The assemblages observed in sillimanite-almandine-orthoclase sub-facies of amphibolite facies (Winkler, 1967). Formulas A, A', C, F and K are given in Figure 8.



Şekil 14. Kazdağ Masifi'nde başlangıç metamorfizmasının basınç-sıcaklık şartlarını gösteren petrojenetik diyagram. Fasiyes sınırları kalın gri çizgi ile gösterilmiş ve Takasu (1989)'dan alınmıştır. Gri boyalı alan, amfibolit fasiyesini gösteren Gr+Byt+St parajenezinin kararlı olduğu alandır (Bucher & Grapes, 2011'den). İçi dolu yıldız ve içi dolu dairelerin olduğu alanlar, Kazdağ Masifi'ne ait metamorfitlerde izlenen basınç-sıcaklık şartlarını ve kırmızı ok Kazdağ Masifi'nde ilerleyen metamorfizma yönünü gösterir. Reaksiyon (1) Heinrich ve Althaus (1988)'den, reaksiyon (2) Manning ve Bohlen (1991)'den, reaksiyon (4)-(5)-(6)-(7) ve sillimanit-disten-andaluzit reaksiyon çizgileri Yardley (1989)'dan, reaksiyon (8) Pattison ve Tracy (1991)'den, reaksiyon (9) Sorensen (1986)'dan alınmıştır. Kahve çizgiler (3) aktinolit, winkit ve glokofanın kararlılık alanlarını gösterir (Otsuki & Banno, 1990'dan). Aktinolit – hornblend geçişini gösteren mavi çizgiler (10) Barker (1990)'dan alınmıştır. Menekşe noktalı çizgi (11) glokofanın maksimum duraylılık alanını gösteren çizgidir (Maresch, 1977'den). GLF: Glokofanit fasiyesi, YŞF: Yeşilışt fasiyesi, EAF: Epidot-amfibolit fasiyesi, AF: Amfibolit fasiyesi, GNF: Granulit

fasiyesi, EF: Eklojit fasiyesi, Gl: Glokofan, Wnk: Winkit, Akt: Aktinolit, Hbl: Hornblend, Lvs: Lavsonit, Jd: Jadeyit, Pg: Paragonit, Ep: Epidot, Zo: Zoizit, Q: Kuvars, Ktd: Kloritoyid, St: Stavrolit, Fe-St: Fe-stavrolit, Alm: Almandin, Rt: Rutil, Kl: Klorit, Ms: Muskovit, Gr: Granat, By: Biyotit, Ds: Disten, Si: Sillimanit, And: Andaluzit, Sf: Sfen.

Figure 14. The petrogenetic diagram showing the pressure-temperature conditions of the initial metamorphism in the Kazdağ Massif. The facies boundaries have been shown with the thick gray line and have been taken from Takasu (1989). The gray colored area is the stable area of Gr+Byt+St paragenesis showing amphibolite facies (from Bucher & Grapes, 2011). The areas with solid stars and solid circles indicate the pressure-temperature conditions observed in the metamorphics of the Kazdağ Massif, and the red arrow indicates the progressive metamorphism direction in the Kazdağ Massif. Reaction (1) has been taken from Heinrich and Althaus (1988). Reaction (2) has been taken from Manning and Bohlen (1991). Reaction (4)-(5)-(6)-(7) and sillimanite-disthene-andalusite reaction lines have been taken from Yardley (1989). Reaction (8) has been from Pattison and Tracy (1991). Reaction (9) has been from Sorensen (1986). Brown lines (3) show areas of stability of actinolite, winkit, and glaucophane (from Otsuki & Banno, 1990). The blue lines (10) showing the actinolite-hornblende transition are taken from Barker (1990). The violet dotted line (11) is the line showing the area of maximum stability of glaucophane (from Maresch, 1977). GLF: Glaucophane facies, YŞF: Greenschist facies, EAF: Epidote-amphibolite facies, AF: Amphibolite facies, GNF: Granulite facies, EF: Eclogite facies, Gl: Glaucophane, Wnk: Winkit, Akt: Akt, Hbl: Hornblend, Lvs: Lavsonit, Jd: Jadeite, Pg: Paragonite, Ep: Epidote, Zo: Zoizite, Q: Quartz, Ktd: Chloritoid, St: Staurolite, Fe-St: Fe-staurolite, Alm: Almandine, Rt: Rutile, Kl: Chlorit, Ms: Muscovite, Gr: Garnet, By: Biotite, Ds: Kyanite, Si: Sillimanite, And: Andaluzite, Sf: Sphene.

Kazdağ Masifi'nde, Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnayslarda, epidotla birlikte hornblendlerin (soluk yeşil-yeşil) ve kloritlerin bulunması, epidot-amfibolit fasiyesinin kararlı olduğu alan ile birlikte düşünüldüğünde, ortamda, epidot-amfibolit fasiyesinde gerçekleşen metamorfizmada sıcaklığın 430 °C 'yi aştığını gösterir (Şekil 14). Epidot-hornblend gnayslarda granatın gözlenmemesi, ortamda, Pattison ve Tracy (1991)'in belirttiği Muskovit+Kuvars+Klorit → Granat+Biyotit+H₂O reaksiyonunun (Şekil 14) gerçekleşmediğine işaret eder. Dolayısıyla, epidot-amfibolit fasiyesinde gerçekleşen bu metamorfizmanın üst sıcaklık şartları, maksimum 500 °C ile sınırlanır (Şekil 14).

Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnayslarda zoisitlerin gözlenmesi, buna kaşılık anortitin yeralmaması (Şekil 14, Reaksiyon 9), ortamda, epidot-amfibolit fasiyesinde gerçekleşen metamorfizmada, minimum 430 °C sıcaklık şartı ile birlikte düşünüldüğünde, alt basınç sınırının minimum 5 kbar olduğunu gösterir (Şekil 14). Kazdağ Masifi içerisinde glokofan gözlenmemiştir. Bu nedenle, ortamda glokofanın bulunmaması, Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnayslarda epidotla birlikte hornblendlerin (soluk yeşil-yeşil) ve kloritlerin yer alması ve ayrıca epidot-hornblend gnayslarda granatın gözlenmemesinden ötürü ortamda maksimum 500 °C sıcaklık şartının olması; epidot-amfibolit fasiyesinde gerçekleşen metamorfizmanın üst basınç sınırını 8 kbar ile sınırlar (Şekil 14).

Sonuç olarak, Kazdağ Masifi'nde, etkileri Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnayslarda tipik olarak gözlenen epidot-amfibolit fasiyesindeki metamorfizma yaklaşık 430-500 °C sıcaklık ve 5-8 kbar basınç şartlarında gerçekleşmiş olmalıdır (Şekil 14, yıldız ile taralı alan).

Kazdağ Masifi'ne ait granat-biyotit gnays (Fındıklı formasyonu) ve sillimanit-biyotit gnayslarda (Sütüven formasyonu) gözlenen ve orta dereceli metamorfizmanın (amfibolit fasiyesi) orta-yüksek basınç alanlarına işaret eden (Winkler, 1970) stavrolit, amfibolit fasiyesinin tipik bir mineralidir (Şekil 14). Disten tipi bir jeoterm boyunca ilerleyen metamorfizmada; 520 °C 'de biyotit, 540 °C 'de granat ve son olarak yine 540 °C 'de stavrolit oluşur. "Granat-biyotit-stavrolit" birlikteliği amfibolit fasiyesinin büyük bir bölümü için karakteristiktir (Bucher & Grapes, 2011; Şekil 14). Kazdağ Masifi'ne ait metasemipelitik kayalarda stavrolitin olduğu ortamlarda "granat+biyotit+stavrolit" parajenezi gözlenir. Bu mineral parajenezi, Şekil 14 'de gösterilen basınç ve sıcaklık aralıklarında (gri renkli boyalı alan) kararlıdır (Bucher & Grapes, 2011). Dolayısıyla, metasemipelitik kayalardaki "granat+biyotit+stavrolit" parajenezi gözönüne alındığında, Kazdağ Masifi'nde, epidot-amfibolit fasiyesinden sonra amfibolit fasiyesi'nin "stavrolit-almandin alt fasiyesi"ne doğru ilerleyen tarzda bir metamorfizma gelişmiştir. Kazdağ Masifi'ndeki metasemipelitik

kayaçlarda gözlenen “granat+biyotit+stavrolit” parajenezine göre, “stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gelişen bu amfibolit fasiyesindeki metamorfizma, maksimum 8 kbar basınçta gerçekleşmiş olmalıdır (Şekil 14). Stavrolit içeren metasemipelitik kayaçlarda distenin gözlenmesi ve sillimanitin birincil olarak görülmemesi, basıncın alt sınırını 5 kbar ile sınırlar. Dolayısıyla, Kazdağ Masifi’nde amfibolit fasiyesinin “stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gerçekleşen metamorfizma, 5-8 kbar basınç şartlarında gerçekleşmiş olmalıdır (Şekil 14; İçi dolu daire ile taralı alan).

Metasemipelitik kayaçlarda granat+biyotit+stavrolit parajenezinin gözlenmesi, stavrolitle distenin birlikte bulunması, bu ortamda birincil sillimanitin olmaması, amfibolit fasiyesinin “stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gerçekleşen bu metamorfizmada sıcaklık şartlarının 550-625 °C arasında olduğunu göstermektedir (Şekil 14; İçi dolu daire ile taralı alan).

Dolayısıyla, Kazdağ Masifi başlangıçta; Fındıklı formasyonu “epidot-amfibolit fasiyesi”nden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi’ne doğru ilerleyen tarzda, Sütüven formasyonu “amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde, Tozlu formasyonu ise amfibolit fasiyesinde (muhtemelen stavrolit-almandin alt fasiyesi) metamorfizmaya uğramıştır. Epidot-amfibolit fasiyesindeki metamorfizma 430-500 °C sıcaklık ve 5-8 kbar basınç şartlarında, bunu takip eden, amfibolit fasiyesinin “stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gerçekleşen metamorfizma ise 550-625 °C sıcaklık ve 5-8 kbar basınç şartlarında gerçekleşmiş olmalıdır (Şekil 14).

4.2.4. Kazdağ Masifi’nde ikinci evre metamorfizmanın P-T şartları

4.2.4. P-T conditions of the second phase metamorphism within the Kazdağ Massif

Kazdağ Masifi içerisindeki Fındıklı formasyonunda gözlenen amfibollü gnays, biyotitli gnays, mikaşist ve biyotitlişistler ile Sütüven formasyonunda gözlenen mika gnays ve biyotit gnayslarda, kahve renkli biyotitler ve kısmen muskovitler ilerleyen reaksiyonlarla lifsi sillimanite dönüşmüştür. Fındıklı formasyonunda gözlenen amfibollü gnays ve biyotitli gnayslarda, disten ilerleyen reaksiyonlarla lifsi sillimanite dönüşmüştür. Disten, Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit gnayslarda, biyotit ve muhtemelen stavrolitden itibaren ilerleyen reaksiyonlarla açığa çıkmıştır. Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit-gnayslar ve Sütüven formasyonuna ait sillimanit-biyotit gnayslarda, ortamda ilerleyen reaksiyonlarla (artan sıcaklık) birlikte, stavrolitin yerini granat ve/veya disten almıştır. Yine bu kayaçlarda, “Muskovit+Kuvars → Sillimanit+Ortoklas+Su” reaksiyonu gerçekleşmiştir. Bütün bu özellikler, amfibolit fasiyesinde gerçekleşen ilk metamorfizmadan sonra, ortamda sıcaklığın arttığını buna karşılık basıncın azaldığını göstermektedir.

Sütüven formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnayslar yer yer anateksiye uğramış ve migmatitler oluşmuştur. Kazdağ Masifi içerisinde “Muskovit+Kuvars → Sillimanit+Ortoklas+Su” reaksiyonunun gerçekleşmesi, Masif’teki migmatit oluşumları ile birlikte düşünüldüğünde, sıcaklığın 650 °C ‘yi geçtiğini gösterir (Şekil 15). Kazdağ Masifi içerisinde kordiyeritin gözlenmemesi ve ortamda “sillimanit + almandin” mineral topluluğunun yer alması, etkili olan basıncın alt sınırını 3 kbar ile sınırlar (Şekil 15). Kazdağ masifi metamorfizmalarında ortoamfibol ve ortoproksenlerin gözlenmemesi, “Muskovit+Kuvars → Sillimanit+Ortoklas+Su” reaksiyonu ile birlikte düşünüldüğünde, etkili olan metamorfizmada sıcaklığın üst sınırının 725 °C ‘yi, basıncın ise 6 kbar ‘ı geçmediğine işaret eder (Şekil 15).

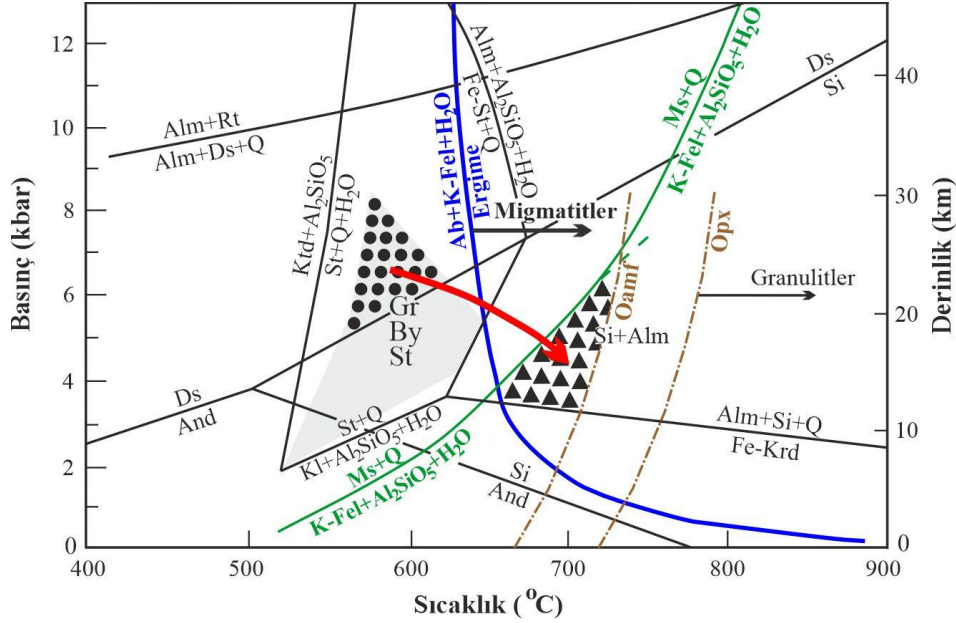
Bütün bu özellikler ve Kazdağ Masifi içerisindeki mineral parajenezleri gözönüne alındığında; Kazdağ Masifi, Fındıklı formasyonunda “epidot-amfibolit fasiyesi”nden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi’ne doğru ilerleyen tarzda, Sütüven formasyonu “amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gelişen başlangıç metamorfizmasından (Şekil 15, içi dolu daire ile taralı alan) sonra, etkileri özellikle Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında tipik olarak izlenen, 650-725 °C sıcaklık ve 3-6 kbar basınç şartları altında, üst amfibolit fasiyesinin “sillimanit-almandin-ortoklas alt fasiyesi”ne kadar ulaşan ilerleyen bir metamorfizmaya uğramıştır (Şekil 15, içi dolu üçgen ile taralı alan). Bu ikinci metamorfizma etkileri Tozlu formasyonunda izlenememiştir.

4.2.5. Kazdağ Masifi’nde üçüncü evre metamorfizma ve P-T şartları

4.2.5. Third phase metamorphism and P-T conditions within the Kazdağ Massif

Fındıklı formasyonuna ait amfibollü gnays, biyotitli gnays ve metapelitikşistlerde ve Sütüven formasyonuna ait paragnays ve ortognayslarda; granat, kahve biyotit, hornblend klorite (ripidolit) ve aktinolite (Şekil 11c,

11d, 16a, 16b, 16d ve 16e), plajiyoklas ve ortoklas serisite (Şekil 16c) dönüşmüştür. Tozlu formasyonuna ait; amfibolitlerde hornblend klorite (ripidolit), plajiyoklas ve ortoklas serisite, metadunitlerde relik olivin serpentine ve klorite (ripidolit), metaproksenitlerde relik klinoprosken ve relik ortoprosken klorite (ripidolit) ve metaproksenhornblenditlerde relik hornblend ve relik klinoprosken klorite dönüşmüştür.



Şekil 15. $P = P_{H_2O}$ olan pelitik metasedimentler için petrojenetik diyagram (Yardley, 1989'dan). Gri alan amfibolit fasiyesini gösteren Gr+By+St parajenezinin kararlı olduğu alandır (Bucher & Grapes, 2011). İçi dolu daireler ve içi dolu üçgenlerin olduğu alanlar, Kazdağ Masifi'ne ait metapelitik-metasemipelitik-metasammitik kayalarda izlenen birinci ve ikinci metamorfizma evrelerinin basınç-sıcaklık şartlarını, kırmızı ok Kazdağ Masifi'nde ilerleyen metamorfizma yönünü gösterir. Ab: Albit, Krd: Kordiyerit, K-Fel: K-feldispat, An: Anortit, Oamf: Ortoamfibol, Opx: Ortoprosken, diğer mineral simgeleri Şekil 14 'deki gibidir.

Figure 15. Petrogenetic diagram for pelitic metasediments with $P = P_{H_2O}$ (from Yardley, 1989). The gray area is the stable area of Gr+By+St paragenesis showing amphibolite facies (Bucher & Grapes, 2011). The areas with solid circles and solid triangles indicate the pressure-temperature conditions of the first and second metamorphism stages observed in the metapelitic-metasemipelitic-metasammitic rocks of the Kazdağ Massif, and the red arrow indicates the progressive metamorphism direction in the Kazdağ Massif. Ab: Albite, Krd: Cordierite, K-Fel: K-feldspar, An: Anorthite, Oamf: Orthoamphibole, Opx: Orthoproxen, other mineral symbols are as in Figure 14.

Özellikle Tozlu formasyonuna ait metaproksenitler ve metaproksenhornblenditlerde “klorit+epidot+zoisit/klinozoisit”, serpantinlerde “serpantin+klorit+tremolit+talk” parajenezleri (Şekil 16f) gözlenmektedir.

Bu özellikler, Kazdağ Masifi'nde üst amfibolit fasiyesinde gelişen ikinci evre metamorfizmadan sonra, Fındıklı, Sütüven ve Tozlu formasyonlarının, gerileyen tarzda yeşilist fasiyesinde metamorfizma geçirdiğini gösterir.

Gerileyen bu metamorfizma sonucu, Fındıklı formasyonuna ait amfibollü ve biyotitli gnays ile Sütüven formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnayslarda;

Muskovit + Biyotit + Mg-Fe Klorit + Kuvars + Albit (Şekil 17 - (1)),

Muskovit + Biyotit + Mikroklin + Kuvars (Şekil 17 - (2)),

Muskovit + Mg-Fe Klorit + Kuvars,

Fındıklı formasyonuna ait amfibollü ve biyotitli gnayslarda;

Kalsit + Epidot + Klorit + Albit + Kuvars,

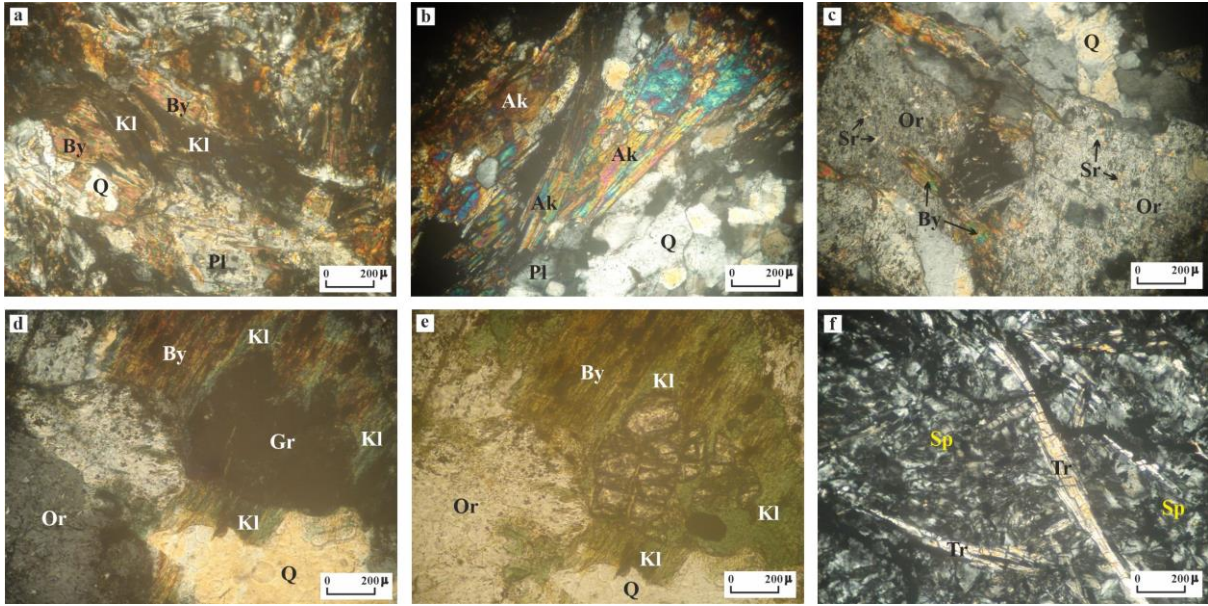
Sütüven formasyonuna ait granitik gnayslarda;

Aktinolit + Mg-Fe Klorit + Epidot + Albit (Şekil 17 - (3)),

Mg-Fe Klorit + Epidot + Albit + Kuvars
ve Tozlu formasyonuna ait serpantinlerde;

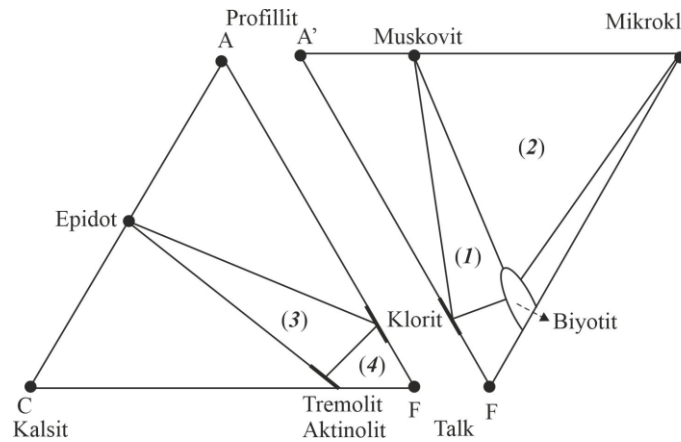
Tremolit + Klorit + Talk (Şekil 17 - (4))

parajenezleri, yeşilşist fasiyesinin (Abukama tip) “kuvars-albit-muskovit-biyotit” alt fasiyesi”ne işaret eder (Şekil 17).



Şekil 16. (a) ve (b) Fındıklı formasyonuna ait granat-biyotit gnays ve epidot-hornblend gnaysda biyotitten (By) dönüşen klorit (Kl) ve muhtemelen hornblendden dönüşen aktinolitler (Ak). (c) Sütüven formasyonuna ait mika gnays içerisinde ortoklasdan (Or) dönüşen serisitler (Sr). (d) ve (e) Sütüven formasyonuna ait granitik gnays içerisinde granat (Gr) ve biyotitten dönüşen kloritler. (f) Tozlu formasyonuna ait serpantin içerisinde serpantin (Sp) ve tremolit (Tr). Q: Kuvars, Pl: Plajiolklas. a, b, c, d, f: // Nikol, e: / Nikol (Kansun & Ökmen, 2019 ve Kansun vd., 2019’ dan).

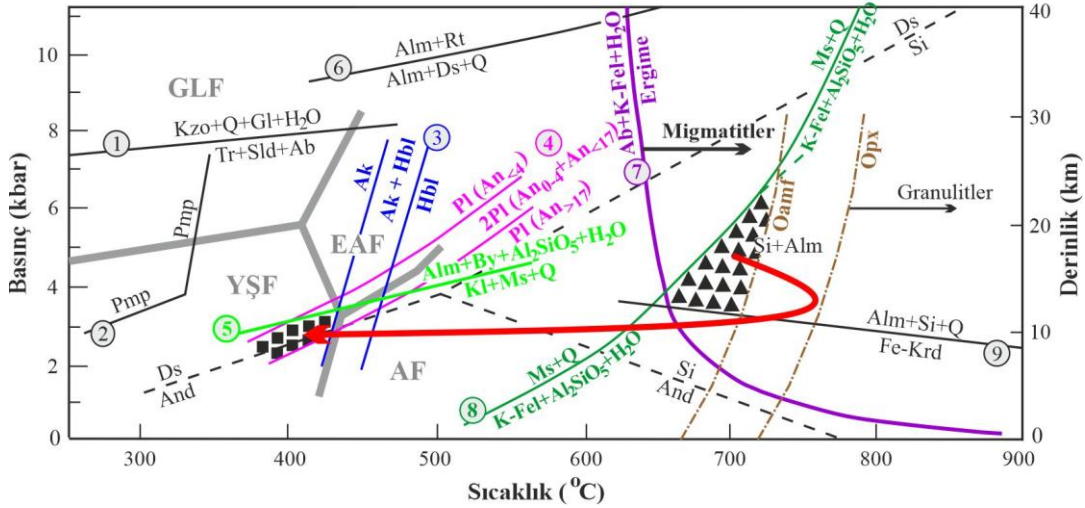
Figure 16. (a) and (b) Chlorite (Kl) transformed from biotite (By) and actinolites (Ak) possibly transformed from hornblende in garnet-biotite gneiss and epidote-hornblende gneiss belonging to the Fındıklı formation. (c) Sericites (Sr) transformed from orthoclase (Or) in mica gneiss belonging to the Sütüven formation. (d) and (e) Chlorites transformed from garnet (Gr) and biotite in granitic gneiss belonging to the Sütüven formation. (f) Serpentine (Sp) and tremolite (Tr) in serpentinite belonging to the Tozlu formation. Q: Quartz, Pl: Plagioclase. a, b, c, d, f: // Nicol, e: / Nicol (from Kansun & Ökmen, 2019 and Kansun et al., 2019).



Şekil 17. Yeşilşist fasiyesinin kuvars-albit-muskovit-biyotit alt fasiyesinde gözlenen topluluklar (Winkler, 1967). A, A', C, F ve K formülleri Şekil 8 'de verilmiştir.

Figure 17. The assemblages observed in the quartz-albite-muscovite-biotite sub-facies of the greenschist facies (Winkler, 1967). Formulas A, A', C, F and K are given in Figure 8.

Kazdağ Masifi'ne ait metapelit ve metasemipelitlerde yeşilist fasiyesine ait mineral toplulukları içerisinde, almandinin gözlenmemesi ve klorit+muskovit+kuvars parajenezinin bulunması, "Klorit+Muskovit+Kuars → Almandin+Al₂SiO₅+H₂O" reaksiyonunun (Şekil 18, Reaksiyon 5) gerçekleşmediğine işaret eder. Ayrıca, gerek Fındıklı formasyonuna ait epidot-hornblend gnaylarda ve gerekse Sütüven formasyonuna ait granitik gnaylarda aktinolit yer alır. Dolayısıyla, yeşilist fasiyesi şartlarında almandinin gözlenmemesi ve aktinolit kararlı olduğu üst sıcaklık sınırı, yeşilist fasiyesinin üst sıcaklık sınırı ile birlikte düşünüldüğünde, ortamda basıncın 3,5 kbar'dan az, sıcaklığın ise maksimum 430 °C olduğunu gösterir (Şekil 18).



Şekil 18. Kazdağ Masifi'nde ikinci ve üçüncü evre metamorfizmaların basınç-sıcaklık şartlarını gösteren petrojenetik diyagram. Fasiyes sınırları kalın gri çizgi ile gösterilmiş ve Takasu (1989)'dan alınmıştır. İçi dolu üçgenler ve içi dolu karelerin olduğu alanlar, Kazdağ Masifi'nde izlenen ikinci ve üçüncü metamorfizma evrelerinin basınç-sıcaklık şartlarını, kırmızı ok Kazdağ Masifi'nde ilerleyen metamorfizma yönünü gösterir. Reaksiyon (1) Maruyama vd. (1986)'dan, pumpellyitin duraylılık alanını gösteren çizgi (2) Powell vd. (1993)'den, aktinolit – hornblend geçişini gösteren mavi çizgiler (3) Barker (1990)'dan, plajiyoklas alanlarını gösteren pembe çizgiler (4) Maruyama vd. (1983)'den, reaksiyon (5) Joshi vd. (1994)'den alınmıştır. Reaksiyon (6)-(7)-(8)-(9), Al-silikat (disten-andaluzit-sillimanit) faz eğrileri ve ortoamfibol – ortoproksen duraylılık alanlarını gösteren kahve renkli çizgiler Yardley (1989)'dan alınmıştır. Kzo: Klinozoit, Tr: Tremolit, Sld: Seladonit, Pmp: Pumpellyit. Fasiyes ve diğer mineral simgeleri Şekil 14 ve 15 'deki gibidir.

Figure 18. The petrogenetic diagram showing the pressure-temperature conditions of the second and third stage metamorphisms in the Kazdağ Massif. The facies boundaries have been shown with a thick gray line and have been taken from Takasu (1989). The areas with solid triangles and solid squares indicate the pressure-temperature conditions of the second and third metamorphism stages observed in the Kazdağ Massif, and the red arrow indicates the progressive metamorphism direction in the Kazdağ Massif. Reaction (1) has been taken Maruyama et al. (1986). The line showing the stability area of pumpellyite (2) has been taken from Powell et al. (1993). Blue lines showing actinolite – hornblende transition (3) have been taken from Barker (1990). Pink lines showing plagioclase fields (4) have been taken from Maruyama et al. (1983). Reaction (5) has been taken from Joshi et al. (1994). Reaction (6)-(7)-(8)-(9), Al-silicate (kyanite-andalusite-sillimanite) phase curves and brown lines showing stability areas of orthoamphibole - orthoproxene have been taken from Yardley (1989). Kzo: Clinozoisite, Tr: Tremolite, Sld: Celadonite, Pmp: Pumpellyite. Facies and other mineral symbols are as in Figures 14 and 15.

Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında yeşilist fasiyesinin karakteristiği olan albit bileşimli plajiyoklaslara rastlanılmaktadır. Fındıklı formasyonu içerisindeki plajiyoklasların anortit içeriği minimum % 6 'ya kadar (Ab₉₄An₀₆; Albit), Sütüven formasyonuna ait plajiyoklaslarda ise minimum % 5 'e kadar (Ab₉₅An₀₅; Albit) düşmektedir. Amfibolit fasiyesinde (özellikle almandin-amfibolit fasiyesi) plajiyoklasların anortit içeriği % 15 'den büyüktür (An ≥ % 15; Turner & Verhogen, 1960). Dolayısıyla, Kazdağ Masifi'ndeki son metamorfizmanın yeşilist fasiyesinde gerçekleştiği ve ayrıca Şekil 18 'de verilen Maruyama vd. (1983)'ün plajiyoklas kararlılık alanları (4) gözönüne alındığında, ortamda yeşilist fasiyesindeki metamorfizmada minimum basıncın 2 kbar, minimum sıcaklığın ise 375 °C olduğu görülür (Şekil 18).

Buna göre, Kazdağ Masifi'nde etkili olan yeşilşist fasiyesindeki metamorfizma 375-430 °C sıcaklık ve 2-3.5 kbar basınç şartlarında gerçekleşmiş olmalıdır (Şekil 18, içi dolu kare ile taralı alan).

5. Tartışma ve sonuçlar

5. Discussion and conclusions

Kazdağ Masifi tabanda, yaygın olarak amfibollü gnayslardan, üst seviyelerinde mikaşistlerden ve iri kristalli kristalize kireçtaşlarından oluşan Fındıklı formasyonu ile başlar. Bu formasyon, ayrıca, yaygın olarak kristalize kireçtaşı ara düzeyleri içerir. Üstte tektonik dokanakla, amfibolit ve metaofiyolitlerden yapılu Tozlu formasyonu yer alır. Altta ince bir gnays seviyesi ve bunun üzerinde kalın kristalize kireçtaşlarından oluşan Sarıkız formasyonu, Tozlu formasyonunu uyumsuzlukla örter. Masifin en üst seviyesini, yine tektonik bir dokanakla Sütüven formasyonu oluşturur. Bu formasyon amfibolit-granitik gnays-mermer bant ve mercekleri ve migmatit seviyeleri içeren gnayslardan yapıldır.

Kazdağ Masifi, özellikle Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında yer alan metapelitik ve metabazik kayalarda gözlenen ve farklı metamorfizma şartlarında açığa çıkan mineral parajenezleri ve indeks minerallere göre, çok evreli metamorfizmaya maruz kalmıştır. Bingöl (1968, 1969), Kazdağ Masifi'nin yeşilşist fasiyesinden amfibolit fasiyesine ve hatta granülit fasiyesi başlangıcına kadar farklı mineral parajenezleri içerdiğini, amfibolit fasiyesi topluluklarının hem düşük hemde yüksek basınç metamorfizması izlerini taşıdığını belirtir. Gözler (1986), Masifin üç farklı metamorfizma zonu içerdiğini, bunların yeşilşist ve amfibolit fasiyesi parajenezlerini gösterdiğini söyler.

Kazdağ Masifi başlangıçta; Fındıklı formasyonu “epidot-amfibolit fasiyesinden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”ne doğru ilerleyen tarzda, Sütüven formasyonu “amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde, Tozlu formasyonu ise amfibolit fasiyesinde (muhtemelen stavrolit-almandin alt fasiyesi) metamorfizmaya uğramıştır. Epidot-amfibolit fasiyesindeki metamorfizma özellikle Fındıklı formasyonunda tipik olarak gözlenir. Epidot-amfibolit fasiyesindeki metamorfizma 430-500 °C sıcaklık ve 5-8 kbar basınç şartlarında, bunu takip eden amfibolit fasiyesinin “stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde gerçekleşen metamorfizma ise 550-625 °C sıcaklık ve 5-8 kbar basınç şartlarında ve 20-30 km derinlikte gerçekleşmiştir. Masif, bu başlangıç metamorfizmasından sonra, etkileri Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında tipik olarak izlenen, 650-725 °C sıcaklık - 3-6 kbar basınç şartları altında ve 10-20 km derinlikte, üst amfibolit fasiyesinin “sillimanit-almandin-ortoklas alt fasiyesi”ne kadar ulaşan ilerleyen bir metamorfizmaya uğramıştır. Kazdağ Masifi son aşamada, etkileri Fındıklı, Sütüven ve Tozlu formasyonlarında izlenen 375-430 °C sıcaklık - 2-3.5 kbar basınç şartlarında ve ~10 km derinlikte, gerileyen tarzda yeşilşist fasiyesinde metamorfizmaya maruz kalmıştır. Bu çalışmada Kazdağ Masifi ile ilgili ortaya konan bu metamorfizma şartları Bingöl (1968, 1969) ve Gözler (1986)'nın bulguları ile uyumludur.

Okay vd. (1996), Sütüven formasyonu gnayslarından alınan iki örnekte, Pb buharlaştırma yöntemiyle yapılan zirkon radyometrik yaşını 308 ± 16 my (Üst Karbonifer) olarak belirlemiştir. Bingöl (1969), Kazdağ Masifi'ndeki iki gnays örneğinden K-Ar mika yaşlarını 26 ± 3 My ve 27 ± 3 My (Oligosen) olarak belirlemiştir. Okay ve Satır (2000), Kazdağları'nda metamorfik çekirdek kompleksinin tabanındaki gnayslarda muskovit ve biyotit Rb/Sr yaşlarının 20-18 my ve 24-20 my 'da (Üst Oligosen – Alt Miyosen) toplandığını ve bunun 5 ± 1 kbar basınç ve 640 ± 50 °C sıcaklık şartlarında yüksek sıcaklık metamorfizmasına işaret ettiğini söylemektedirler. Bölge ile ilgili ortaya konulan bu metamorfizma yaş verileri, Kazdağ Masifi'nin çok evreli metamorfizmaya uğradığını doğrular.

Bu verilere göre; Sütüven formasyonuna ait gnayslarda belirlenen Üst Karbonifer yaş verileri (Okay vd., 1996); muhtemelen, Kazdağ Masifi'nde, Fındıklı formasyonunda “epidot-amfibolit fasiyesinden amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”ne doğru ilerleyen tarzda, Sütüven formasyonunda ise “amfibolit fasiyesinin stavrolit-almandin alt fasiyesi”nde izlenen ve 430-500 °C (epidot-amfibolit fasiyesi) - 550-625 °C sıcaklık (amfibolit fasiyesi) - 5-8 kbar basınç şartlarında gerçekleşen başlangıç metamorfizması ile ilişkilidir. Bingöl (1969)'un gnayslarda ve Okay ve Satır (2000)'in metamorfik çekirdek kompleksinin tabanındaki gnayslarda tanımladığı Oligosen yaşlı yüksek sıcaklık metamorfizmaları ise; muhtemelen, bu çalışmada Kazdağ Masifi'nde ikinci evre metamorfizması olarak tanımlanan ve Fındıklı ile Sütüven formasyonlarında izlenen, 650-725 °C sıcaklık - 3-6 kbar basınç şartlarında “üst amfibolit fasiyesinin sillimanit-almandin-ortoklas alt fasiyesi” şartlarında gerçekleşen, ilerleyen metamorfizma ile ilişkili olmalıdır.

Sütüven formasyonunun üst seviyelerinde gözlenen granitik gnayslar genelde masif görünümündedir. Buna karşılık, granitik gnayslar içerisindeki hornblendler, Sütüven formasyonuna ait mika gnays ve biyotit gnaysların foliasyonuna uyumlu bir şekilde aynı yönde dizilmişlerdir. [Hasözbek vd. \(2017\)](#), bu metagranitoidlerdeki zirkonların çekirdek kısımlarının yaklaşık 60-69 My (Üst Kretase – Paleosen) arasında, kenar kesimlerinin ise 22-26 My (Üst Oligosen) arasında yaşlar verdiğini ve bunların metamorfik kökenli olduğunu belirtmektedirler. [Hasözbek vd.](#)'nin metagranitoidlerde belirttiği bu son (Üst Oligosen) metamorfizma yaşları, Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında ikinci evre metamorfizma olarak izlenen üst amfibolit fasiyesindeki yüksek sıcaklık metamorfizma yaşları (Oligosen) ile benzerdir. [Erdoğan vd. \(2009, 2013\)](#), Kazdağ Grubu içerisinde yer alan metagranitlerden U-Pb seyreltme ve $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ zirkon evaporasyon yöntemi ile $24,8 \pm 4,6\text{Ma} - 28,2 \pm 4,1\text{ My}$ (Oligosen) arasında değişen yaşlar elde etmişler ve bu yaşların metagranitlerin yerleşim yaşı olduğunu söylemişlerdir. Dolayısıyla, Sütüven formasyonunda izlenen granitik gnayslar Oligosen'de Kazdağ Masifi içerisine yerleşmişler ve buna eşlik eden Kazdağ Masifi'ndeki üst amfibolit fasiyesinde gerçekleşen yüksek sıcaklık metamorfizması sonucu, Sütüven formasyonunun mika gnays ve biyotit gnaysları ile uyumlu bir foliasyon kazanmışlardır.

[Şengün \(2016\)](#), Kazdağ Masifi'nde yüzeyleyen ofiyolitik metagabrolarda, kuvarsın Ti içeriğine ve rutilin Zr içeriğine göre $\sim 660\text{ }^\circ\text{C}$ ve $\sim 10\text{ kbar}$ basınç değerleri tespit etmiştir. Şengün, bu metaofiyolitlerin $\sim 35\text{ km}$ derinlikte amfibolit fasiyesinde metamorfizmaya uğradığını ve Kazdağ Masifi içerisinde yüksek basınç gösteren ayrı bir tektonik dilim olarak bulunduğunu belirtir. Ayrıca, ofiyolitik metagabrolarda amfibolit fasiyesindeki metamorfizmanın, Neo-Tetis okyanusuna ait İzmir-Ankara kolunun Sakarya Zonu'nun altına, kuzeye doğru dalması sonucu meydana geldiğine işaret eder. [Şengün \(2016\)](#), bu dalma-batmanın K-G yönlü bir sıkışmaya ve buna bağlı olarak, Kazdağ Masifi'nin içyapısının birbiri üzerine bindirmesine neden olduğunu belirtir. [Erdoğan vd. \(2009, 2013\)](#), Kazdağ Grubu'nda yüksek sıcaklık metamorfizması ve ona eşlik eden metagranit yerleşimini takiben, Kazdağ istifinin, Alpin hareketlerle içsel olarak birbirine geçtiğini ve en alttaki Tozlu metaofiyolitlerinin güneye doğru bindirdiğini belirtmişlerdir. [Erdoğan vd. \(2013\)](#), altta yatan metaofiyolitlerin, erken Alpin orojenezi sırasında kapanan Paleo-Tetis Okyanusu'nun kalıntıları olduğunu ileri sürerler.

İnceleme alanında metaofiyolitik bir karakter gösteren Tozlu formasyonu, Fındıklı ve Sütüven formasyonları arasında tektonik dokanaklarla yer alır. Tozlu formasyonu olarak ifade edilen metaofiyolitik kayaçlardan amfibolitlerin mineral parajenezleri, bu formasyonun amfibolit fasiyesinde (muhtemelen stavrolit-almandin alt fasiyesi) bir metamorfizmaya uğradığına işaret eder. Buna karşılık, Tozlu formasyonu; Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında tipik olarak izlenen epidot-amfibolit fasiyesinden amfibolit fasiyesinin “stavrolit-almandin alt fasiyesi”ne kadar ulaşan başlangıç metamorfizmasıyla mineral parajenezleri açısından kısmen benzerlik gösterirken, Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında izlenen üst amfibolit fasiyesinin “sillimanit-almandin-ortoklas alt fasiyesi”ndeki ikinci metamorfizma etkileri Tozlu formasyonunun litolojilerinde gözlenmemektedir. Dolayısıyla, Tozlu formasyonunda izlenen amfibolit fasiyesindeki metamorfizma, Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında izlenen başlangıç ve ikinci Evre metamorfizmalarından bağımsız, farklı bir ortamda gelişmiştir. Buna göre, Tozlu formasyonu Kazdağ Masifi içerisinde ayrı bir tektonik dilimdir ve Fındıklı ile Sütüven formasyonları arasında tektonik dokanaklarla yer alan Tozlu formasyonunun Kazdağ Masifi içerisine yerleşmesi, dolayısıyla Kazdağ Masifi'nin kendi içerisinde tektonik dilimlenmesi, Fındıklı ve Sütüven formasyonlarında izlenen üst amfibolit fasiyesinde gerçekleşen ikinci metamorfizma evresinden sonra olmalıdır.

Kazdağ Masifi içerisinde tektonik dilimler şeklinde yer alan Fındıklı, Tozlu ve Sütüven formasyonları birbirleriyle uyumlu foliasyon gösterir. Bu uyumlu foliasyon; Tozlu formasyonunun Masif içerisine yerleşmesi ve dolayısıyla Kazdağ Masifinin kendi içerisinde tektonik dilimlenmesinden sonra, etkileri Kazdağ Masifi'nin tümünde (Fındıklı, Tozlu ve Sütüven formasyonları) izlenen ve $375\text{-}430\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık - $2\text{-}3,5\text{ kbar}$ basınç şartlarında gerçekleşen, gerileyen tarzdaki yeşilşist fasiyesi metamorfizması etkisiyle olmalıdır.

[Okay ve Satır \(2000\)](#), Kazdağ Masifi'nin 21 Ma (Alt Miyosen) yaşlı deforme olmamış bir granitoid tarafından kesildiğini belirtmektedir. Dolayısıyla, Kazdağ Masifi'nde Oligosen yaşlı üst amfibolit fasiyesindeki yüksek sıcaklık metamorfizmasını takip eden ve Masif'in tümünü etkileyen yeşilşist fasiyesindeki üçüncü evre metamorfizması Üst Oligosen – Alt Miyosen zaman aralığında gerçekleşmiş olmalıdır.

Teşekkür*Acknowledgement*

Bu çalışma, [Kansun ve Ökmen \(2019\)](#) tarafından hazırlanan ve Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından maddi olarak desteklenen 10201139 nolu projeden yararlanılarak yapılmıştır. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları değerli katkılarından dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz. Ayrıca, arazi çalışmaları sırasında yardımlarını gördüğümüz Kalender Kemerli ve Tufan Kolsuz'a teşekkür ederiz.

Yazar katkısı*Author contribution*

Bu çalışmada; arazi çalışmaları (haritalama ve örneklerin toplanması), kayaçlardan yapılan ince kesitlerin yorumlanması, çizim programları yardımıyla şekillerin çizilmesi ve makale yazımı Gürsel Kansun tarafından yapılmıştır.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz. Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Barker, A. J. (1990). *Introduction to metamorphic textures and microstructures* (1st ed.). Blackie & Son Limited.
- Bingöl, E. (1968). *Contribution a l' etude geologique de laportie centrale et sud. Est du Masif de Kazdağ (Turquie)* [Doctoral Thesis, Faculty of Sciences University].
- Bingöl, E. (1969). Kazdağ Masifi'nin merkezi ve güneydoğu kısmının jeolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, 72, 110-123.
- Bingöl, E. (1971). Fiziksel yaş tayini metodlarını sınıflama denemesi ve Rb-Sr ve K-Ar metodlarının Kazdağ'da bir uygulaması. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 14, 1-16.
- Bingöl, E., Akyürek, B., & Korkmazer, B. (1973). Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve Karakaya Formasyonu'nun bazı özellikleri. *Cumhuriyetin 50. Yılı Yerbilimleri Kongresi Tebliğleri* (s. 70-77), Ankara.
- Bucher, K., & Grapes, R. (2011). *Petrogenesis of metamorphic rocks* (8th ed.). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74169-5>
- Cavazza, W., Okay, A., & Zattin, M. (2009). Rapid early-middle Miocene exhumation of the Kazdağ Massif (western Anatolia). *International Journal of Earth Sciences*, 98(8), 1935-1947. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0353-9>
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Şentürk, Y., Yavaş, F., & Kar, H. (2004). New results on the lithostratigraphy of the Kazdağ Massif in northwest Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13(2), 177-186.
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Ilgar, A., Dönmez, M., & Akçay, A. E. (2007). *1:100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları, Ayvalık – İ17 paftası* (MTA Rapor No. 98). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

- Erdoğan, B., Akay, E., Hasözbeek, A., Satır, M., & Siebel, W. (2009). *Yeni jeolojik veriler ışığında Kazdağ Masifi'nin tektonik evrimi*. 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı (s. 488). https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/6cb41a908909fee_ek.pdf
- Erdoğan, B., Akay, E., Hasozbek, A., Satır, M., & Siebel, W. (2013). Stratigraphy and tectonic evolution of the Kazdagi Massif (NW Anatolia) based on field studies and radiometric ages. *International Geology Review*, 55(16), 2060-2082. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.818756>
- Gözler, M. Z., Ergül, E., Akçaören, F., Genç, Ş., Akat, U., & Acar, Ş. (1984). *Çanakkale Boğazı doğusu Marmara Denizi güneyi Bandırma- Balıkesir- Edremit ve Ege Denizi arasındaki alanın jeolojisi ve komplikasyonu* (MTA Rapor No. 7430). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Gözler, M. Z. (1986). Kazdağ batısı Mıhlidere Vadisi'nin jeolojik petrografik incelenmesi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 29, 133-142.
- Gümüş, A. (1964). *Contribution al'étude geologique de secteur serpentinal de Kalabak Köy region D'Edremit, Turquie* (MTA Publication No. 117). Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü.
- Hasözbeek, A., Şengün, F., Doğan Külahcı, G. D., Zack, T., & Schmitt, K. A. (2017). *Isotope geochemistry and geochronology of the Kazdag Massif (Northwestern Anatolia)* [Conference presentation abstract]. 70th Geological Congress of Turkey, Ankara, Turkey (pp. 520-521). <https://www.researchgate.net/publication/315836432>
- Heinrich, W., & Althaus, E. (1988). Experimental determination of the reaction $4\text{lawsonite} + \text{albite} = \text{paragonite} + 2\text{zoisite} + 2\text{quartz} + 6\text{H}_2\text{O}$ and $4\text{lawsonite} + \text{jadeite} - \text{paragonite} + 2\text{zoisite} + \text{quartz} + 6\text{H}_2\text{O}$. *Neues Jahrbuch für Mineralogie - Monatshefte*, 11, 516- 528.
- Joshi, M., Singh, B. N., & Goel, O. P. (1994). Metamorphic conditions of the aureole rocks from Dhunaghat area, Kumaun Lesser Himalaya. *Current Science*, 67(3), 185-188.
- Kansun, G., & Ökmen, G. (2019). *Güre-Çamlıbel (Edremit-Balıkesir) kuzeyindeki Kazdağ Masifi metamorfitlelerinin stratigrafi, petrografi ve jeokimyası* (SÜBAP No. 10201139). Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü.
- Kansun, G., Afzali, A. O., & Ökmen, G. (2019). *Stratigraphy and petrographical properties of the Kazdağ Massif metamorphites in the north of Güre-Çamlıbel, Edremit-Balıkesir-Turkey*. ISAS Winter 2019, 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences Proceedings (pp. 289-315). <https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.080>
- Manning, C. E., & Bohlen, S. R. (1991). The reaction $\text{titanite} + \text{kyanite} = \text{anorthite} + \text{rutile}$ and $\text{titanite}-\text{rutile}$ barometry in eclogites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109(1), 1-9. <https://doi.org/10.1007/BF00687196>
- Maresch, W. V. (1977). Experimental studies on glaucophane: an analysis of present knowledge. *Tectonophysics*, 43(1-2), 109-125. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90008-7)
- Maruyama, S., Suzuki, K., & Liou, J. G. (1983). Greenschist-amphibolite transition equilibria at low pressures. *Journal of Petrology*, 24(4), 583-604. <https://doi.org/10.1093/petrology/24.4.583>
- Maruyama, S., Cho, M., & Liou, J. G. (1986). Experimental investigations of blueschist-greenschist transition equilibria: pressure dependence of Al_2O_3 contents in sodic amphiboles—a new geobarometer. In B. W. Evans, & E. H. Brown (Eds.), *Blueschists and eclogites* (pp. 1-16). The Geological Society of America.
- Okay, A. İ., Siyako, M., & Bürkan, K. M. (1990). Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 2(1), 83-121.
- Okay, A. I., Siyako, M., & Bürkan, K. A. (1991). Geology and tectonic evolution of the Biga Peninsula, Northwest Turkey. *Bulletin of the Technical University of Istanbul*, 44(1-2), 191-256.
- Okay, A. I., Satır, M., Maluski, H., Siyako, M., Monie, P., Metzger, R., & Akyüz, S. (1996). Paleo and Neo-Tethyan events in Northwest Turkey: Geological and geochronological constraints. In A. Yin, & T. M. Harrison (Eds.), *The Tectonics Evolution of Asia* (pp. 420-441). Cambridge University Press.

- Okay, A. I., & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. In B. Durand, L. Jolivet, F. Horvath, & M. Seranne (Eds.), *The Mediterranean Basins, Tertiary Extension within the Alpine Orogen* (pp. 475-515). Geological Society, London, Special Publications.
- Okay, A. I., & Satır, M. (2000). Coeval plutonism and metamorphism in a latest Oligocene metamorphic core complex in northwest Turkey. *Geological Magazine*, 137(5), 495-516. <https://doi.org/10.1017/S001675680004532>
- Okay, A. I. (2008). Geology of Turkey: a synopsis. *Anschnitt*, 21, 19-42.
- Otsuki, M., & Banno, S. (1990). Prograde and retrograde metamorphism of hematite - bearing basic schists in the Sanbagawa belt in central Shikoku. *Journal of Metamorphic Geology*, 8, 425-439. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1990.tb00629.x>
- Özden, S., Över, S., Altuncu Poyraz, S., Güneş, Y., & Pınar, A. 2018. Tectonic implications of the 2017 Ayvacık (Çanakkale) earthquakes, Biga Peninsula, NW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154, 125-141. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.12.021>
- Pattison, D. R. M., & Tracy, R. J. (1991). Phase equilibria and thermobarometry of metapelites. In D. M. Kerrick (Ed.), *Contact Metamorphism*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9781501509612-007>
- Powell, W. G., Carmichael, D. M., & Hodgson, C. J. (1993). Thermobarometry in a subgreenschist to greenschist transition in metabasites of the Abitibi greenstone belt, Superior Province, Canada. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(1), 165-178. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00138.x>
- Schuiling, R. D. (1959). Über eine präherzynische faltungsphase im Kazdağ Kristalin. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Bülteni*, 53, 89-93.
- Sorensen, S. S. (1986). Petrologic and geochemical comparison of the blueschist and greenschist units of the Catalina Schist terrane, Southern California. In B. W. Evans, & E. H. Brown (Eds.), *Blueschists and eclogites* (pp. 59-75). The Geological Society of America.
- Şengün, F. (2016). Kazdağ Masifi'nde (Biga Yarımadası) yer alan meta-ofiyolitik kayaların titaniQ termometresi ve rutil iz element bileşimi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 59(2), 131-154. <https://doi.org/10.25288/tjb.298197>
- Şentürk, Y. (2005). *Kazdağ Masifi (Balıkesir) metadunit, amfibolit/metagabrolarının jeolojisi ve titan içeriği açısından değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Şentürk, Y., & Ünlü, T. (2009). Kazdağ Masifi (Balıkesir) metaofiyolitinin jeolojisi ve Titan içeriği açısından değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 33(2), 75-115.
- Takasu, A. (1989). P-T histories of peridotite and amphibolite tectonic blocks in the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. In J. S. Daly, R. A. Cliff, & B. W. D. Yardley (Eds.), *Evolution of Metamorphic Belts* (pp. 533-538). Geological Society Special Publications.
- Turner, F. J., & Verhogen, J. (1960). *Igneous and metamorphic petrology* (2nd ed.). McGraw-Hill, New York.
- Winkler, H. G. F. (1967). *Petrogenesis of metamorphic rocks* (2nd ed.). Springer-Verlag, New York-Berlin.
- Winkler, H. G. F. (1970). Abolition of metamorphic facies, introduction of the four. Divisions of metamorphic stage, and of a classification based on isograds in common rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 5, 189-248.
- Winkler, H. G. F. (1979). *Petrogenesis of metamorphic rocks* (5th ed.). Springer-Verlag, New York-Berlin.
- Yardley, B. W. D. (1989). *An introduction to metamorphic petrology*. Longman Scientific & Technical, New York.

Cami yapılarının ergonomik açıdan irdelenmesi: Marmara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Cami örneği

Examining mosque structures from an ergonomic point of view: the example of Marmara University Theology Faculty Mosque

Sinem TAPKI *¹ 

¹ Bursa Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 16000, Bursa

• Geliş tarihi / Received: 12.01.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

Öz

İnsanlık tarihi boyunca inanç kavramı önemli bir yer tutmaktadır ve insanların hayatlarını etkilemektedir. İnsanların ibadet etme hakları var olup ibadet mekanlarının kullanımı, tasarımı, engellilerin erişilebilirliği, ergonomik açıdan uygunluğu önem taşımaktadır. Bu çalışmada, cami mekanının ergonomik açıdan uygunluğu, iç ve dış ibadet mekanları tasarımının ergonomik ölçütlerle mevcut durumu tespit edilerek ibadet eylemine uygunluğu, mekan kalitesinin analizi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda İstanbul yer alan Marmara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Cami incelenerek cami tasarımı değerlendirilmiştir. Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama teorik bölümdür ve ibadet mekanları tasarımı, evrensel tasarım ilkeleri ve ibadet mekanları, ibadet mekanları ve ergonomi ilişkisi ele alınarak cami yapıları özelinde iç ve dış mekanın bütüncül olarak herkesin kullanımına uygun ve erişilebilir olması araştırılmıştır. Literatürde ibadet yapılarının ergonomik açıdan değerlendirilmesinde eksiklik görülmüştür. Bu eksiklik çalışmanın ilk aşamasında, ergonomi ve ibadet mekanı tasarımı ilişkisinin incelenmesi için antropometrik, fizyolojik, psikolojik, enformatik, davranışsal başlıklarından oluşan ergonomik değerlendirme ölçütleri oluşturulmuştur. Çalışmada cami ergonomik ölçütler bağlamında incelenmiş; yerinde gözlem çalışması yapılmıştır. Bu aşamada; mekanın fiziksel durumu, kullanıcı davranışları gözlemlenmiş, antropometrik açıdan uygunluğu için ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiş ve kullanıcılara mekanın ergonomik açıdan uygunluğuna ve kullanıcı memnuniyetine yönelik analizler yapılmıştır. Gözlem formuna gözlemci tarafından çizimler yapılmış, fotoğraflar çekilmiştir. Marmara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Camisi sadece ibadet mekanı olarak değil yapı bir bütün olarak analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Cami, Cami tasarımı, Engelsiz cami, Ergonomi.

Abstract

The concept of belief has an important place throughout human history. People have the right to worship, and the use of places of worship, their design, the accessibility of the disabled and their ergonomic suitability are important. In this study, it is aimed to determine the ergonomics of the mosque space, the current situation of the interior and exterior prayer rooms design with ergonomic criteria, and to analyze the quality of the place for worship. For this purpose, the mosque of Marmara University Faculty of Theology, was examined and the mosque design was evaluated. The study consists of two stages. The first stage is the theoretical part, and it has been researched that the interior and exterior spaces are suitable and accessible to everyone as a whole, in particular, by considering the design of places of worship, universal design principles and the relationship between places of worship, places of worship and ergonomics. In the literature, there has been a lack of ergonomic evaluation of prayer buildings. In the first stage of the study, ergonomic evaluation criteria consisting of anthropometric, physiological, psychological, informatics and behavioral titles were created in order to examine the relationship between ergonomics and place of worship. In the second stage of the study, the mosque was examined in the context of ergonomic criteria; on-site observations were made. At this stage, The physical condition of the space, user behaviors were observed, measurement studies were carried out for anthropometric suitability and analyzes were made for the ergonomic suitability of the space and user satisfaction for the users. Drawings were made on the observation form by the observer and photographs were taken. The Marmara University Faculty of Theology Mosque was analyzed not only as a place of worship, but as a whole.

Keywords: Mosque, Mosque design, Barrier-free mosque, Ergonomics

* Sinem TAPKI; sinem.tapki@btu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

İnanç kavramı ilk insanın var oluşundan güzümüze kadar önemini ortaya koymuş, insanların hayatlarını etkileyip şekillendirmiştir (Şentürk, 2013). İnsanlar tarih boyunca bir dini inancı benimsemiş ve o inancın değerlerini uygulamışlardır (Aşıkoğlu, 2000). İbadet eylemi, o dini inancın değerlerini uygulamak için mekana ihtiyaç duymaktadır. Dini yapıların yapılmasındaki amaçlar; aynı dine inanan insanları bir arada bir mekanda toplamak, inanan insanların ibadetlerini gerçekleştirmek için dini inançlarına ve ibadet biçimlerine uygun bir mekan oluşturmak, dinin tanınırlığını arttırmak ve yaymak olarak sıralanabilir (Ünver, 2000).

İbadet yapıları, temsil ettikleri dine ve ibadet biçimine, ibadetin gereklilik ve ihtiyaçlarına göre şekillenmektedir. Cami yapıları Müslümanların ibadet ettikleri mekandır. Cami kelimesi Arapça bir sözcüktür ve kelimenin kökü “Cem” toplanma, bir araya gelmedir ve cami kelimesi toplayan, bir araya getiren anlamındadır (Şekil 1). Cami yapılarının sosyal - kamusal bir mekan olması, sınıf farklılıklarını içermeyen eşitlikçi ve kapsayıcı yönünün olması, dini inancını yaşamak isteyen her insanın erişebilmesi ve ibadet hakkına sahip olması yönüyle evrensel tasarım - engelsiz cami kavramlarının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 1. Cami yapısı kavramları (Tifa, 2022)

Figure 1. Mosque structure concepts

Çalışma kapsamında, literatür taraması yapılmış, ulusal ve uluslararası yayınlar, standartlar ve yönetmelikler incelenmiştir. İncelenen kaynaklarda cami yapısı mimarisi; tarih, mimarlık tarihi, sanat tarihi, mekân algısı, restorasyon, teknoloji tarihi, çağdaş cami mimarisi tasarımında yenilikçi yaklaşımlar, 20. yüzyıl ve geleneksel cami tasarım yaklaşımları, kimlik, nitelik, biçimsel algı, üslup ve sosyoloji konularında alt başlıklarda ve farklı disiplinlerde ele alınmıştır. İbadet yapılarında gün ışığı, aydınlatma konularında; Bolak (1967), tarafından yapılan çalışmada cami yapısındaki ve kilise yapısındaki gün ışığı karşılaştırılmış, camideki yapay aydınlatma kurgusu incelenmiştir. Ünver (1998), farklı ibadet yapılarında doğal ve yapay aydınlatma kurgularını analiz etmiştir. Dini yapıların ısı konfor ve enerji tüketimi açısından literatür incelendiğinde Al-Ami (2010) “Thermal Comfort in Air-conditioned Mosques in The Dry Desert Climate” adlı çalışmada Kuveyt’te yer alan iklimlendirme sistemlerine sahip cami yapılarında ısı konfor koşullarını ve kullanıcı - konfor koşulları arasındaki ilişkiyi analiz etmiştir. Cami yapılarında ısı konfor koşullarını belirlemek için ölçümler yapmıştır. Al-Homoud vd. (2009) “Assesment of Monitored Energy Use and Thermal Comfort Conditions in Mosques in Hot-Humid Climate” adlı çalışmada camilerde ısı konfor değerlendirmesi yapıp; ısıtma-soğutma ve havalandırma sistemlerinin yapı içinde mekânın kullanım bölgelerine ayrılarak daha etkin faydalanılacağı sonucunu çıkarmışlardır. Günümüzde gelişen teknolojilerle birlikte objektif, hacim akustiği parametrelerinin yardımıyla tarihi özelliği sahip veya yeni tasarlanan cami yapılarında hacim akustiğine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Yüksel Can (2003), cami akustiğine yönelik çalışmaları ve “Conservation of the Acoustical

Heritage by the Revival and Identification of Sinan's Mosques Acoustics'' isimli projesi bulunmaktadır. Yapılan literatür incelemesinde; çalışma kapsamında cami yapılarının ergonomik konfor koşulları olan antropometrik, fizyolojik, enformatik, psikolojik, davranışsal açıdan ele alan bütüncül olarak analiz eden bir çalışmanın eksikliği saptanmıştır.

Cami yapısında, namaz ibadetinde cemaat imamın yaptığı hareketlerini izler ve hareketlerini yineler. Bu sırada kullanıcılar imamı görebilmeli ve sesini duyabilmesi gereklidir. Camideki diğer eylemler de incelendiğinde; Kur'an okuma ve dinleme, hutbeleri ve ilahileri dinleme, abdest alma şeklindedir. Bu eylemler analiz edildiğinde; cami kullanıcılarının din görevlisi vb. konuşmacıları görebilmesi, toplu halde hareketlerde birlikteliğin kurulabilmesi ve okuma eyleminin gerçekleştirilebilmesi için gerekli konfor koşullarının sağlanmasında ergonominin önemi ortaya çıkmaktadır. Çalışmada sunulan temel bilgiler ve alan çalışmasının değerlendirme sonuçları; ibadet yapılarını ergonomik değerlendirme kriterlerine yönelik analizlerde yol gösterici ve bu bağlamda yapılarda konfor koşullarının sağlanması için yapılacak düzenlemeler açısından da yararlı olacaktır.

2. İbadet yapıları ve ergonomi ilişkisi

2.1. The relationship between worship buildings and ergonomics

İslam dininde ibadet kavramı, fiziksel eylemleri ve zihinsel eylemleri bir arada içermektedir. Örnek olarak; namaz kılarken yapılan hareketler fiziksel eylemler, edilen dualar ise zihinsel eylemlerdir. Namaz kılama sırasında cemaat imamın fiziksel hareketlerini izler ve yaptığı pozisyonları tekrar eder. Bu eylemlerin konforlu bir şekilde gerçekleşebilmesi için; kullanıcıların imam, din görevlisi vb. kişi ve konuşmacıları görebilmesi, toplu halde hareketlerde birlikteliğin kurulabilmesi ve okuma eyleminin gerçekleştirilebilmesi için gerekli konfor koşullarının sağlanması gereklidir.

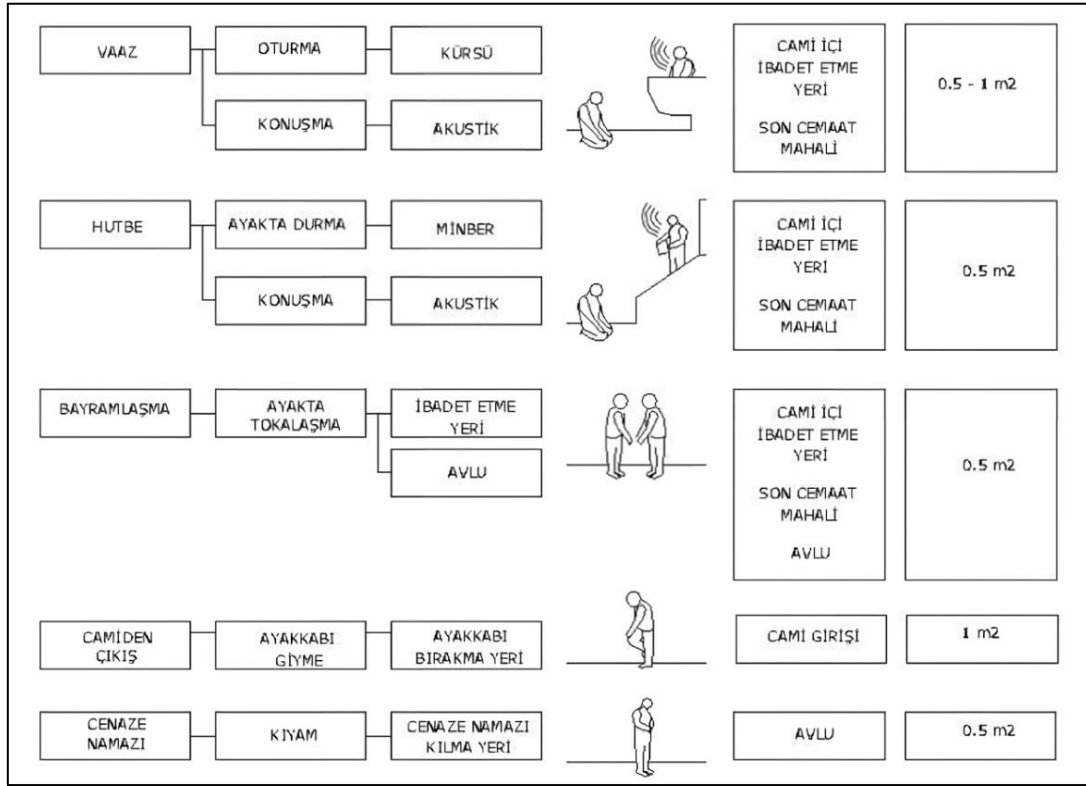
Günümüzde geleneksel ve çağdaş cami yapıları incelendiğinde bazı sorunlarla karşılaşılmaktadır. Yapılan gözlemler sonucunda ve Diyanet İşleri Başkanlığının cami tasarım ve kılavuzunda belirttiği camilerde yapılan denetimlerde görülen ibadet yapılarının günümüzdeki sorunları (Diyanet İşleri Başkanlığı, 2010) :

- Kadınlar mahfili ve kadınlar girişinin bilgilendirmelerinin eksik olması,
- Kadınlar bölümünün cami yapısının tasarımında ilk tasarım evresinde düşünülmemesi,
- Kadınlar bölümünün ana ibadet mekanında paravan gibi donatı elemanları ile mekan bölünmesinin yapılması ya da camideki farklı alana sonradan taşınması,
- Ayakkabılık donatısının ibadet mekanı ile ilişkisi,
- Temiz zemin - kirli zemin ayrımının net olmaması,
- Cami yapısının havalandırma ve ısıtma problemleri,
- İbadet mekanı ve abdesthane ilişkilerinin zayıf kurulması,
- Şadırvanların yapı dışında olması ile soğuk günlerde zorlukların yaşanması,
- Cami yapısında teknik ve donanımsal yetersizlikler,
- İmam ve cemaat ilişkisinin mekan boyut ve ölçeğinden ötürü yeterli düzeyde kurulamaması,
- Cami yapılarında fiziksel, görme ve işitme engellilerin kullanımına yönelik çözümlerin olmayışı,
- Akustik problemler,
- Cami yapılarının namaz vakitleri dışında kullanılamaması ve sosyal alan olarak değerlendirilememesi,
- Çocukları ile gelen kullanıcılar için çocuklara yönelik mekan ve donatıların olmayışı, şeklinde sıralanabilir.

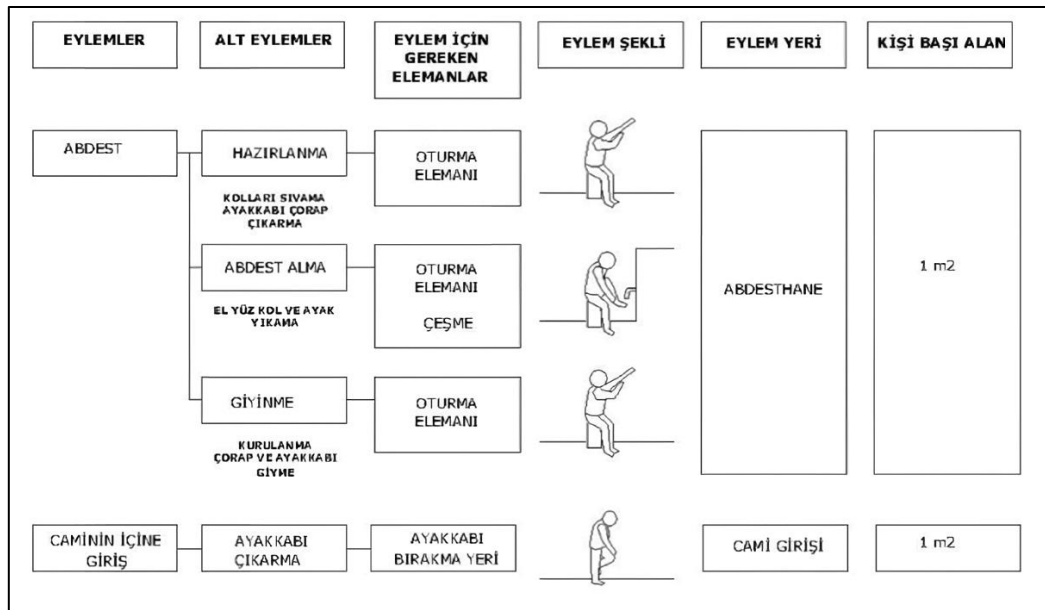
Ergonomi yaşam koşullarının, çevrenin elverişli duruma getirilmesidir. Ergonomi, insanın anatomik özellikleri, antropometrik ölçüleri, fiziksel ve psikolojik durumu ele alınarak; insan – eylem - çevre ilişkisinin maksimum oranda sağlamaktır (Çelenk, 2000). Ergonomi ve ibadet yapıları arasındaki ilişkinin temel noktasını; deneyimlenen mekanın işleve uygun olarak tasarlanması ve kullanıcının ihtiyaçlarına cevap vermesi oluşturmaktadır. İbadet yapılarındaki sorunların çözülebilmesi ve ergonomik değerlendirmenin yapılabilmesi için, cami mekansal oluşumu, eylemler ve mekan eylem ilişkileri analiz edilmelidir. Cami yapısının tasarımı, ibadetin nasıl yapıldığına göre biçimlenmektedir.

Cami yapısının mekansal oluşumu başlıca; ana ibadet mekanı (harim), minber, mihrap, vaaz kürsüsü, kadınlar bölümü olarak sıralanabilir. Bu bölümler caminin mekansal oluşumunu etkilemektedir. Yapıdaki kullanıcıların mekansal oluşumunu belirlediğinden; cami yapısının kullanıcıları camiye ibadet etmek için gelenler

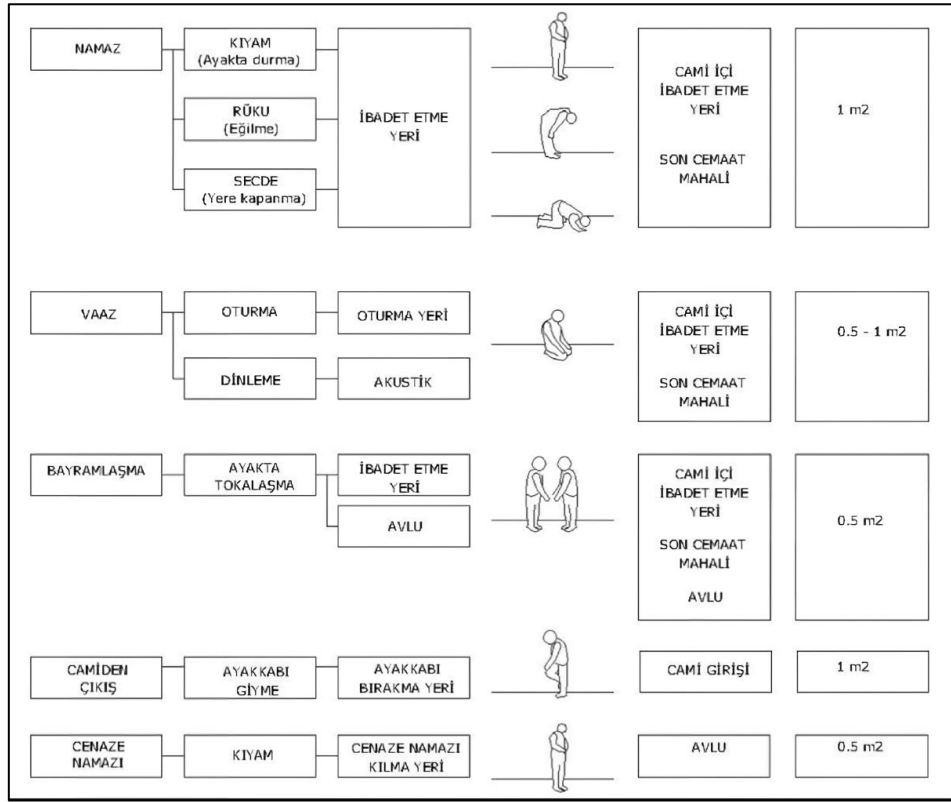
ve cami personeli olarak ayrılır. İbadet alanındaki ergonomik durum incelenirken ibadet eylemleri, ibadet alt eylemleri, gerekli donatılar, eylem şekilleri ve kişi başına gerekli alanlar iyi analiz edilmelidir. Camideki ibadet eylemleri personeller için Şekil 2’de, ziyaretçiler için Şekil 3’ ve Şekil 4’te analiz edilmiştir. Camideki eylemler başlıca olarak; namaz kılma, dua etme, Kur’an okuma ve dinleme, cuma ve bayram hutbeleri ile Mevlit ve ilahileri dinleme, bayramlaşma, abdest alma olarak sıralanabilir (Şekil 2).



Şekil 2. Camideki eylemler - personel (Uzun, 2010)
Figure 2. Actions in the mosque - employee (Uzun, 2010)

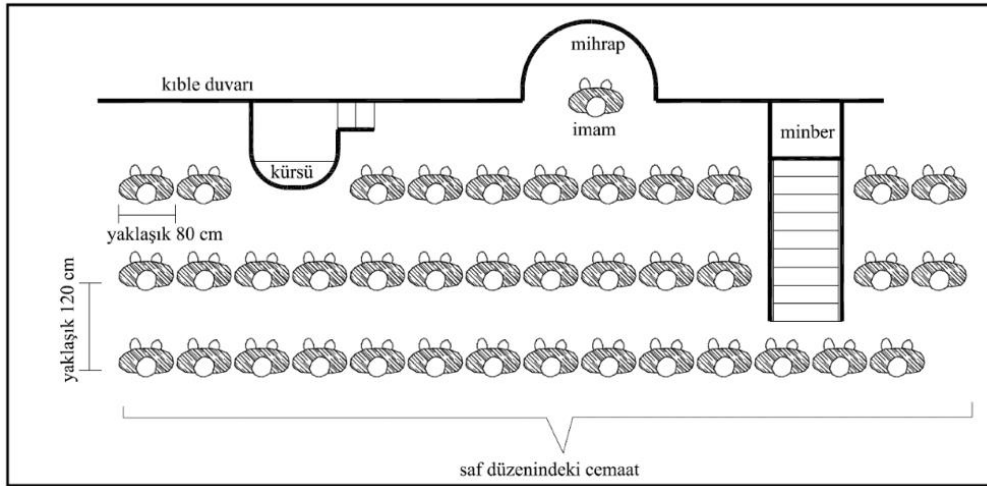


Şekil 3. Camideki eylemler – ziyaretçiler abdest, cami içine giriş (Uzun, 2010)
Figure 3. Actions in the mosque - visitor (Uzun, 2010)



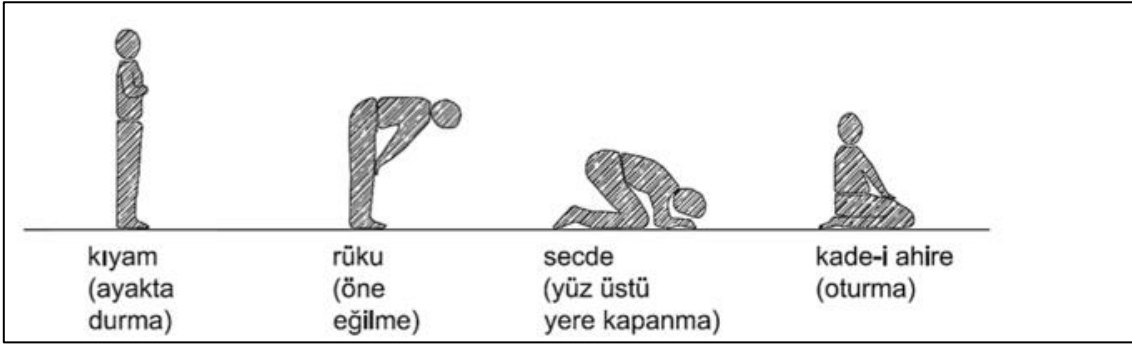
Şekil 4. Camideki eylemler – ziyaretçi namaz, vaaz, bayramlaşma, cenaze namazı (Uzun, 2010)
Figure 4. Actions in the mosque - visitor (Uzun, 2010)

Camide cemaat ile ibadet ederken iki temel biçim vardır. İlk biçim, bireysel ya da cemaat ile namaz kılariken alınması gerekli pozisyonudur. Bu pozisyonda, cemaat kible duvarına paralel olacak şekilde 120 cm. aralıklarla imamın arkasında saflar oluşturmaktadır (Şekil 5).



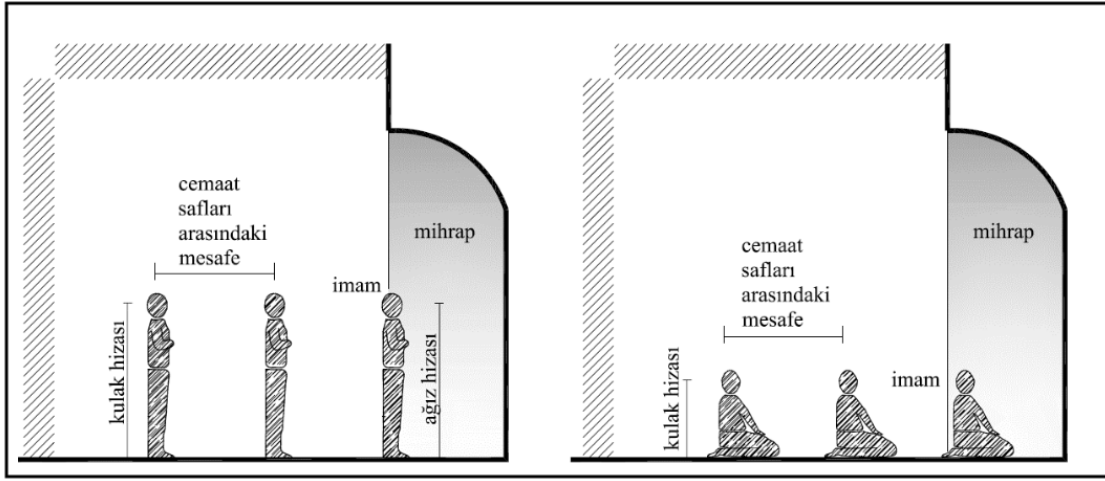
Şekil 5. Saf düzenindeki cemaat (Abdou, 2003'ten aktaran (Uysal, 2015))
Figure 5. Congregation in the pure order (cited from Abdou, 2003 (Uysal, 2015))

Cemaat namaz kılariken kıyam (ayakta durma), rüku (öne eğilme), secde (yüz üstü kapanma) ve kade - i ahire (oturuş) namaz hareketlerini yapmaktadır (Şekil 6). Namaz sırasında kişi başına gerekli alan 0,8 m. x 1.2 m = 0,96 metrekare hesabıyla bulunmaktadır (Abdou, Comparison, 2003). Cami yapılarının kişi kapasiteleri hesaplanırken, ibadet alanının kişi başına düşmesi gerekli olan 0,96 metre kareye bölünmesi ile elde edilir.



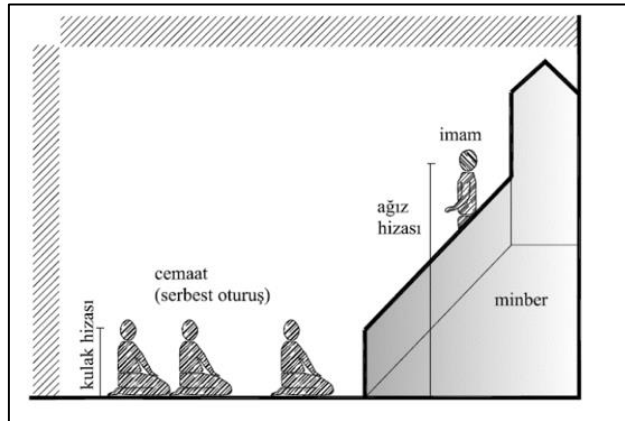
Şekil 6. Kulak ve ağız mesafesi (Abdou, Measurement, 2003'ten aktaran (Uysal, 2015))
Figure 6. Ear and mouth distance (cited from Abdou, Measurement, 2003 (Uysal, 2015))

Namazda imamın okuduğu duaların takip edilmesi gerektiğinden; söylenenlerin anlaşılır olması için imamın ağız mesafesi 150-175 cm alınırken, kadın ve erkek cemaatin yerden kulak mesafesi 140-175 cm olarak alınmaktadır (Şekil 7).

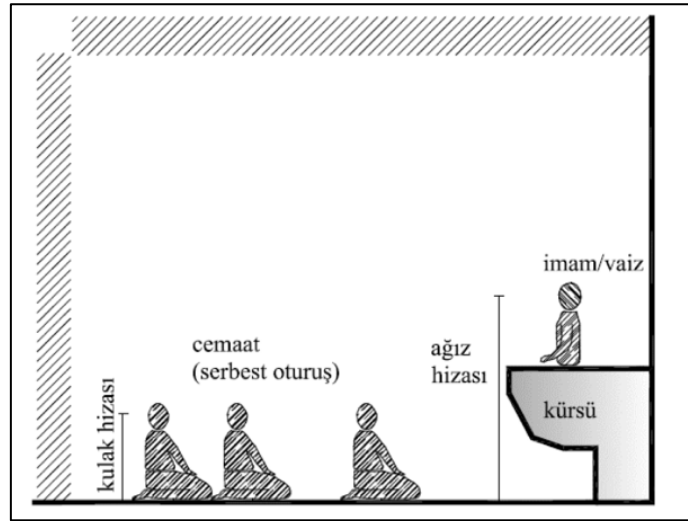


Şekil 7. Kulak ve ağız mesafesi (Abdou, Measurement, 2003'ten aktaran (Uysal, 2015))
Figure 7. Ear and mouth distance (cited from Abdou, Measurement, 2003 (Uysal, 2015))

Cemaatle ibadetin ikinci biçimi vaaz ya da hutbe dinlerken alınan pozisyondur. Bu pozisyonda ağız ve kulak mesafesi, minber ve vaaz kürsülerinin boyutuna göre değişmektedir (Şekil 8, Şekil 9). Minber yüksekliği genellikle 1 - 3 metre arasındadır.



Şekil 8. Minberde ağız ve kulak mesafesi (Abdou, 2003'ten aktaran (Uysal, 2015))
Figure 8. Mouth and ear distance on the pulpit (Abdou, 2003 cited (Uysal, 2015))



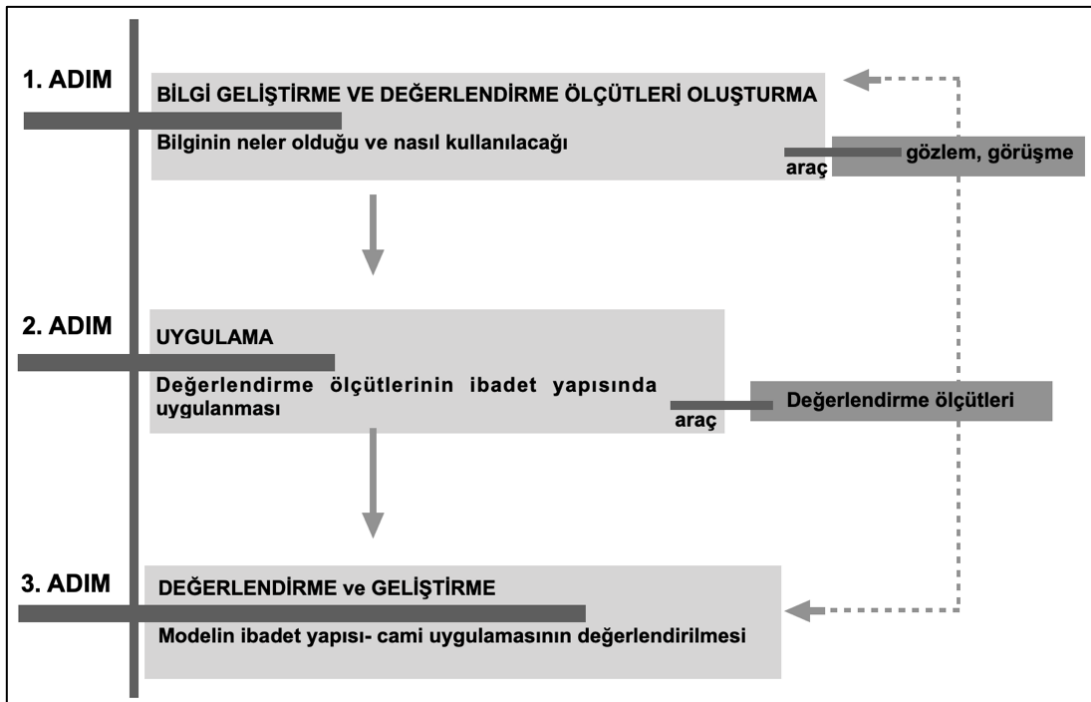
Şekil 9. Vaaz kürsüsünde ağız ve kulak mesafesi (Abdou, 2003'ten aktaran (Uysal, 2015))

Figure 9. Mouth and ear distance in the preaching chair (Abdou, 2003 cited (Uysal, 2015))

3. Materyal ve yöntem

3. Material and method

İnanç kavramının insanlığın var oluşundan beri önemi ve insanların hayatlarına etkileri bağlamında cami yapılarının mimari değeri, kentsel çevreye katkıları, özgün ve simgesel niteliklerinden ötürü; insan ve insanın fiziksel, psikolojik ve sosyal ihtiyaçlarına bağlı olarak önemli bir ilişkinin varlığına vurgu yapmaktadır. Bu vurgu bağlamında; insan ve çevresinin uyumunu inceleyen ergonomi kavramının cami yapısı tasarımında tasarımı yönlendirici etkisi, çalışma kapsamında değerli bulunmuştur. Bu değer kapsamında çalışmada; kamusal bir yapı olan Marmara İlahiyat Fakültesi Cami ergonomik değerlendirme ölçütleri bağlamında analiz edilmesi ve ibadet yapıları - ergonomi kavramı ilişkisini vurgulamak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, oluşturulan çalışma yöntemi üç adımdan oluşmaktadır (Şekil 10):



Şekil 10. Çalışmanın yöntemi

Figure 10. Method of study

Birinci Adım: Öncelikle ibadet yapıları - ergonomi ilişkisi incelenmiş, literatür çalışması yapılmıştır.

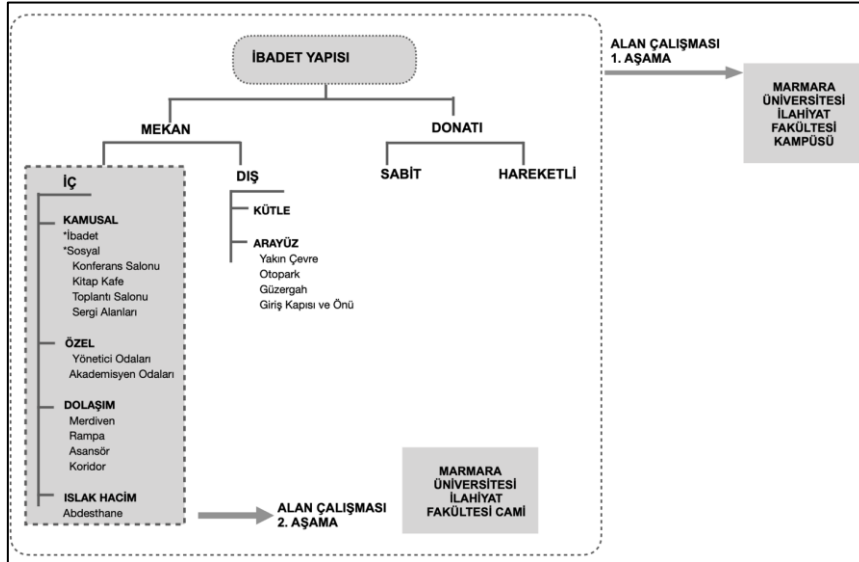
İkinci Adım: Cami yapısı tasarımında ergonomi konusunda farkındalığı arttırmak amacıyla yapılan bu çalışmada; cami yapılarında ergonomik değerlendirme ölçütleri oluşturulmuş ve örneklem olarak seçilen çağdaş cami yapısında ölçütler değerlendirilmiştir (Şekil 11). Bu değerlendirme ölçütleri; antropometrik, fiziksel, enformatik, psikolojik, davranışsal olarak beş başlık altında toplanmıştır.

İBADET YAPISI		KAMUSAL (İbadet, Sosyal) ÖZEL (Yönetici)		DOLAŞIM (Merdiven, Rampa, Asansör, Koridor) ISLAK HACİM	
ERGONOMİ					
ANTROPOMETRİK	FİZYOLOJİK	ENFORMATİK	PSİKOLOJİK	DAVRANIŞSAL	
*Mekan boyutları *Mekan donatıları *Eylem alanı sınırları *Engelli kullanımı	*Mekan iklimlendirmesi *Yapay havalandırma *Doğal havalandırma *Güneş kontrolü *Isınma *Gürültü denetimi *Mekan gürültü düzeyleri *Aydınlatma	*Bilgilendirme *Mekanda Yönelim *Mekan Algısı	*Mekan Atmosferi *Renk kullanımı *Doku kullanımı *Malzeme Seçimi *Aydınlatma *Mekanda su ögesi ve bitkilendirme	*Mahremiyet *Kişisel Alan *Sosyal Etkileşim	

Şekil 11. Değerlendirme kriterleri
Figure 11. Evaluation criteria

Üçüncü Adım: Örneklem üzerinden değerlendirme ölçütleri incelenmiştir. Değerlendirme ölçütleri kapsamında, Marmara İlahiyat Fakültesi Cami'sinin ergonomik durumu yerinde gözlem, ölçüm ve anket sonuçları ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın bu adımında, ibadet yapısı; iç ve dış mekanları ile donatı ölçeğinde değerlendirilmiştir.

Alan çalışmasının değerlendirme bölümü iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada yapı ve yakın çevresi kütle ve ara yüz olarak incelenmiş olup, ikinci aşamada yapının iç mekanı incelenmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Çalışmanın yapısı
Figure 12. Structure of the study

Değerlendirme ölçütleri incelendiğinde:

- **Antropometrik Değerlendirme Ölçütleri:** Antropometri bilim dalı, insan vücudunun boyutları, statik ve dinamik duruşlarını inceler. İnsan vücudunun ölçüsüne göre donatı ve mekan boyutlarının

optimum değerlerini oluşturulmasında antropometri kullanılır. İnsan vücudunun ölçüleri, yaşa, cinsiyete, meslek grubuna, kültürel yapıya, beslenme şekline, yaşanan iklim şartlarına, genetik faktörlere ve sağlık koşullarına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Küçükerman, 1978). Çalışmada mekan boyutlarının, hareket eylem sınırlarına uygunluğu, mekan donatılarının kullanıcılara ve eyleme uygunluğu, mekanın engelli kullanımı irdelenecektir.

- **Fizyolojik Değerlendirme Ölçütleri:** Fizyolojik değerlendirme ölçütlerini, mekanın mekanda gerçekleşen işleve göre temel ihtiyaçlarını, mekan kullanıcılarının mekandaki işleve ve eyleme göre ihtiyaçlarını karşılaması oluşturmaktadır. Fiziksel değerlendirme ölçütleri; mekan iklimlendirmesi, mekan havalandırması (doğal - yapay havalandırma), güneş kontrolü, ısınma, gürültü denetimi, mekan gürültü düzeyleri, hacim akustiği, aydınlatma (doğal aydınlatma, yapay aydınlatma) gibi faktörleri içerir. Örneğin; eğitimin gerçekleştiği bir sınıfın doğru ve yeterli aydınlatılmış olması, öğrencilerin kullanımında tehlike olmayacak şekilde pencere açılımı, pencere boyutu tercihi ve düzeni ile havalandırılması, ders esnasında konsantrasyonu bozmayacak şekilde dışarıdan gelen gürültüyü önleyecek tedbirlerin alınması ve gürültü denetiminin yapılması gereklidir.
- **Enformatik Değerlendirme Ölçütleri:** Mekani deneyimleyen kullanıcıların, mekanda yönelim eyleminde bulunmadan önce o mekan hakkında bilgisinin olması gereklidir. Bu nedenden ötürü; tasarlanan mekanların kullanıcılarda mekan algısının tam oluşması, bir ihtiyaç duymadan mekan içerisinde yönünü bulması, mekanda bilgilendirmelerin uygun elemanlarla karşılanması gerekmektedir. Örneğin bir eğitim yapısında; öğrencinin sınıfını ve eğitim yapılan diğer mekanlara en hızlı bir biçimde erişiminin sağlanmasında, mekansal tasarımlar (koridorlarda yönelim, galeri boşluğu vb.) ve bilgilendirme biçimleri (bilgilendirme tabelaları, işaretlemeler) büyük önem arz etmektedir. Enformatik konfor koşulları mekan tasarımını yönlendirip, şekillendirecek öneme sahiptir.
- **Psikolojik Değerlendirme Ölçütleri:** Bir mekanda antropometrik, fiziksel koşulların sağlanmasının yanında, kullanıcının psikolojik olarak o mekanda kendini rahat ve mutlu hissedeceği, mekanın kullanıcıya vermek istediği mesajı - atmosferi algılayacağı psikolojik konforunun da sağlanması gereklidir. Kullanıcının psikolojik konfor koşulları sağlandığında, kullanıcıda aidiyet duygusu gelişip mekanda eylemlerini rahatlıkla yapacaktır. Bir mekanın psikolojik ölçütler bağlamında değerlendirilmesinde; mekan atmosferi, mekanda kullanılan renkler, mekanda doku kullanımı, mekandaki malzeme tercihleri, mekanın aydınlatması, mekandaki su öğesi ve bitkilendirme çalışmaları önemli birer unsurdur. Mekanın psikolojik konfor koşulları oluşturulurken öncelikle mekanda gerçekleşecek eylem biçimleri ve eylemin nitelikleri, kullanıcıya verilmek istenen mesaj - atmosfer iyi analiz edilmelidir.
- **Davranışsal Değerlendirme Ölçütleri:** Birden fazla insanın eylemlerini gerçekleştirdikleri mekanlarda; mahremiyet, kişisel alan, sosyal alan davranışsal konforun öğelerini oluşturmaktadır. İnsanın varoluşundan bu yana mahremiyet, kişisel alan, sosyalleşme ihtiyaçları bulunmaktadır. İnsanlar, yaşam biçimlerine göre mekanda düzenlemeler yaparlar ve kendilerinden izleri mekana yansıtır kendi alanlarını oluştururlar. Kişisel alan kavramı, kişinin kendisi ve insanlar arasındaki mesafe olarak tanımlanabilir. Kişisel alan içerisinde kendilerini rahat, huzurlu ve güvende hissederek. O mekana karşı aidiyet duyguları oluşur. Bir insanın diğer bir insana optimum düzeyde yaklaşması ile mahremiyet sınırları oluşur. Mahremiyet kavramı ile güvenlik kavramı yakından ilişkilidir. İnsanın mekanda içerisinde eylemlerini gerçekleştirebilmesi, kendini güvende hissetmesine bağlıdır. Kendini tedirgin hisseden insan; mekanı deneyimlemeden, mekan algısı oluşmadan eylemlerini gerçekleştirip mekandan ayrılmaya eğiliminde olacaktır.

Ergonomik değerlendirme ölçütleri birbirleri ile ilişki halinde ve bu ölçütlerden bir tanesinin sağlanamaması veya bu ölçütlerin birinde eksiklik olması o mekanın ergonomik koşullarının yetersizliğine neden olmaktadır. Tüm bu değerlendirme koşulları yapı içerisinde eşit öneme sahiptir.

4. Marmara İlahiyat Fakültesi Cami ergonomik analizi

4. Marmara Faculty of Theology Mosque ergonomics analysis

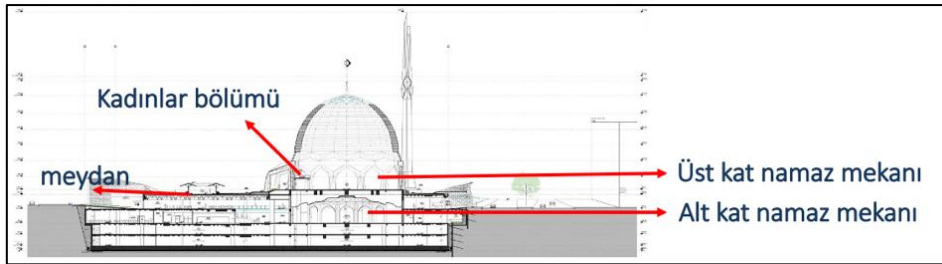
Marmara İlahiyat Fakültesi Cami, İstanbul ili Üsküdar İlçesi Bağlarbaşı Mahallesi'nde strüktürel nedenlerden ötürü 2012 yılında yıkılan caminin yerine inşa edilmiştir (Şekil 13). İnşaatı 2015 yılında biten cami 8500 metre kare kapalı alana sahip ve 4500 kişi kapasitelidir (Taşdemir & Eraslan, 2018).



Şekil 13. Marmara İlahiyat Fakültesi Cami konumu
Figure 13. Marmara Faculty of Theology Mosque location

Marmara Üniversitesinin bir bölümü olarak tasarlanan yapı sadece ibadet mekanı olarak değil; sosyal ihtiyaçlara da cevap veren bir toplanma alanıdır. Yapı içerisinde sanat galerisi, derslikler, hoca odaları, konferans salonu, kitap satış, kütüphane, kafeterya bölümleri de bulunmaktadır.

Cami aynı plan şemasına sahip iki kat olarak inşa edilmiştir. Camide meydan kotundan ulaşılan üst kat ibadet mekanı ve yeraltında bulunan alt kat ibadet mekanı yer almaktadır (Şekil 14). Yapıda iki ibadet katına da erişimi sağlayan iki ayrı giriş bulunmaktadır. Yapının içerisinde bulunan merdiven, asansörle direkt ibadet mekanları arası ilişki kurulurken, katlar arası ilişki çoğunlukla yürüyen merdivenler ile sağlanmaktadır (Şekil 15).



Şekil 14. Marmara İlahiyat Fakültesi Cami katları
Figure 14. Marmara Theology Faculty Mosque floors



Şekil 15. Marmara İlahiyat Fakültesi katlar arası erişimi sağlayan yürüyen merdivenler
Figure 15. Marmara Faculty of Theology escalators providing access between floors

Çalışmanın bu bölümünde Marmara İlahiyat Fakültesi Cami'nde; antropometrik, fizyolojik, enformatik, psikolojik ve davranışsal ölçütlerin analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerin ilk aşamasında gözlem çalışmaları yapılmış, antropometrik analiz için yerinde ölçümler tamamlanmıştır. İkinci aşamada, mekan kullanıcısı olan 35 kişi ile anket çalışması ve görüşmeler yapıp, analiz sonuçları değerlendirme kartlarına aktarılmıştır (Şekil 16).

DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTÜ	MEKAN:
	OPTIMUM DEĞER
PLAN	
GÖZLEM	ANKET SONUCU

Şekil 16. Örnek bir değerlendirme kartı
Figure 16. A sample evaluation card

Değerlendirme kartlarında yer alan optimum - ideal boyut olarak kabul edilen değerler; mekan tasarımı ve mekandaki donatılarda kabul edilen evrensel değerlerdir (Neufert, 1983). Değerlendirme kartında gözlem bölümünde, gözlemcinin mekana veya donatıya ait subjektif görüşleri yer almaktadır.

4.1. Antropometrik değerlendirme ölçütleri

4.1. Anthropometric evaluation criteria


Antropometrik analizde; yapının dış mekanında, iç mekanındaki eylem alanları, mekan boyutlarının eylemlere uygunluğu, mekandaki donatıların boyutlarının kullanıcıya uygunluğu, engelli kullanımı, mekanların engellilere uygun olarak tasarlanıp tasarlanmadığı gibi konularda incelemeler yapılmıştır.

Oluşturulan anket çalışmasında, mekanın antropometrik değerlendirilmesi ile ilgili kullanıcılara aşağıdaki sorular yöneltilmiştir:

- Ana ibadet mekanlarının boyutları hakkında fikriniz nedir? (geniş, ferah / basık, bunaltıcı / bir fikrim yok)
- Mekanda kullanılan donatılar sizce nasıl? (konforlu / konforsuz / bir fikrim yok)
- Mekanın tasarımında fiziksel engelliler düşünülmüş mü? (evet / hayır / bir fikrim yok)
- Görme engelliler yapıya kolay erişim sağlayabilir mi? (evet / hayır / bir fikrim yok)
- Yapıya kolay erişim sağlanıyor mu? (evet / hayır / bir fikrim yok)
- Yapıya girişlerde kullanılan merdivenlerin ölçüleri ve rampalarda kullanılan malzeme seçimi nasıl? (uygun / uygun değil / bir fikrim yok)
- Ana ibadet mekanında namaz kılma eyleminde, kullanıcılara uygun büyüklükte alan düşüyor mu? (evet / hayır / bir fikrim yok)
- Abdesthanede kullanılan donatıların boyutları uygun mu? (uygun / uygun değil / bir fikrim yok)
- İbadet mekanlarının içinde yer alan ve ibadet mekanları arasında erişimi sağlayan merdivenlerin ölçüleri yeterli mi? (evet / hayır / bir fikrim yok)

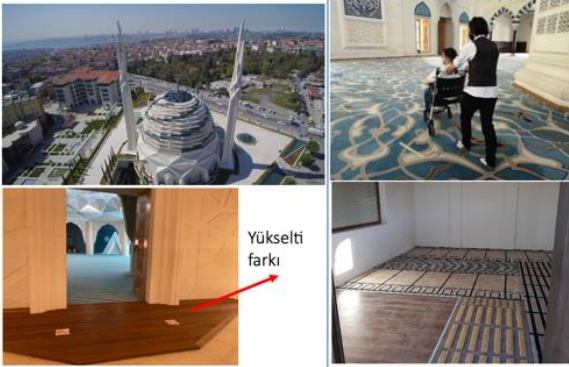
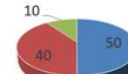
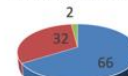
Antropometrik analiz çalışmaları:

- İbadet yapısına ana girişin sağlandığı caddenin bulunduğu hiza (kot) ile yapının girişinin bulunduğu hiza (kot) aynı değildir. Yol, yapı giriş hizasının üstünde yer almaktadır. İbadet yapısının çevresine girişte merdiven ve rampa bulunmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda merdiven boyutlarının yeterli olduğu, eriyen rampanın genişliğinin kamusal bir alanda yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 17).

ANTROPOMETRİK DEĞERLENDİRME	MEKAN: ARA YÜZ –YAKIN ÇEVRE
 <p>a- Riht yüksekliği:16 cm b-Basamak genişliği: 32 cm c- Merdiven kol genişliği: 1400 cm</p> <p>Rampa Genişliği:120 cm Rampa Eğimi: %7</p>	 <p>a- Riht yüksekliği:16 cm b-Basamak genişliği: 32 cm Rampa eğimi: %5-%8 arasında olmalı</p>
<p>PLAN</p> <p>Rampanın yağmurda ve karda kayganlık oluşturmayan, kolay yürüme olanağı sunan ergonomik bir yaklaşıma sahip olması beklenir. Rampanın genişliği 120 cm yetersiz bulunmuştur. Rampa güvenli bir kullanım sağladığı ve ergonomik açıdan uygun olduğu söylenebilir.</p>	<p>OPTİMUM DEĞER</p> <p>Yapıya kolay erişim sağlanıyor mu? (evet/ hayır/ bir fikrim yok)</p>  <p>■ evet ■ hayır ■ bir fikrim yok</p>
<p>GÖZLEM</p>	<p>ANKET SONUCU</p>

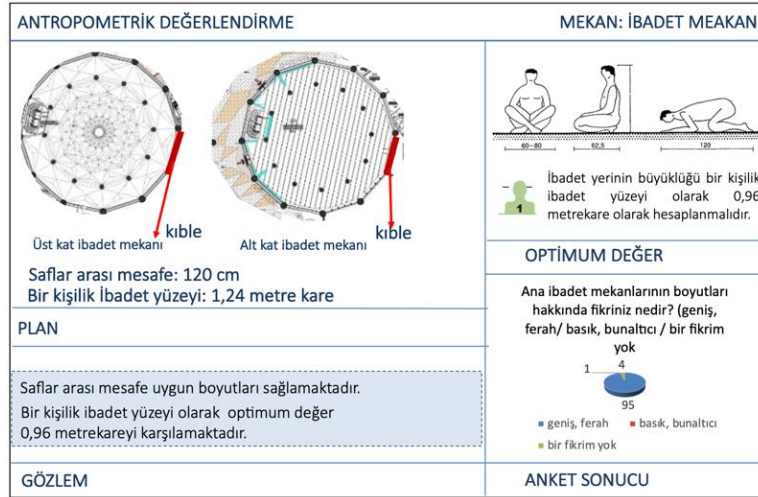
Şekil 17. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 1
Figure 17. Anthropometric analysis evaluation card 1

- İbadet yapılarının kamusal bir alan olması bağlamında, her kullanıcının her mekana erişim sağlayabilmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda, görme engelli bireylerin mekanlar arası yönlendiği, duyması mümkün yüzeylerin varlığı ile kolaylaşmaktadır. Ancak ibadet yapısına erişimi sağlayan güzergahlarda, bu yüzey tasarımlarına yer verilmemiştir. İbadet yapılarının iç mekanlarında duyması mümkün halı uygulamaları da yapılan literatür çalışmalarında incelenmiştir (Çınar vd., 2015). İncelenen örneklerde; işitme engelli bireylerin ibadet yapılarını kullanmaları için, frekans organizasyonu ya da cemaat ile namaz kılınırken cemaati takip edebilmeleri için ışıklı uyarı sistemlerinden faydalandığı görülmüştür. Fiziksel engellilerin ibadet mekanını kullanımında alınan yaklaşımlar; tekerlekli sandalye ile camiye girmek isteyen bireyler için görevliler tarafından tekerlekleri temiz yeni sandalyeler getirilmesi şeklindedir (Koçak & Özdemir, 2021). Engelli bireye herhangi bir yardım olmadan, bireyin kendi başına hareket olanağının sağlanabileceği düzenlemeler yapılabilmektedir. İncelenen ibadet yapısında, yapı içi mekanlara erişimde fiziksel engelliler için herhangi bir sorun olmazken, görme engelliler için herhangi bir önlem alınmamıştır. İbadet mekanı içerisinde ise; fiziksel, görme ve işitsel engellilerin mekan kullanımında sorunlar bulunmaktadır. İbadet mekanının tasarımında engelliler düşünülmemiştir (Şekil 19).

ANTROPOMETRİK DEĞERLENDİRME	MEKAN: ARA YÜZ –İÇ MEKAN
 <p>Yükselti farkı</p>	<p>Mekanın tasarımında görme engelliler düşünülmüş mü? (evet/ hayır/ bir fikrim yok)</p>  <p>■ evet ■ hayır ■ bir fikrim yok</p> <p>Mekanın tasarımında fiziksel engelliler düşünülmüş mü? (evet/ hayır/ bir fikrim yok)</p>  <p>■ evet ■ hayır ■ bir fikrim yok</p>
<p>FOTOĞRAF</p> <p>OPTİMUM UYGULAMALAR</p> <p>İbadet yapısının tasarımında fiziksel engellilerin yapıya erişimi düşünülmüş ama ibadet mekanını kullanımı tasarlanmamıştır. Yapıda görme engelliler ve işitme engelliler için çözüm bulunmamaktadır.</p>	<p>ANKET SONUCU</p>
<p>GÖZLEM</p>	

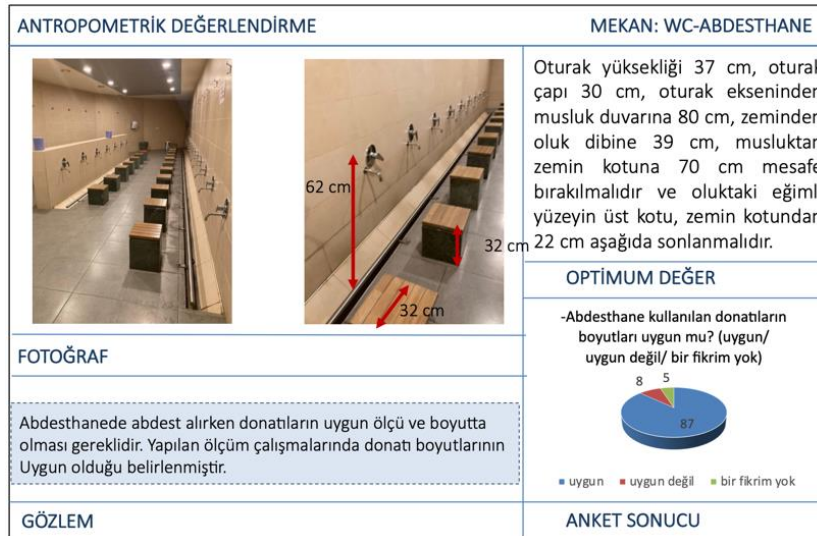
Şekil 19. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 3
Figure 19. Anthropometric analysis evaluation card 3

- Cami yapısının mekansal tasarımında, boyutların belirlenmesi temel olarak ibadetin nasıl yapıldığına - hareket biçimlerine göre oluşmaktadır. Bir cami yapısında ibadet fonksiyonunun cemaat açısından iki ana biçimi vardır. Namaz pozisyonu olarak adlandırılan ilk biçim; kişinin bireysel ya da cemaat içinde namaz kılariken alması gereken pozisyonudur. Cemaat kible duvarına paralel olacak şekilde yaklaşık 120 cm. aralıklarla imamın arkasında saf oluşturacak şekilde durur. Saflar arasındaki mesafe, camilerde çoğunlukla zemin kaplaması olan halı üzerinde çizgiler ile belirtilmektedir. Namaz esnasında; cemaat kıyam (ayakta durma), rüku (öne eğilme), secde (yüz üstü yere kapanma) ve kade - i ahire (oturuş) namaz hareketlerini gerçekleştirir. Bu hareketler sırasında ibadet yüzeyi oluşmaktadır. Camide ibadet eden bir kişi için minimum 0,96 metrekare alan gereklidir. İncelenen ibadet mekanında, kişi başına düşen yüzey alanı ile saflar arası mesafeler bu ölçülere uygundur. Kullanıcılar da ankette caminin boyutlarının yeterli olduğunu; ibadet mekanını geniş, ferah olarak nitelendirmişlerdir (Şekil 20).



Şekil 20. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 4
Figure 20. Anthropometric analysis evaluation card 4

- Yapılan literatür çalışmalarında, Diyanet İşleri Başkanlığı İnşaat ve Emlak Dairesi'nin cami tasarımında abdesthane, şadırvan gibi yapıların antropometrik optimum değerleri hakkında günümüze kadar devlet tarafından herhangi bir kriter - ölçü sistemi oluşturulmamıştır. Literatürde sadece bireysel araştırmacıların yaptığı ölçüm ve hesaplamalara ait bilimsel çalışmalar bulunmaktadır (Ulusoy & Köymen, 2022) (Şekil 21).



Şekil 21. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 5
Figure 21. Anthropometric analysis evaluation card 5

- İbadet yapısının wc - abdesthane tasarımında temiz zemin - kirli zemin ayrımı gözetilmiştir. Abdest alınacak alan ile lavabo ve kabinlerin bulunduğu alan, tuvalet içinde mekansal olarak ayrılmıştır. Lavaboların antropometrik ölçüleri kullanım için uygunken, kabinlerin kapılarının boyutları uygun değildir (Şekil 22).



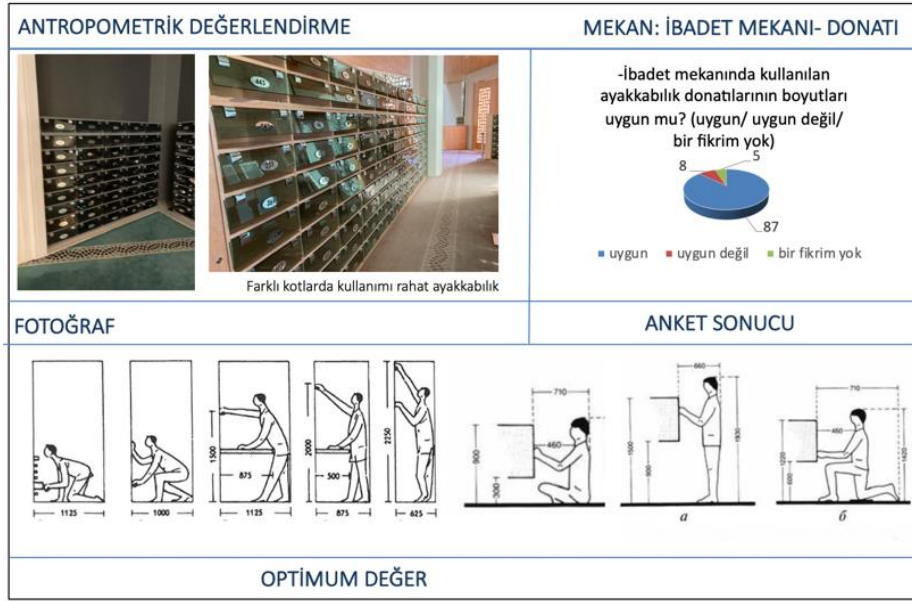
Şekil 22. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 6
Figure 22. Anthropometric analysis evaluation card 6

- Engelli kabinleri bay - bayan tuvaletlerinin içerisinde yer almaktadır. Kabinlerin boyutları yeterli olmakla beraber, donatıların mekandaki yerleşimi sorunludur. Kabin içerisinde yer alan tutunma barı sadece bir adet olup, sayısı engelli kabin düzenlemesine göre yetersiz bulunmuştur. Kabin içerisindeki hareketli donatı olarak kabul edilen çöp kovasının konulduğu yer engellilerin hareketini kısıtlamaktadır. Ayrıca kabinlerin kapıları engelli kullanımına uygun değildir (Şekil 23).



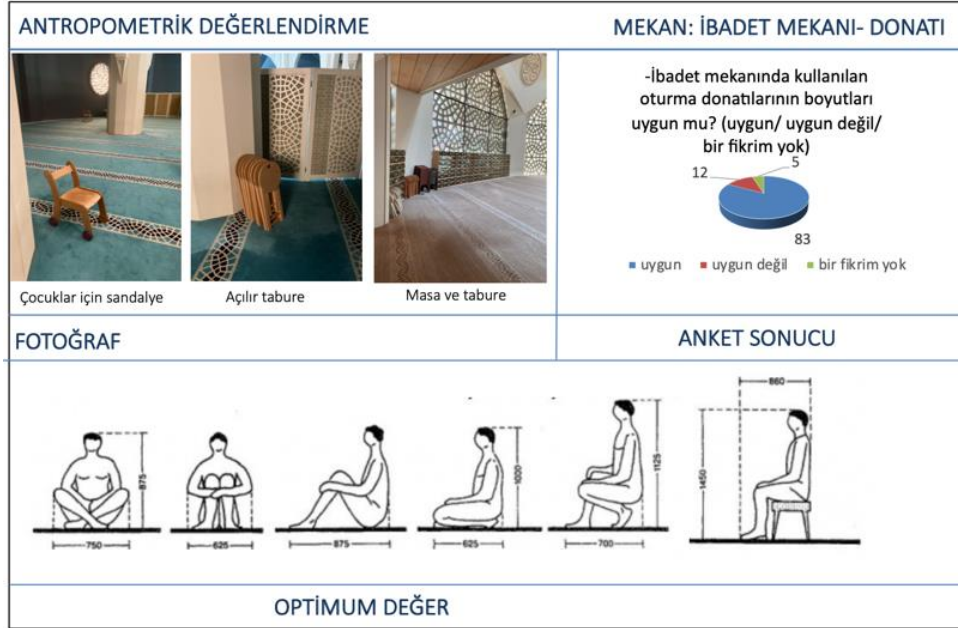
Şekil 23. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 7
Figure 23. Anthropometric analysis evaluation card 7

- İbadet mekanı içerisinde kullanılan ayakkabılık donatısının mekan ile ilişkisi doğru düzenlenmiştir. Kullanılan donatı çeşidi insan boyutlarına göre tasarlanmış olup, kullanıcıların boyları geniş bir aralıkta yer almaktadır (Şekil 24). Ayrıca donatının üzerinde yer alan numaralandırma sistemi ile enformatik analiz yönünden de olumlu bulunmuştur.



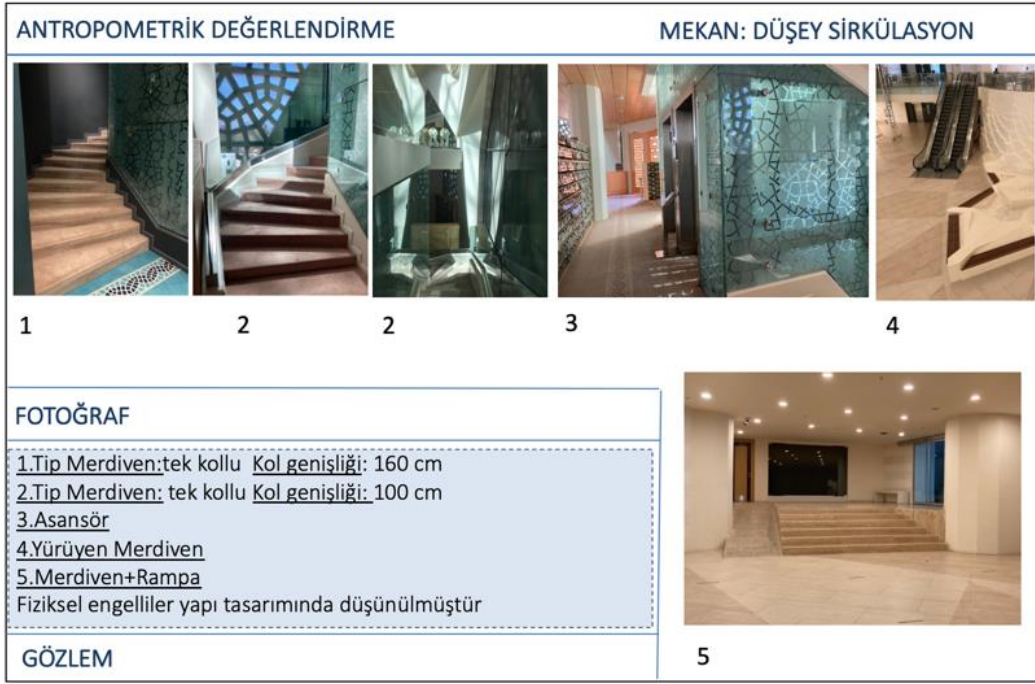
Şekil 24. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 8
Figure 24. Anthropometric analysis evaluation card 8

- İbadet mekanı içerisinde çocukların, yetişkinlerin kullanabileceği tabure ve masalar bulunmaktadır. Bu donatılar hareketli olup kullanıcının ihtiyacına göre mekan içerisinde konumlanmaktadır. Yapılan anket çalışmalarında, kullanıcılar bu donatıları konforlu bulduklarını belirtmişlerdir (Şekil 25).



Şekil 25. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 9
Figure 25. Anthropometric analysis evaluation card 9

- Yapıda katlar arası erişimi sağlayan merdiven, asansör, yürüyen merdiven, rampa bulunmaktadır. Yürüyen merdivenler yapının içerisinde katlar arası erişimi sağlamaktadır. Üst kat ibadet mekanı ve alt kat ibadet mekanı arasındaki erişim, mekan içerisinden merdiven ve asansörler ile gerçekleşmektedir. Alt kat ibadet mekanı üst kat ibadet mekanına bağlayan merdivenin kol genişliği 160 cm. olup kamusal alanlarda tek kollu merdivenlerin kol genişliğinin minimum 150 cm. olması şartını sağlamaktadır. Üst kat ibadet mekanı kadınlar bölümüne bağlayan merdivenin kol genişliği 100 cm.'dir. Tek kollu merdivenlerin kol genişliğinin minimum 150 cm. olması şartını sağlamamaktadır (Şekil 26).



Şekil 26. Antropometrik analiz değerlendirme kartı 10
Figure 26. Anthropometric analysis evaluation card 10

4.2. Fizyolojik değerlendirme ölçütleri

4.2. Physiological evaluation criteria

Fizyolojik analizde; mekan iklimlendirmesi, mekandaki sıcaklık değeri, yapay - doğal havalandırma, güneş kontrolü, gürültü denetimi, mekandaki gürültü düzeylerine ait incelemeler yapılmıştır. Anket çalışmasında fizyolojik analiz ile ilgili aşağıdaki sorular kullanıcılara sorulmuştur:

- Ana ibadet mekanın gürültü seviyesi hakkında ne söyleyebilirsiniz? (gürültülü / gürültülü değil / bir fikrim yok)
- Ana ibadet mekanında namaz sırasında, hutbe ve vaazlarda mekanın akustiği nasıl? (iyi - söylenenler anlaşılıyor / kötü- söylenenler anlaşılmıyor / bir fikrim yok)
- Mekandaki doğal aydınlatma düzeyini nasıl değerlendirirsiniz? (yeterli / yeterli değil / bir fikrim yok)
- Mekandaki yapay aydınlatmalar yeterli düzeyde mi? (yeterli / yeterli değil / bir fikrim yok)
- Mekanın sıcaklığı uygun düzeyde mi? (uygun / uygun değil / bir fikrim yok)

Fizyolojik analiz çalışmaları:

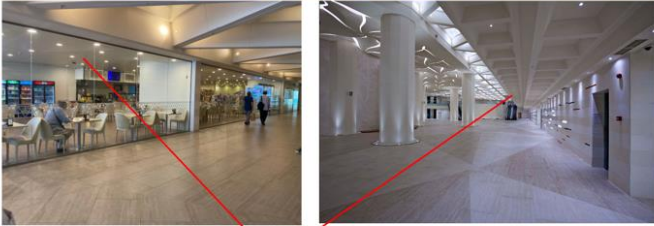

- Yapının ara yüz mekanı incelendiğinde dış mekanda güneş kontrolü sağlanmamıştır. Yapının dış mekanda tasarımında güneşten korunma elemanı sadece yapının girişindeki saçaktır. Bu saçak altındaki alan da insanların vakit geçirmelerine, oturmalarına uygun değildir. Şadırvanın üst örtü malzemesinde de cam yüzeylerin kullanımı şadırvan mekanda rahatsız edici olmaktadır. Yapılan anket çalışmaları da gözlemleri desteklemektedir (Şekil 27).
- Yapının iç mekânlarında doğal ışık kaynağı kullanımı incelendiğinde; doğal ışıktan maksimum düzeyde yararlanılmaktadır. Doğal ışık, yapının belirli bölgelerinde açılan çatı ışıklıkları sayesinde iç mekanda kullanılmaktadır (Şekil 28).
- Yapının iç mekânlarında farklı türde yapay aydınlatma biçimleri kullanılmıştır. Farklı türde yapay aydınlatma biçimlerinin kullanımı, farklı işlevlerde mekânların olması ile açıklanabilir. Işık, mekânlarda homojen bir biçimde dağılmaktadır. Kullanıcılar yapay aydınlatma düzeylerinin yeterli olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 29).

FİZYOLOJİK DEĞERLENDİRME		MEKAN: ARAYÜZ	
			
<p>FOTOĞRAF</p> <p>Cami açık alanlarında yer alan oturma öğeleri, gölgelik alan tasarımı yapılmamıştır. Sadece açık alanda şadırvanın üstünde cam malzemeden yapılmış şeffaf örtü mevcuttur. Bu durum, özellikle yaz aylarında güneşten korunarak bir dinlenme imkânı sunmaması olumsuz görülmüştür.</p>		<p>-Dış mekanda güneş kontrolü yeterli mi? (evet/hayır/bir fikrim yok)</p>  <p>■ evet ■ hayır ■ bir fikrim yok</p>	
<p>GÖZLEM</p>		<p>ANKET SONUCU</p>	

Şekil 27. Fizyolojik analiz değerlendirme kartı 1
Figure 27. Physiological analysis evaluation card 1

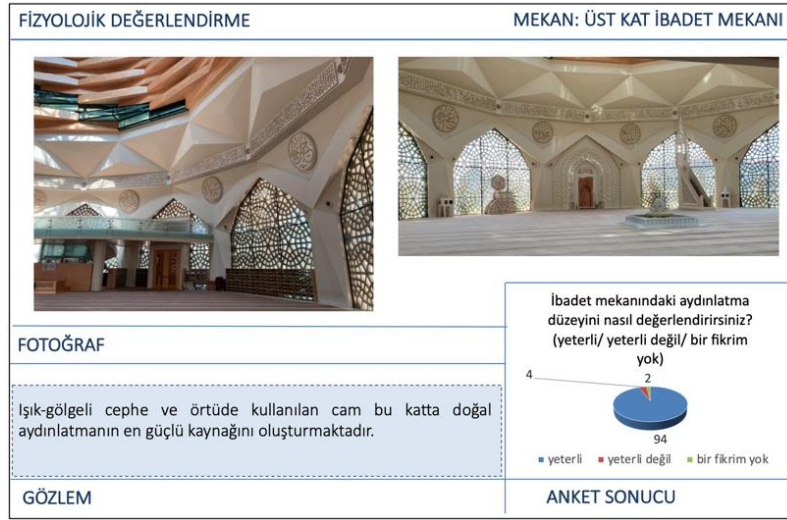
FİZYOLOJİK DEĞERLENDİRME		MEKAN: İÇ MEKAN	
			
<p>FOTOĞRAF</p> <p>Doğal ışıktan yapıda maksimum düzeyde yararlanırlar. Doğal ışığı yapı bahçe tarafına bakan camlı şeffaf yüzeyinden almaktadır. Ayrıca yapının içerisinde çatı ışıkları kullanılmıştır.</p>		<p>Mekandaki doğal aydınlatma düzeyini nasıl değerlendirirsiniz? (yeterli/ yeterli değil/ bir fikrim yok)</p>  <p>■ yeterli ■ yeterli değil ■ bir fikrim yok</p>	
<p>GÖZLEM</p>		<p>ANKET SONUCU</p>	

Şekil 28. Fizyolojik analiz değerlendirme kartı 2
Figure 28. Physiological analysis evaluation card 2

FİZYOLOJİK DEĞERLENDİRME		MEKAN: İÇ MEKAN	
			
<p>FOTOĞRAF</p> <p>Yapıda mekanlar tek yönlü yerleştirilmiştir. Yapay aydınlatmaların aydınlatma düzeyi yeterlidir. Işık mekana homojen bir şekilde dağılmıştır.</p>		<p>Mekandaki yapay aydınlatma düzeyini nasıl değerlendirirsiniz? (yeterli/ yeterli değil/ bir fikrim yok)</p>  <p>■ yeterli ■ yeterli değil ■ bir fikrim yok</p>	
<p>GÖZLEM</p>		<p>ANKET SONUCU</p>	

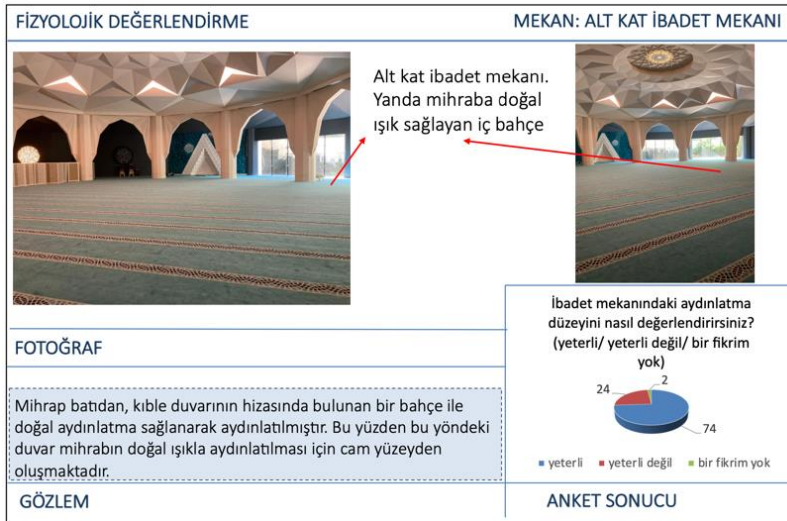
Şekil 29. Fizyolojik analiz değerlendirme kartı 3
Figure 29. Physiological analysis evaluation card 3

- Üst kat ana ibadet mekanında şeffaf yüzeylerin dağılımı, kapalı yüzeylerin dağılımından daha büyüktür. Işık bu mekanın oluşmasında bir öge görevini üstlenmiştir. Işık ve gölgeli alanların varlığı ile mekanın atmosferi oluşmaktadır (Şekil 30).



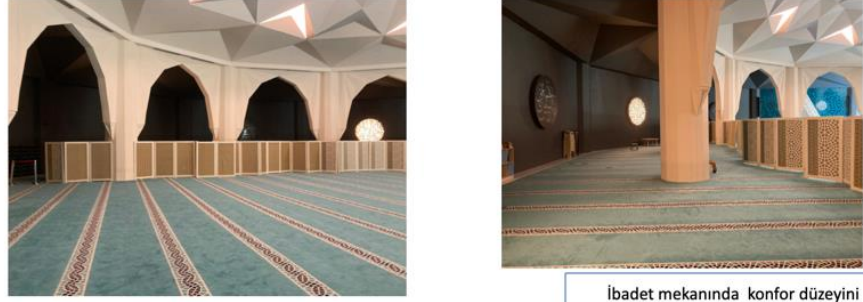

Şekil 30. Fizyolojik analiz değerlendirme kartı 4
Figure 30. Physiological analysis evaluation card 4

- Alt kat ibadet mekanında, doğal aydınlatmadan iç bahçeden sınırlı seviyede yararlanılmaktadır. Mekanın genel aydınlatmasında yapay aydınlatmadan faydalanılmaktadır. Kullanıcılar yapay aydınlatma düzeyini yeterli bulmuşlardır (Şekil 31).



Şekil 31. Fizyolojik analiz değerlendirme kartı 5
Figure 31. Physiological analysis evaluation card 5



- Alt kat ibadet mekanı analiz edildiğinde; mekanın paravanla bölünmesi mekansal konfor sorunlarına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu mekanda sınırlayıcı ögenin paravan olması, kullanıcıların cemaatten ve imamdan ayrılmasına, görsel takibin sağlanamamasına neden olmaktadır (Şekil 32). Cami içerisinde namaz vaktinde yapılan gözlem ve deneyim sonrasında, hacim içerisinde ses yankısının olduğu gözlemlenmiş ve konuşmaların anlaşılabilmesinde zorluklar yaşanmıştır. Harim bölümünde yapılan ölçümler sonucunda ses düzeyi 65 dB ölçülmüştür. Diyanet İşleri Başkanlığının Cami Planlama ve Tasarım Kılavuzunda cami içi ortalama ses düzeyinin 60-70 dB arasında olması gerektiği belirtilmiştir (Diyanet İşleri Başkanlığı, 2010).

FİZYOLOJİK DEĞERLENDİRME	MEKAN: ALT KAT İBADET MEKANI KADINLAR BÖLÜMÜ
	
FOTOĞRAF	
<p>Kadınlar bölümünün paravanla ayrılması kadın kullanıcıların imami görememeleri, mekan algılarının oluşmaması, kişisel alanda konfor şartlarının sağlanamamasına neden olmaktadır.</p>	
GÖZLEM	<p>İbadet mekanında konfor düzeyini nasıl değerlendirirsiniz? (yeterli/ yeterli değil/ bir fikrim yok)</p>  <p>■ yeterli ■ yeterli değil ■ bir fikrim yok</p>
	ANKET SONUCU

Şekil 32. Fizyolojik analiz değerlendirme kartı 6

Figure 32. Physiological analysis evaluation card 6

- İbadet yapısının yapım sisteminde kabuk sistem kullanılmıştır. Yapı kabuğunda, cam yüzeylerin üst kenarlarında bulunan borular ile taşınımlı mekanik iklimlendirme sistemi mevcuttur. Yapıda kullanılan cam yüzeylerin altında mekandaki kirli havayı emen havalandırma sisteminin ızgaraları bulunmaktadır. Yapı içerisinde yapay iklimlendirme sistemleri kullanılmıştır. İbadet mekanının içerisinde, yer döşemesi olan halı yüzeylerinde sensör sistemler bulunmaktadır ve böylece mekanın aktif kullanım zamanlarında istenilen sıcaklık değerleri sağlanırken; istenmeyen zamanlarda sistem pasif moda geçmektedir. Alttan ısıtma sistemi ile farklı günlerdeki veya farklı namaz vakitlerindeki kullanıcı sayısına göre, harim bölgesinde bölümler oluşturularak yoğunluğa göre çalıştırılma imkanı yer almaktadır. Ayrıca, Cuma günü kapı hareketlerinin ve iç - dış mekan arasındaki sirkülasyonun fazla olması nedeniyle rüzgarın çok olduğu günlerde iç ortamda hava hareketi fazla olmaktadır (Şekil 33).

FİZİKSEL DEĞERLENDİRME	MEKAN: ALT- ÜST İBADET MEKANI
 <p>Isıtma-soğutma sistemi elamanları</p> <p>Büyük ve Geniş Cam Yüzeyler</p> <p>Isıtma-soğutma sistemi elamanları</p> <p>Temiz hava sistemi ızgaraları</p>	
FOTOĞRAF	
<p>Yapı yüzeyindeki büyük ve geniş cam yüzeyler güneş ışınlarının mekânın orta kesimlerine kadar ilerlemesine olanak sağlamaktadır. Büyük cam yüzeyler yaz mevsiminde kullanıcıların doğrudan güneş ışınları almasına da neden olmaktadır. Camideki pencere sistemi, iç ortamın doğal havalandırılmasına yardımcı olamamaktadır.</p>	<p>- Mekanın sıcaklığı uygun düzeyde mi? (uygun/ uygun değil/ bir fikrim yok)</p>  <p>■ uygun ■ uygun değil ■ bir fikrim yok</p>
GÖZLEM	ANKET SONUCU

Şekil 33. Fizyolojik analiz değerlendirme kartı 7

Figure 33. Physiological analysis evaluation card 7

4.3. Enformatik değerlendirme ölçütleri

4.3. Informatics evaluation criteria

Enformatik analizde; mekanda bilgilendirme levhalarının yeterli olup olmadığı, mekanda yönelimin sağlanıp sağlanmadığı, mekan algısının oluşup oluşmadığı, mekandaki işlev ve kullanımlara ait yönlendirmenin varlığına dair incelemeler yapılmıştır. Anket çalışmasında enformatik analiz ile ilgili aşağıdaki sorular kullanıcılara yöneltilmiştir:

- Mekanda yapı ile bilgilendirme, yapının tarihçesi ile ilgili herhangi bir bilgilendirme levhasını algıladınız mı? (evet / hayır / bir bilğim yok)
- Mekanda yönünüzü, diğer mekanları rahat bulabiliyor musunuz? (evet / hayır / bir bilğim yok)
- Alt kat ibadet mekanı kadınlar bölümünden mekanı algılaya biliyor musunuz? (evet / hayır / bir bilğim yok)

Yapılan anket ve yerinde gözlem çalışmaları sonucunda;

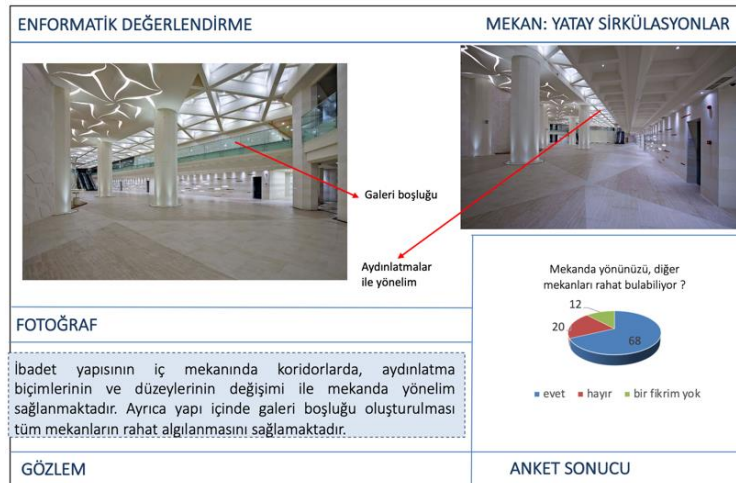
- İbadet yapısının kütesinin dış mekan bilgilendirmesinde, yapının kentten algılamasında bir sorun oluşmamaktadır (Şekil 34).



Şekil 34. Enformatik analiz değerlendirme kartı 1

Figure 34. Informatics analysis evaluation card 1

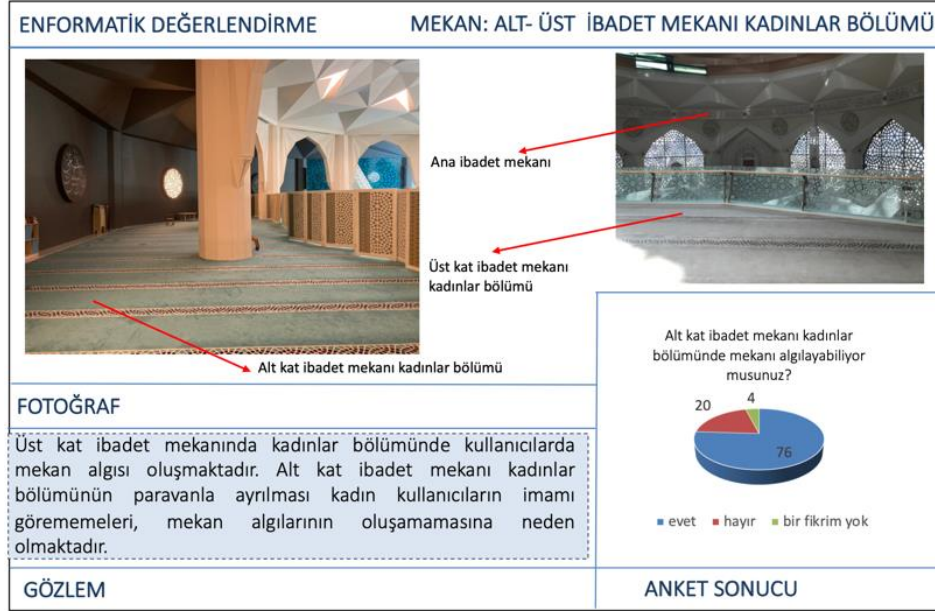
- Yapıyı deneyimleyen kişinin, mekan içerisinde yönelimini sağlamak amacıyla mekanda uygun tasarım stratejileri oluşturulmuştur. İbadet yapısının iç mekanı, koridorları incelendiğinde; mekanda kullanıcının yönelimi, aydınlatma elemanları ve galeri boşluğundan kullanıcıların tüm mekanı algılamaları ile sağlanmaktadır (Şekil 35).



Şekil 35. Enformatik analiz değerlendirme kartı 2

Figure 35. Informatics analysis evaluation card 2

- Yapı içerisinde ibadet mekanları; üst kat ibadet mekanı ve alt kat ibadet mekanı olarak iki ayrı katta bulunmaktadır. Üst kat ibadet mekanında kadınlar bölümü, erkekler bölümünden asma kat ile ayrılmıştır. Üst kat kadınlar bölümünde mekan algısının oluşmasında sorun oluşmamaktadır. Alt kat ibadet mekanında kadınlar bölümünün erkekler bölümünden mahremiyet amaçlı ayrılması yapının tasarım aşamasında düşünülmemiştir. Kadınlar bölümü ana mekandan paravanla ayrılmaktadır. Bu alan içerisinde ibadetlerini gerçekleştiren kullanıcılarda mekan algısı oluşamamakta veya zayıf bir biçimde oluşmaktadır. Yapılan anket sonucunda kullanıcılar bu durumdan şikayetlerini belirtmemişlerdir (Şekil 36).



Şekil 36. Enformatik analiz değerlendirme kartı 3
Figure 36. Informatics analysis evaluation card 3

4.4. Psikolojik değerlendirme ölçütleri


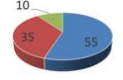
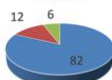
4.4. Psychological evaluation criteria

Psikolojik analizde; mekan atmosferi, mekanda renk kullanımı, mekanda doku kullanımı, malzeme seçimi, mekanda ışık, mekanda su ögesi ve bitkilendirmenin mekan deneyimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Anket çalışmasında;

- Mekanda kullanılan renk tercihi sizce uygun mudur? (uygun / uygun değil / bir fikrim yok)
- Mekanda kullanılan su ögesi sizce yeterli midir? (yeterli / yeterli değil / bir fikrim yok)
- Mekanda kullanılan bitkilendirme yeterli midir? (yeterli / yeterli değil / bir fikrim yok)
- Mekandaki ışık sizce bu mekânın atmosferini oluşturmada uygun mudur? (uygun / uygun değil / bir fikrim yok)
- Mekanda dikkatinizi çeken yapı unsuru var mı? Varsa belirtiniz.


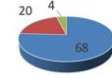

Yapılan anket ve yerinde gözlem çalışmaları sonucunda;

- Mekanda bitkilendirme çalışmaları çok az sayıda yapılmıştır. Sadece alt kat ibadet mekanında yer alan iç bahçe ile görsel temas kurulabilmektedir. Yapının içinde koridorlarda su ögesi olarak yapay şelale mevcuttur. Üst kat ibadet mekanı içerisinde şadırvan bulunmaktadır. Bu su ögeleri belirli zamanlarda çalıştırılmaktadır. Kullanıcılarla yapılan anket çalışması sonucunda; mekânın atmosferini mekânın işlevine uygun bulmuşlardır (Şekil 37).
- Ana ibadet mekanı içerisinde su ögesi kullanımı mevcuttur. Böylece mekan kullanıcılarında rahatlama, huzur, sakinlik hisleri oluşmaktadır. Ana ibadet mekânının üst örtü sisteminde kubbe kullanılmıştır. Kubbede ahşap, cam yüzeylere yer verilmiş olup sarmal yapıdadır. Bu düzen ile kullanıcılarda, evrenin sonsuzluğu algısını oluşturduğu yapılan anket çalışmalarından çıkarılmıştır. Kullanıcılar mekândaki renk, doku kullanımının uygun olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 38).

PSİKOLOJİK DEĞERLENDİRME		MEKAN: YATAY SİRKÜLASYONLAR-ALT KAT İBADET MEKANI	
 <p>İç bahçe Mekanda su ögesi kullanımı</p>		<p>-Mekanda kullanılan bitkilendirme sizce yeterli midir? (yeterli/ yeterli değil/bir fikrim yok)</p>  <p>■ yeterli ■ yeterli değil ■ bir fikrim yok</p> <p>Mekandaki ışık sizce bu mekanın atmosferini oluşturmada uygun mudur?</p>  <p>■ evet ■ hayır ■ bir fikrim yok</p>	
FOTOĞRAF			
<p>İbadet yapısının koridorlarında yürüyen merdivenler ile ilişkili su ögesi kullanımı mevcuttur. Yapıda bitkilendirme sadece alt kat ibadet mekanının mihrap duvarına bitişik konumlanan iç bahçede mevcuttur. İç bahçe ile görsel temas vardır.</p>			
GÖZLEM		ANKET SONUCU	

Şekil 37. Psikolojik analiz değerlendirme kartı 1

Figure 37. Psychological analysis evaluation card 1

PSİKOLOJİK DEĞERLENDİRME		MEKAN: ANA İBADET MEKANI	
 <p>Mekanda su ögesi kullanımı</p>		<p>-Mekanda kullanılan su ögesi sizce yeterli midir? (yeterli/ yeterli değil/bir fikrim yok)</p>  <p>■ yeterli ■ yeterli değil ■ bir fikrim yok</p> <p>-Mekanda kullanılan renk tercihi sizce uygun mudur? (uygun/uygun değil/bir fikrim yok)</p>  <p>■ evet ■ hayır ■ bir fikrim yok</p>	
FOTOĞRAF			
<p>Ana ibadet mekanında farklı malzeme-doku-renk kullanımı mevcuttur. İbadet mekanının üst örtüsü kubbeye şeffaf yüzeyin kullanılması mekanın atmosferini etkilemiştir.</p>			
GÖZLEM		ANKET SONUCU	

Şekil 38. Psikolojik analiz değerlendirme kartı 2

Figure 38. Psychological analysis evaluation card 2

4.5. Davranışsal değerlendirme ölçütleri

4.5. Behavioral evaluation criteria

Davranışsal analizde, iç mekandaki ve dış mekandaki mahremiyet, kişisel alan, sosyal etkileşim kavramları sorgulanmıştır. Mekan içerisinde ve dışarısında kullanıcıların kendilerini güvende hissettikleri tek başlarına veya birlikte zaman geçirebilecekleri mekansal çeşitliliklerin olup olmadığı, eğer mekansal çeşitlilik var ise bu mekanların konfor koşullarını sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir.

Anket çalışmasında;

-Mekanda sosyalleşebileceğiniz alanlar yeterli mi? (evet / hayır/ bir fikrim yok)

-Dış mekanda sosyalleşebileceğiniz alanlar yeterli mi? (evet / hayır / bir fikrim yok) soruları sorulmuştur.

- Yapının iç mekanında kullanıcıların birlikte vakit geçirebileceği, farklı işlevlerde sosyalleşme mekanı mevcuttur. Yapının tasarımında kişisel alan ve mahremiyet de göz önüne alınmış olup mekamlarda kullanıcılar yalnız başlarına vakit geçirebilmektedirler. Yapılan ankete göre kullanıcılar yapının sosyalleşmeye uygun olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 39).

DAVRANIŞSAL DEĞERLENDİRME	MEKAN: İÇ MEKAN								
									
FOTOĞRAF									
<p>Yapının içerisinde insanların sosyalleşebileceği, sergi salonu, konferans salonu ,kafeterya gibi mekanlar tasarlanmıştır. Ayrıca insanların kişisel alan oluşturabilecekleri , bireysel olarak mekanı kullanabilecekleri alanlar da mevcuttur.</p>	<p>-Mekanda sosyalleşebileceğiniz alanlar yeterli mi? (evet/hayır/bir fikrim yok)</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Kategori</th> <th>Oran (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>evet</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>hayır</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>bir fikrim yok</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	Kategori	Oran (%)	evet	90	hayır	5	bir fikrim yok	5
Kategori	Oran (%)								
evet	90								
hayır	5								
bir fikrim yok	5								
GÖZLEM	ANKET SONUCU								

Şekil 39. Davranışsal analiz değerlendirme kartı 1
Figure 39. Behavioral analysis evaluation card 1

- Yapının ara yüz mekanında (kütle-dış mekan) kullanıcıların oturup, dinlenebileceği, birlikte vakit geçirip sosyalleşebilecekleri alan tasarımı yoktur. Ara yüzde gölgelikli alan tasarımı hiç düşünülmemiştir. Kullanıcılarla yapılan anket çalışmasında kullanıcılar bu sorunu belirtmişlerdir (Şekil 40).

DAVRANIŞSAL DEĞERLENDİRME	MEKAN: ARAYÜZ								
									
FOTOĞRAF									
<p>Kentin yıllık sıcaklık ortalamaları ve güneşli gün sayısı ve cenaze namazları göz önünde bulundurulduğunda, açık alandatermal konfor oluşumu ve insanların sosyalleşebilmeleri için özellikle yaz aylarında gölgeliğin güneş kontrolü sağlaması beklenmektedir. Yapının dış mekanında gölgelik alan tasarımı hiç tasarlanmamışken ve oturma alanı çok az sayıdadır.</p>	<p>-Dış mekanda sosyalleşebileceğiniz alanlar yeterli mi? (evet/hayır/bir fikrim yok)</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Kategori</th> <th>Oran (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>evet</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>hayır</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>bir fikrim yok</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	Kategori	Oran (%)	evet	10	hayır	75	bir fikrim yok	10
Kategori	Oran (%)								
evet	10								
hayır	75								
bir fikrim yok	10								
GÖZLEM	ANKET SONUCU								

Şekil 40. Davranışsal analiz değerlendirme kartı 2
Figure 40. Behavioral analysis evaluation card 2

5. Tartışma

5. Discussion

Mekandaki gözlem çalışmaları, kullanıcılarla yapılan anket ve görüşmeler sonucunda; ibadet yapısının ergonomik açıdan uygunluğu analiz edilmeye çalışılmıştır. İbadet yapılarının, temsil ettikleri dinin gerekliliklerinde, ihtiyaçlarında ve bağlamlarında değerlendirilirken farklı özel durumlar olabilmektedir. Bu nedenden çalışma kapsamında yeni tasarlanmış bir cami yapısına dair ergonomik analizler ve değerlendirmeler

yapılmıştır. Her ibadet yapısı çeşidi ve cami yapısı özelinde bu analizlerin alt başlıkları oluşup analizler çeşitlenebilecektir.

Gözlem ve anket çalışması sonucunda ibadet mekanı olan Marmara İlahiyat Fakültesi Cami ile ilgili ergonomi başlığı altında aşağıdaki temel yargılara varılabilir:

- Mekan boyutları genel olarak geniş, ferah olarak belirtilmiştir.
- İbadet mekanında kullanılan donatılar, kullanıcılar tarafından yeterli sayıda ve konforlu olarak tanımlanmıştır. Yapının dış mekanında donatı eksikliğini kullanıcılar vurgulamıştır.
- Kullanıcılar mekan aydınlatmasını yeterli olarak değerlendirmiştir. Mekanda kullanılan doğal gün ışığını olumlu bulmuşlardır.
- Kullanıcılar mekandaki havalandırma sisteminden memnundurlar. Mekanın ısı ve sıcaklığını uygun değerlendirmişler, ama belirli gün ve saatlerde mekandaki kullanıcı sayısına bağlı olarak mekana giren kullanıcıların kapı açma hareketinin mekanda hava sirkülasyonuna neden olduğunu belirtmişlerdir.
- Mekandaki bitkilendirmenin yetersiz, su ögesinin yeterli olduğunu ve suyu rahatlatıcı bir öğe olarak nitelendirmişlerdir.
- Mekandaki yönlendirmelerin basit ve herkes tarafından algılanabilecek şekilde tasarlandığını belirtmişlerdir. Her kata herkesin ulaşabilmesinin rahatlığını vurgulamışlardır.
- Yapı içinde zaman geçirebilecekleri, sosyalleşebilecekleri mekanların varlığından söz edip; bu mekanları kullandıklarını belirtmişlerdir. Yapı dışında herhangi bir sosyalleşme alanı bulunmadığını ve bu durumdan rahatsız olduklarını eklemişlerdir.

Yapılı çevrelerde herkesin kullanımına yönelik tasarımlar yapmak ve bu tasarımların bireylere çeşitlilik sunması ana amaçtır. Evrensel tasarım kavramı, herkese yönelik ve herkesin eşit şekilde erişebileceği, yararlanabileceği tasarımları - mekanları amaçlamaktadır. İbadet yapıları da kamusal yapılar grubuna girmektedir. Dini inanç bağlamında her bireyin inancını yaşamak, inancının gerekliliklerini yerine getirmek için ibadet yapılarına erişiminin olması gerekmektedir. Günümüz tasarımlarında en önemli ölçütlerden biri olan evrensel tasarım, ibadet yapıları tasarımlarında da olmalıdır. Yapılan gözlemler sonucunda caminin evrensel tasarım ilkeleri gözetilerek herkesin erişebileceği şekilde tasarlandığı ama ana ibadet mekanları ve wc - abdesthane bölümlerinde erişimin zorlandığı gözlemlenmiştir. Yapıda görme ve işitsel engellilere yönelik de herhangi bir çalışmanın olmadığı görülmüştür.

Yapılan anket çalışmasının sonuçları ile mekandaki gözlemlerden elde edilen veriler, çoğunlukla birbirlerini destekler niteliktedir. Farklı değerlendirme ölçütleri ile gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda, çağdaş cami yapısı olarak nitelendirilen Marmara İlahiyat Fakültesi Cami'sinin optimum ergonomik değerleri sağladığı söylenebilir. Yapıda; ibadet mekanını fiziksel, işitsel ve görme engellilerin kullanımına yönelik uygun düzenlemelerin yapılması, görme engellilerin yapıya ve yapı içinde erişiminin sağlanması için duymasanabilir yüzeyler ile işaretleme çalışmalarının yapılması, yapının iç mekandaki bitki ve peyzaj elemanlarının kullanılması ve çeşitlilik oluşturulması, yapının dış mekanında bitki ve peyzaj düzenlenmesi yapılarak gölgelik alan tasarımı çalışmalarının yapılması önerilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, var olan ibadet yapılarının, mevcut ibadet mekanlarını mümkün oldukça koruma eğiliminde olması nedeniyle; bazı müdahalelerden vazgeçilebilmektedir. Örnek olarak yapıda alt kat ibadet mekanında kadınlar bölümünün ana ibadet mekanından paravanla ayrılması verilebilir. Bu gibi durumlarda ergonomik ölçütlerin yapıların ilk tasarım aşamasında önemli ve yönlendirici bir özelliği olduğunu göstermektedir. Yani bir yapının tasarımında kullanıcıların ihtiyaçları ve konfor koşullarından taviz verilmemelidir. Bu sebeple yapıların tasarım süreçlerinde ergonomik ölçütlere dair ön çalışmalar yapıp, ergonomi kapsamındaki her bir ölçüt ciddi bir şekilde değerlendirilmeli ve uygulama süreçlerinde oluşturulan ergonomik ön çalışma yönlendirici olmasına önem verilmelidir.

6. Sonuçlar

6. Conclusions

Bu çalışma kapsamında, camilerin ergonomik konfor koşullarını incelemek amacıyla İstanbul'da yer alan, çağdaş tasarıma sahip Marmara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi cami incelenmiştir. Yapının ergonomik konfor koşulları, yerinde ölçme yöntemi ile nesnel olarak ve anket çalışması ile öznel olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar gözlem kartlarında yer verilerek, yapının ergonomik durumu irdelenmiştir.

Camilerde ergonomik konfor koşulları, değerlendirme ölçütleri ile ilgili günümüz literatüründeki bilgiler kısıtlı olsa da var olan bilgilere ve Diyanet İşleri Başkanlığı'nın Cami Tasarım Kılavuzuna göre uygun konfor koşulların sağlanması, ibadetin gerçekleştirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Nitekim bu çalışmada kılavuzda belirlenen değerlerden, ölçülerden ve ibadet için gerekli koşulların neler olduğuna dair bilgilerden yararlanılmış ve ölçme sonuçları bu şekilde yorumlanmıştır. Ayrıca cami kullanıcıları ile yapılan anket çalışması ile mevcut durumdaki antropometrik, fizyolojik, enformatik, psikolojik ve davranışsal konfor koşulları karşılaştırılmıştır. Böylelikle, farklı ergonomik konfor koşulları çalışmada bütüncül olarak ele alınıp yapının uygunluğu sınanmıştır.

Cami yapılarında yapılan ibadet eylemlere uygun ergonomik konfor koşullarının sağlanması, ibadetin gerçekleştirilebilmesi ve kullanıcıların o ibadeti yaparken davranışsal ve ruhsal durumu açısından büyük önem taşımaktadır. İbadet alanının bulunduğu yerin büyüklüğü, kullanıcı sayısına göre olmalıdır. Kadınlar bölümü, cami yapısında sonradan mekan bölünmesi ile değil; yapı tasarımının başında düşünülmelidir. Yapının tüm mekan kullanımlarında, evrensel tasarım ilkeleri benimsenmiş olup; mekan tasarımı ve organizasyonundan malzeme seçimine kadar bu ilkeler gözetilmelidir.

Yapı içerisindeki saydam yüzeylerden gelen doğal ışığın yetersiz olduğu durumlarda, yapay ışık kullanımı da tercih edilmelidir. Ayrıca incelenen cami yapısında doğal ışığın ve yapay ışığın birlikte, bütüncül kullanıldığı belirlenmiştir. Bu bağlamda; hem mekan atmosferinin oluşması, mekandaki psikolojik konfor koşulları açısından hem de aydınlatma enerjisi tüketiminin azaltılması için yapıdaki saydam yüzeylerin oranlarına dikkat edilmelidir.

Çalışmada işitsel konforun değerlendirilmesinde; akustik ölçümler yapılmış, modellemeler yapılmamıştır. Yapının işitsel konforunun doğru bir şekilde sağlanması için cami tasarımının başlangıcında veya proje detaylarının oluşturulması aşamasında akustik projeler hazırlanmalı ve tasarımın akustik modellemesi yapılmalıdır. Yapının uygulama aşaması bittikten sonra, işitsel konfor koşullarının sağlanmadığı olumsuz durumlarda yapılan çözümler hem akustik açıdan hem mimari tasarım açısından doğru olmayacaktır.

Dini yapılar farklı kullanıcı yoğunluğuna sahip, farklı yaş gruplarının farklı zaman aralıklarında kullandıkları yapı grubudur. Bu yapıların toplu halde kullanılmaları ve toplum yaşamında da önemli yeri olmaları nedeniyle enerjiyi etkin kullanım, enerji tüketiminin azaltılması, termal konfor açısından da değerlendirilmesi gereken alt başlıklardan birini oluşturmaktadır. Termal konfor, yapı kullanıcılarının yapıyı ziyaret etme sıklığını, kullanıcıların fiziki ve psikolojik durumlarını ayrıca ibadet verimlerini de etkileyebilmektedir. Bundan dolayı hem yapı içinde hem yapı dışında termal konfor koşullarının sağlanması ve sürekliliğinin oluşturulması önemlidir.

Bu çalışmada yer alan özgün araştırma yönteminin nesnel ve öznel olarak yapının ergonomik konfor koşullarının değerlendirilmesinde kullanılması; hem elde edilen bulguların ve değerlendirme sonuçlarının yer aldığı yayınların yapılması ile literatüre, hem de tasarımcılara ve kullanıcılara katkılar sunacaktır. Bu çalışmada incelenen ibadet yapılarının ergonomik konfor koşullarının değerlendirilmesi konusu, ileride yapılacak çalışmalarda incelenecek örnek sayısı artırılarak ya da bilgisayar ortamında programlarda farklı modeller üzerinden simülasyon çalışmaları yapıp geliştirilerek ergonomi - ibadet yapısı ilişkisinde değerlendirme ölçütlerinin sağlanmasına yönelik araştırmalara kaynak oluşturmaktadır.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazar çalışmanın tamamını kendisi yapmıştır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Abdou, A. A. (2003a). Measurement of ascoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia. *Journal of Acoustical Society of America*, 113(3), 1505-1517. <https://doi.org/10.1121/1.1531982>
- Abdou, A. A. (2003b). Comparison of the acoustical performance of mosque geometry using computer model studies. *Eighth International IBPSA Conference*, (pp. 39-46), Eindhoven.
- Al-Ajmi F.F., (2010). Thermal comfort in air - conditioned mosques in dry desert climate. *Building and Environment*, 45, 2407-2413. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.003>
- Al-Homoud M., Abdous A.A., & Budaiwi I.M. (2009). Assesment of monitored energy use and thermal comfort conditions in mosques in hot - humid climates. *Energy and Buildings*, 41, 607-614. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.12.005>
- Arkitera, (2016) *Marmara Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Camii ve kültür merkezi*. Arkitera. <https://www.arkitera.com/proje/marmara-universitesi-ilahiyat-fakultesi-camii-ve-kultur-merkezi/>
- Aşıkoğlu, N. (2000). İslam'a göre inancın toplumdaki yeri ve rolü. *Cumhuriyet Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi*, 4(1), 274-280.
- Atmaca, A.B. (2017). *Dini yapıların ısı konfor ve enerji tüketimi açısından incelenmesi ve değerlendirilmesi: Marmara İlahiyat Cami ve Hz.Ali Cami örnekleri* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Bolak, O. (1967). *Camilerin aydınlatılması üzerinde bir araştırma*. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.
- CAHRISMA (2003). Acoustical properties of domed spaces and optimum acoustical conditions for domed mosques. Combined Deliverable (D29-D34-D35), Project Number: ICA3-CT-1999-00007, İstanbul, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Çelenk, H. (2000). *Ergonominin verimliliğe ve motivasyona etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü].
- Çınar, H., Arslan, A.R., & Doğan, K. (2015). İbadethaneler: tekerlekli sandalye kullanıcılarının kullanımın memnuniyeti. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3)- SI:Ergonomi, 319-327.
- Diyanet İşleri Başkanlığı. (2010). *Cami planlama ve tasarım kılavuzu*. <https://yonetimhizmetleri.diyaret.gov.tr/Documents/Cami+Planlama+ve+Tasarimi+Kilavuzu+2021.pdf>
- Karabiber, Z. (1998). Camilerde akustik sorunlar. *4.Ulusal Akustik Kongresi*. Antalya.
- Koçak, N.S.Y. & Özdemir, Ş. (2021). Çamlıca Camii'nin evrensel tasarım kapsamında değerlendirilmesi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 4(2), 133-145.
- Küçükerman, Ö. (1978). *Kişi-çevre ilişkilerinde çağdaş gelişimler ve oturma eylemi* [Doktora Tezi, İstanbul Devlet Güzel Sanatlar Akademisi].
- Mülayim, A. (2017). İç mekan düzenlemesinde engellilere yönelik çözüm önerileri. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 3, 68-94.
- Neufert, E. (1983). *Yapı bilgisi*. Kelaynak Yayınevi.
- Taşdemir, A.S., & Eraslan, A. (2018). Çağdaş camii tasarımında yenilikçi bir yaklaşım Marmara İlahiyat Cami; plan ve iç mekân özellikleri. *Anadolu Bil Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, 52, 55-70.

- Tifa. (2022). *Yer çağdaş cami üzerine denemeler.* https://www.tifa.studio/_files/ugd/4eb2d6_8d2b18feff4643128439ec677efee820.pdf
- Ulusoy, H., & Köymen, E. (2022). Şadırvan mimarisinin tarihsel süreci bağlamında abdest alma mekanları üzerine bir araştırma. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 55, 276-291.
- Uysal, E. (2015). Camilerde mimari akustik tasarım kriterleri ve bir örnek çalışma Hasan Tanık Cami [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi].
- Uzun, Ç. (2010). Günümüz cami mimarisinin işlev-biçim ve teknoloji ilişkisi [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi].
- Ünver, R., & Enarun, D. (1998). Lighting of mosques, a historical overview. *CIBSE National Lighting* (pp. 3-11), Lancaster.
- Ünver, R., & Enarun, D. (1999). A comparative investigation of lighting of mosques and churches in İstanbul, *24Th. Session of the CIE* (pp. 288-292). Warsaw.
- Ünver, R. (2000). Aydınlatma ve dini yapılar. *Tasarım Dergisi*, 102, 138-145.d

Silah gövdeleri için geliştirilen polimer kompozit malzemeler için çok kriterli karar verme yöntemleri ile doğal takviye malzemesinin seçimi

Selection of natural reinforcement material with multi-criteria decision-making methods for polymer composite materials developed for gun bodies

Yaşam KANDEMİR^{1,2} , Temel VAROL^{*,1} , Mustafa ASLAN¹ 

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

² Yök 100/2000 Doktora Bursiyeri, Trabzon Silah Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 07.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

Öz

Kompozit malzemeler son yıllarda kullanım alanındaki mekanik, termal, tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi sebebiyle havacılık, savunma, otomotiv sektörlerinde kullanımı yaygınlaşan mühendislik malzemeleridir. Kompozit malzemeler içerisinde savunma sektöründe tercih edilen en önemli çeşitlerinden birisi polimer kompozit malzemelerdir. Polimer kompozit malzemeler yüksek mukavemet, ısı ve neme dayanıklılık ve termal özellikleri yönüyle hafif silah imalatında kullanılmaktadır. Bu özelliklerini daha da etkin hale getirmek maksadıyla takviye elemanları olarak doğal elyaf kullanılmaktadır. Bu noktada, hafif silah gövdelerinde polimer kompozit malzeme için takviye elemanının seçiminde karar aşamasına geçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada malzemelerin seçimi ile ilgili olarak kriter ağırlıklarını belirlemek için Critic yöntemi, malzemelerin en uygun doğal takviye malzemesi seçilebilmesi için önem sıralamalarını belirlemek amacıyla Topsis, Saw ve Marcos yöntemleri ele alınmıştır. Uygulanan bu yöntemler ile üç ayrı sıralama sonucu hesaplanmış ve Borda Sayım yöntemi ile net bir sıralamaya dönüştürülmüştür. Spearman korelasyon katsayısı kullanılarak yöntemler arası ilişki ortaya konulmuştur. Hafif silah gövdelerinde kullanılan PA 66 plastik malzemesi için en uygun takviye muz elyaf malzemesinin olduğu belirlenmiştir. En etkin kriter olarak 0,180 kriter ağırlığına sahip olan Young modülü belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Borda sayım, Doğal elyaf, Hafif silah, Kompozit malzeme, PA 66

Abstract

Composite materials are engineering materials that have become widespread in the aerospace, defense and automotive sectors due to the improvement of their mechanical, thermal and tribological properties in recent years. One of the most important types of composite materials preferred in the defense industry is polymer composite material. Polymer composite materials are used in the manufacture of light guns due to their high strength, heat and humidity resistance and thermal properties. In order to make these properties more effective, natural fibers are used as reinforcement elements. At this point, it is necessary to proceed to the decision stage in the selection of reinforcement element for polymer composite material in light gun bodies. In this study, the Critic method was used to determine the criterion weights for the selection of materials, and the Topsis, Saw and Marcos methods were used to determine the order of importance for the selection of the most suitable natural reinforcement material. With these applied methods, three different ranking results were calculated and converted into a net ranking with the Board Count method. The correlation between the methods was revealed by using the Spearman correlation coefficient. It has been determined that the most suitable reinforcement for the PA 66 plastic material used in light gun bodies is the banana fiber material. The Young's modulus, which has a criterion weight of 0.180, was determined as the most effective criterion.

Keywords: Borda count, Natural fiber, Small gun, Composite material, PA 66

* ^bTemel VAROL; tvarol@ktu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Polimer malzemeler, hafiflik, korozyon direnci, yüksek dayanım gibi özellikleri sayesinde endüstride yaygın olarak kullanılan malzeme türleridir. Son yıllarda polimer matrisli malzemeler sahip oldukları bu üstünlüklerden ötürü mühendislik uygulamaları için önemli bir ileri mühendislik malzemesi haline getirilmiştir. Teknoloji alanındaki gelişen üretim teknikleri sayesinde polimer esaslı kompozit malzemelerin üretiminde gözle görülebilir artış gözlenmektedir (Aslan, 2012). Polimer malzemeler içinde çok sayıda alt grup bulunmaktadır ve bu alt gruplardan birisi de poliamid grubudur. Uzun zincir polimerleri olan poliamidler içerisinde en çok bilinenler poliamid 6.6 (PA 66), poliamid 6 (PA 6), poliamid 12 (PA 12) türleridir. Havacılık, otomotiv, kimya, elektrik-elektronik alanında kullanılan poliamid türleri savunma sektöründe de tercih edilmektedir. Savunma sanayisinin ürünlerinden birisi olan hafif silah polimer gövdesi üretiminde PA 66 malzemesi kullanılmaktadır (Karslı vd., 2020). Bununla birlikte polimer malzemelerin artan ihtiyaçlara cevap verebilmesi için özelliklerinin daha üst safhalara çıkarılması gerekmektedir. Bu noktada polimer malzemelerde takviye malzemelerinin önemi ortaya çıkmaktadır. Takviye malzemeleri; matris malzemenin rijitlik, sertlik, çekme dayanımı gibi mekanik ve tribolojik özelliklerini kuvvetlendirerek ve matris malzemeye geliştirilmiş yenilikler katarak kullanım sınırlarını genişletmektedir (Bhadra & Dhar, 2022). Bu anlamda takviye olarak kullanılan malzeme türleri elyaflardır. Elyaf lar içerisinde güçlendirme amacı taşıyan ve sıklıkla tercih edilenler sentetik elyaf türleri karbon elyaf ve cam elyaftır. Karbon elyaf ve cam elyaf malzemeleri %5 ile %50 arasında değişen oranlarda takviye edilerek kompozit malzemelere uygulandığı çalışmalar literatürde mevcuttur (Karslı vd., 2020).

Bununla birlikte sentetik elyafların yüksek maliyetli oluşu kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Günümüz şartlarında artan çevresel bilinç, teknolojik ilerlemeler, yenilenebilir kaynak arayışı, sentetik elyafların yerine bitki, hayvan ve minerallerden elde edilen çevre dostu doğal elyafların tercih edilmesini gerekli kılmaktadır. Doğal elyafların iyi aşınma direnci, hafiflik, yüksek spesifik dayanımı gibi özellikleri onların sentetik elyafların yerine kullanılmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda doğal elyaf kaynaklarının bol olması, arkasında neredeyse hiç karbon ayak izi bırakmaması onları nitelikli kılan özelliklerindedir. Bu özellikler sayesinde doğal elyaflar, polimer kompozit malzemelere tek veya hibrit olarak takviye edilerek birçok araştırma çalışmasına konu olmuştur. Silah gövde ve kabzalarında, otomotiv fren sistemlerinde, uçak kanatlarında, araçların kapı imalatında, iç kabin üretimindeki kullanımı, uygulama alanlarından sadece birkaçını oluşturmaktadır (Singh vd., 2022). Sanjay ve arkadaşları doğal elyaf takviyeli kompozitlerin çevreye zararlı sentetik elyafların yerine kullanılmasının önemine dikkat çekmiş ve kirlilik problemlerine olumlu katkılar yapacağını altını çizmiştir. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin kullanıldığı alanlara dikkat çekerek farklı üretim ve karakterizasyon teknikleri ile analizlerine çalışmalarında yer vermişlerdir (Sanjay vd., 2018). Saba ve arkadaşları doğal elyaf türlerinden biri olan kenaf elyafların mekanik özelliklerine yer vererek; termoset kompozit, termoplastik kompozit, biyobozunur polimer kompozitler ve hibrit kompozitlere takviye edilerek oluşan kenaf elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir (Saba vd., 2015). Kiruthika, hasır lifinin otomotiv ve inşaat sanayisinde kullanımına dikkat çekerek, hasır elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin teknolojik, ekonomik ve ekolojik farklılıklarına değinmişlerdir. Hasır elyafların mekanik ve kimyasal kompozisyonlarına yer veren çalışma, hasır lifi türlerinden olan muz, keten, kenevir, jüt, rami elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeleri incelemiştir (Kiruthika, 2017). Sood ve arkadaşları naylon matris malzemeye %20 oranında ananas elyaf takviyeli kompozit malzemenin kimyasal ve mekanik analizi, kenaf elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin eğilme mukavemet değerleri, rami elyaf takviyeli ve takviyesiz polilaktik asit kompozit malzemelerin kimyasal ve termal analizleri, muz partiküllü polyester kompozit malzeme araştırmaları, keten takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin tribolojik özellik ve değerlerine değinmiştir (Sood & Dwivedi, 2018). Bu çalışmada malzeme yapısı ve çevre dostu olması ile ön plana çıkan doğal elyaf malzemelerinin, silah gövde üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılması araştırılmıştır. Bu amaçla doğal elyaf malzemelerinin seçimini belirlemek ve bir karar mekanizması oluşturmak maksadıyla çok kriterli karar verme yöntemleri tercih edilmiştir.

Çok kriterli karar verme yöntemleri, çoklu kriter ve alternatiflerin bulunduğu bir karar ortamında farklı stratejiler uygulayarak karar vericilere avantaj ve kolaylıklar sunmaktadır. Her yöntemin kendine has işlem adımlarının olduğu bu karar mekanizmasında; problemin tanımlanması, kriter ve alternatiflerin belirlenmesi, kriter ağırlıklarının hesaplanması aşamaları ortaktır. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin doğal elyaf takviyeli kompozitlerde incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Shaharuzaman ve arkadaşları otomotiv yan kapı darbe kirişi kompozitleri için doğal elyaf malzeme seçiminde karar destek stratejisi olarak Ahp-Vikor

yöntemlerini kullanarak sertlik, mukavemet, yüzde uzama, yoğunluk, maliyet, kullanılabilirlik kriterlerini ve doğal elyaflarını incelemiştir. Kenaf elyaf, en iyi alternatif seçilmiştir (Shaharuzaman vd., 2019). Kalagi ve arkadaşları rüzgâr türbin kanatları için keten elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf, hindistan cevizi elyaf türlerini farklı oranlarda takviyeli polimer kompozit malzemelerde kullanarak yoğunluk, darbe enerjisi, çekme dayanımı, Young modülü, eğilme modülü, eğilme mukavemeti kriterlerini incelemiştir (Kalagi vd., 2018). Mansor ve arkadaşları otomotiv fren sistemi için hibrit elyaflar kullanarak performans, ağırlık ve maliyet ana kriterleri ile mukavemet, sertlik, yoğunluk ve ham madde alt kriterlerini belirlemiştir. 13 farklı elyaf türü belirleyerek Ahp yöntemi ile ikili karşılaştırma matrislerini oluşturarak kenaf ve ananas elyaf alternatifleri en iyi alternatif olarak seçilmiştir (Mansor vd., 2013). Amarnath ve arkadaşları optimal keten elyaf takviyeli komponentler için Psi, Topsis, Moora yöntemleri kullanmıştır. Yöntemler arasında Spearman sıralama korelasyon katsayısı uygulayarak yöntemler arası ilişki kuvvetini incelemiştir (Amarnath vd., 2022). Shaharuzaman ve arkadaşları, otomotiv parçaları için polipropilen, düşük yoğunluklu polietilen, yüksek yoğunluklu polietilen, polistren, poliamid 6 (PA6), poliamid 6,6 (PA66) ve termoplastik poliüretan alternatifleri Vikor yöntemleri ile araştırılarak polipropilen en iyi alternatif olarak seçilmiştir (Shaharuzaman vd., 2018). Ancak silah gövdelerinde kullanılmak üzere polimer matrisli kompozit malzemelerde takviye malzeme seçimini karar verme yöntemleri ile entegre olarak kullanan bir çalışmanın literatürde mevcut olmadığı görülmüştür. Mevcut çalışmada polimer esaslı silah gövdeleri imalatında doğal elyaf takviye malzeme seçimi yapılmıştır. 12 adet doğal elyaf türü ve 6 kriter belirlenerek karar matrisi oluşturulmuştur. Doğal elyaf türleri muz elyaf, hindistan cevizi elyaf, bambu elyaf, kenaf elyaf, ananas elyaf, kenevir elyaf, rami elyaf, abaka elyaf, keten elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf ve pamuk elyaftır. Kriterler ise çekme dayanımı, Young modülü, yüzde uzama, nem içeriği, fiyat ve yoğunluk kriterleridir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden kriter ağırlıklarını belirlemek üzere Critic metot, alternatif sıralamalarını oluşturmak için Topsis, Saw ve Marcos yöntemleri uygulanarak her alternatif için spesifik sıralama belirlenmiştir. Belirlenen sıralamalar neticesinde farklılıklar gözlenmiş olup, üç farklı sıralamayı tek sıralamaya indirgemek amacıyla Borda Sayım metodu tercih edilmiştir.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

Çok kriterli karar verme yöntemleri ile birçok karar süreci olumlu yönde şekillenmektedir. Yöntemler literatürde geniş kapsamda yer bulurken, artan popülerliği ve kullanışlı olması ile tercih sebebi olmaktadır. Bu çalışmamızda doğal elyaf seçimi için gerekli olan kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için Critic yöntem, doğal elyaflar arasında sıralama yapmak amacıyla Topsis, Saw ve Marcos yöntemleri kullanılarak bütünsel bir çalışma ortaya koymak hedeflenmiştir. Üç yöntem ile elde edilen sıralama değerleri Borda Sayım Yöntemi ile tek bir sıralama tipine dönüştürülmüştür.

2.1. Critic yöntemi

2.1. Critic method

Kriter, bir malzeme veya ürünün sahip olduğu özellik anlamına gelmektedir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinde, belirlenen kriterlere önem derecelerini göstermek üzere ağırlık ataması yapılmaktadır. Bu atama, birçok yöntem ile yapılmaktadır. Critic yöntemi, kriter ağırlıklarını belirlemede karar vericiler olmadığı durumlarda korelasyon hesaplamalarını kullanarak ilişkileri ortaya koyan bir kriter ağırlık metodudur. Ağırlıkların hesaplanmasında çıktılarının oluşturulması önem kazanmaktadır. Bununla birlikte rastgele bir seçim ile yapılan değerlendirmeler yanlış sonuçlara dönüşmektedir.

Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden biri olan Critic yöntem ile az bir çaba ile doğru çıktılar elde edilmekte ve tutarlı değerlendirmeler yapılmaktadır. Çıktıların yüzdelik ağırlık değerleri; normalize edilerek, standart sapmalar bulunarak, korelasyon matrisleri oluşturularak hesaplanmaktadır (Raffic vd., 2021). Critic yöntem şu adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: Karar matrisi oluşturulur.

Adım 2: Karar matrisi Denklem 1 ve Denklem 2 ile normalize edilir.

x_{ij} : Karar matrisindeki i.satır ile j.sütundaki değeri göstermektedir.

r_{ij} : x_{ij} değerinin normalize edilmiş durumudur.

$x_{j,min}$: j.kriterin alternatifler içerisindeki minimum değeridir.

$x_{j,max}$: j.kriterin alternatifler içerisindeki maksimum değeridir.

a) Fayda kriteri için:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}}; \forall i, j \quad (1)$$

b) Maliyet kriteri için:

$$r_{ij} = \frac{x_{j,\max} - x_{ij}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}}; \forall i, j \quad (2)$$

Adım 3: Kriterler arasında korelasyon dereceleri Denklem 3 ile hesaplanır.

ρ_{jk} : Korelasyon katsayısı

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}} \quad (j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

Adım 4: Her bir kriterde bulunan toplam bilgi miktarı (C_k) Denklem 4 ile hesaplanır.

C_k : Kriterlerin toplam bilgi miktarı

σ_k : Kriterlerin standart sapma değeri

$$C_k = \sigma_k \sum_{j=1}^n (1 - r_{jk}), k = 1, 2 \dots n \quad (4)$$

Adım 5: Her bir kriterin ağırlığı Denklem 5 ile hesaplanır.

$$W_k = \frac{W_k}{\sum_{k=1}^n C_k} \quad (5)$$

2.2. Topsis yöntemi

2.2. Topsis method

Topsis yöntem, çok kriterli karar verme yöntemleri içerisinde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Oluşturulan karar matrisi ile pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözümler belirlenerek, farklı uzaklık yöntemleri kullanılarak alternatifler içerisinde etkin bir sıralama ortaya koyan karar yöntemidir. Topsis yöntemi şu aşamaları içermektedir:

Adım 1: Problem ve problemin amacı belirlenir.

Adım 2: Alternatif ve kriterleri içeren karar matrisi oluşturulur.

Adım 3: Karar matrisi Denklem 6 kullanılarak normalize edilir.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (6)$$

Adım 4: Ağırlıklı normalize karar matrisi (v) kurulur.

Adım 5: Pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözümler Denklem 7 ve denklem 8 ile belirlenir.

$$A^+ = \{(maxV_{ij} | j \in J), (minV_{ij} | j \in J')\} \quad (7)$$

$$A^- = \{(minV_{ij} | j \in J)(maxV_{ij} | j \in J')\} \quad (8)$$

Adım 6: Euclidian uzaklık yöntemi kullanılarak Denklem 9 ve Denklem 10 ile pozitif ve negatif ideal

uzaklıklar hesaplanır.

$$S_i^+ = \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2 \right]^{0.5} \quad (9)$$

$$S_i^- = \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0.5} \quad (10)$$

Adım 7: Alternatifler arasında ideal çözümlere olan yakınlıklar Denklem 11 ile hesaplanır ve sıralama oluşturularak en iyi alternatif belirlenir.

$$P_i = \frac{e_i^-}{e_i^+ + e_i^-} \quad (11)$$

2.3. Saw yöntemi

2.3. Saw method

Saw yöntemi, Ağırlıklı Toplam Model olarak bilinen, kolay uygulanışı ve sade adımlar içermesi sebebiyle karar aşamalarında kolaylık sağlayan bir kritik karar verme aracıdır. Yöntem, hesaplanan kriter ağırlıkları ile her bir alternatif için “alternatif tercih değerleri” oluşturmayı öngörmekte ve bu sayede daha anlaşılır bir çözüm yöntemi sunmaktadır. Saw yönteminin adımları şu şekilde sıralanabilir:

Adım 1: Karar matrisi oluşturulur.

Adım 2: Denklem 12 ile normalize matris normalize işlemine tabi tutulur.

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} & i = 1,2, \dots m \quad j = 1,2, \dots n \quad \text{fayda kriteri} \\ \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} & i = 1,2, \dots m \quad j = 1,2, \dots n \quad \text{maliyet kriteri} \end{cases} \quad (12)$$

Adım 3: Kriter ağırlıkları matris değerleri çarpılarak alternatif tercih değerleri Denklem 13 ve Denklem 14 ile hesaplanır.

$$S_j = \sum_{i=1}^m w_j r_{ij} \quad i = 1,2, \dots m \quad 0 < S_j \leq 1 \quad (13)$$

$$S_j^{\%} = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^n S_j} \quad (14)$$

2.4. Marcos yöntemi

2.4. Marcos method

Marcos yöntemi, Stevic ve arkadaşları tarafından literatüre kazandırılmıştır (Stevic vd., 2020). Bu yöntemde, çok kriterli yöntemlere farklı bir bakış açısı kazandırılmıştır. Oluşturulan karar matrisi genişletilmiş karar matris haline dönüştürülerek ideal ve anti ideal çözümler oluşturulmaktadır.

Üyelik fonksiyonlarından yararlanılarak en iyi alternatifin ideal çözüme en yakın olduğu ancak anti-ideal çözüme en yakın olan alternatifin ise en az tercih edilen alternatif olduğunu göstermektedir (Gençtürk vd., 2021). Marcos yönteminin adımları şöyle sıralanmaktadır:

Adım 1: Başlangıç karar matrisi oluşturulur.

Adım 2: Genişletilmiş karar matrisi Denklem 15 ve Denklem ile 16 oluşturulur. Genişletilmiş karar matrisi, AAI (anti-ideal çözüm) ve AI (ideal çözüm) eklenerek oluşturulur. F, fayda kümesi ve M ise maliyet kümesini ifade etmektedir.

$$AAI = \underbrace{\min}_i x_{ij} \text{ eğer } j \in F \text{ ve } \underbrace{\max}_i x_{ij} \text{ eğer } j \in M \quad (15)$$

$$AI = \underbrace{\min}_i x_{ij} \text{ eğer } j \in F \text{ ve } \underbrace{\max}_i x_{ij} \text{ eğer } j \in M \quad (16)$$

Adım 3: Genişletilmiş karar matrisine Denklem 17 ve Denklem 18 ile normalizasyon işlemi uygulanır. n_{ij} değeri, x_{ij} değerinin normalize edilmiş durumudur.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ai}} \quad (17)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ai}}{x_{ij}} \quad (18)$$

Adım 4: Ağırlıklı karar matrisi Denklem 19 ile oluşturulur. Normalize değerler kriter ağırlıkları ile çarpılarak v_{ij} değerleri hesaplanır.

$$v_{ij} = n_{ij} * w_j \quad (19)$$

Adım 5: Alternatiflerin fayda dereceleri Denklem 20, 21, 22 ile hesaplanır. K_i^- , K_i^+ değerleri, her bir alternatif için ideal ve anti ideal çözümlerine göre hesaplanmaktadır. S_i değeri, “v” değerlerinin toplamıdır.

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad (20)$$

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad (21)$$

$$S_i = \sum_{i=1}^n v_{ij} \quad (22)$$

Adım 6: Alternatiflerin fayda fonksiyonları Denklem (23, 24, 25) ile hesaplanır. $f(K_i)$ değeri, alternatiflerin fayda fonksiyonudur. Her alternatif için ideal ve anti ideal çözüme göre saptanan fayda fonksiyonu, anlaşma ortamı oluşturmaktadır.

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (23)$$

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (24)$$

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (25)$$

Adım 7: Alternatifler fayda dereceleri ve fayda fonksiyonlarına göre sıralanır.

2.5. Borda sayım yöntemi

2.5. Borda count method

Borda Sayım Yöntemi, bir sıralama yöntemi olmakla birlikte, birçok yöntemin sıralama sonuçlarının bütünsel bir hale dönüştürülmesinde önemli bir metot olmuştur (Akyüz & Aka, 2017). Farklı karar yöntemleri uygulanan çalışmalarda yöntemler arasında farklı yanıtlar ortaya çıkmaktadır. Bu noktada Borda Sayım Yöntemi, yöntemleri entegre eden bir yaklaşım ortaya koyarak tek tip bir hesaplama ile araştırmacılara kolaylık sağlamaktadır. Borda sayım yönteminde her bir alternatif için borda skor değeri belirlenmektedir. Borda skor, her bir alternatif için her bir yöntem ile hesaplanan sıralama değerlerinin toplamıdır (Ecer vd., 2022).

Adım 1: Her bir alternatif için Denklem 26 ile borda skor hesaplanarak en yüksek borda skora sahip olan alternatiften başlamak üzere alternatifler sıralanır. M değeri alternatiflerin toplam değerini göstermektedir.

$$b_i = \sum_{k=1}^n (M - r_{ik}) \quad (26)$$

2.6. Spearman sıralama korelasyon katsayısı

2.6. Spearman rank correlation coefficient

Spearman sıralama korelasyon katsayısı uygulanan yöntemler sonucunda sıralamalar arasındaki ilişki ve tutarlılığın ölçüsünü belirleyen, analiz eden bir katsayı denklemdir (Li vd., 2022). Sıralamalar arasındaki değişikliği sayısal olarak aktaran bir çözüm mantığıdır. Sonuçların memnuniyet verici olmasını irdeleyen Spearman, Denklem 27’de gösterildiği gibi yöntemler arasındaki korelasyon katsayısının $0.71 < \rho < 0.99$ aralığında olmasını öngörmektedir (Spearman, 1987).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (27)$$

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Hafif silah gövdelerinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler için yapılan bu araştırma çalışmasında uygulama sonuçlarını elde etmek için Microsoft Excel 2021 programından yararlanılarak şu hedeflere ulaşılmaya çalışılmıştır:

- 1) Polimer matrisli kompozit malzemeler için en iyi doğal elyaf takviye malzemesinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile belirlenmesi
- 2) Bu yöntemler arasındaki ilişkiler ortaya konularak en stratejik yöntemin ortaya çıkarılması
- 3) Doğal elyaf takviye malzemeleri arasında etkin bir sıralama oluşturulması

Problem tanımı için, hafif silah polimer gövdeleri dayanımı yüksek, düşük yoğunluklu malzemelerden tasarlanması gerekmektedir. Bu amaçla polimer gövde tasarımında poliamid malzemesi kullanılmaktadır. Ayrıca poliamid malzemesi ile elyaf türlerinin imal edildiği birçok çalışma bizlere yol göstermektedir (Bhardwaj & Sharma, 2021). Elyaf türleri özellikle cam elyaf ve karbon elyaf kullanılarak malzemenin rijitliği, dayanımı artırılmakta ve daha güçlü bir yapı ortaya çıkmaktadır (Peças vd., 2018). Bu çalışmalardan farklı olarak çevre dostu, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet özellikleri ile ön planda olan doğal elyaf malzemeleri alternatif olarak tercih edilmiştir. Alternatif doğal elyaf malzemelerin kriterleri ise çekme dayanımı, Young modülü, yüzde uzama, nem içeriği, fiyat ve yoğunluk kriterleri şeklinde belirlenmiştir. Alternatif ve kriterleri içeren matris Tablo 1’de gösterilmiştir. Kriterler içerisinde çekme dayanımı, Young modülü, yüzde uzama değerlerinin maksimize; nem içeriği, fiyat, yoğunluk değerlerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple çekme dayanımı, Young modülü, yüzde uzama kriterleri fayda temelli; nem içeriği, fiyat, yoğunluk kriterleri ise maliyet temelli olarak kategorize edilmiştir.

Tablo 1. Karar matrisi (Gurunathan vd., 2015)

Table 1. Decision matrix (Gurunathan et al., 2015)

Opsiyonlar	Çekme dayanımı (Mpa)	Young modülü (Gpa)	Yüzde uzama (%)	Nem içeriği (%)	Fiyat (\$/kg)	Yoğunluk (g/cm ³)
Abaka elyaf	621,50	32,35	2,90	14,00	0,35	1,50
Bambu elyaf	566,00	53,00	4,65	14,00	0,50	0,85
Muz elyaf	721,50	29,50	5,50	10,50	0,23	1,35
Hindistan cevizi elyaf	175,00	6,00	20,00	10,00	0,30	1,20
Pamuk elyaf	442,00	8,00	6,00	33,50	1,80	1,21
Keten elyaf	689,00	60,00	2,10	7,00	3,11	1,38
Kenevir elyaf	845,00	45,00	3,05	8,00	1,55	1,35

Tablo 1. Karar matrisi (Gurunathan vd., 2015) (Devamı)
Table 1. Decision matrix (Gurunathan et al., 2015) (Continue)

Opsiyonlar	Çekme dayanımı (Mpa)	Young modülü (Gpa)	Yüzde uzama (%)	Nem içeriği (%)	Fiyat (\$/kg)	Yoğunluk (g/cm ³)
Jüt elyaf	480,00	37,50	2,30	12,00	0,93	1,23
Kenaf elyaf	612,50	41,00	4,80	9,10	0,38	1,20
Ananas elyaf	898,50	71,00	2,00	14,00	0,50	1,50
Rami elyaf	669,00	94,70	3,00	14,50	2,00	1,44
Sisal elyaf	681,00	15,50	2,45	11,00	0,65	1,20
Kriter yönü	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet	Maliyet	Maliyet



Şekil 1. Polimer gövdeye sahip Zigana PX-9 tabanca modeli
Figure 1. Zigana PX-9 gun model with polymer body

Tablo 1’de gösterilen kriterler, doğal elyaf malzemelerin özelliklerini ifade etmektedir. Bu özellikler Şekil 1’de gösterildiği üzere polimer silah gövde imalatında takviye malzemesi olarak incelenen doğal elyaflar açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu sebeple kriterler arasında korelasyon katsayısını kullanarak kriterler arası ilişki matrisini ortaya koyan Critic metodu kullanılmıştır. Critic metodunda matris normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Ardından Tablo 2’de gösterildiği gibi ilişki katsayı matrisi oluşturularak 1- ρ_{jk} matrisi, σ_j , c_j , w_j değerleri hesaplanarak kriter ağırlıkları bulunmuştur. σ_j değeri kriterler arası standart sapmayı, w_j değeri ise kriterlerin ağırlıklarını ifade etmektedir.

Kriterler arası sonuçlar irdelendiğinde en yüksek ilişki 1,782 değeri ile çekme dayanımı ile yüzde uzama arasında; en düşük ilişki ise 0,421 ile çekme dayanımı ve Young modülü arasında olduğu gözlemlenmiştir. Kriter ağırlıkları Young modülü (0,180) > yüzde uzama (0,179) > fiyat (0,173) > yoğunluk (0,169) > çekme dayanımı (0,167) > nem içeriği (0,132) şeklinde bulunmuştur. Kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra alternatifleri bu ağırlıklara göre sıralayan ve kendi aralarında önceliklendirme işlemlerini takip eden çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan Saw, Topsis, Marcos yöntemlerinin uygulama adımlarına geçilmiştir. Uygulama adımlarında şu yöntem ve adımlar takip edilmiştir:

Tablo 2. Critic metodu çıktıları
Table 2. Critic method outputs

Opsiyonlar	Çekme dayanımı	Young modülü	Yüzde uzama	Nem içeriği	Fiyat	Yoğunluk
Çekme dayanımı	0,000	0,421	1,782	0,741	1,154	1,460
Young modülü	0,421	0,000	1,518	0,743	1,375	1,327
Yüzde uzama	1,782	1,518	0,000	1,005	0,695	0,734
Nem içeriği	0,741	0,743	1,005	0,000	0,882	1,114
Fiyat	1,154	1,375	0,695	0,882	0,000	0,776
Yoğunluk	1,460	1,327	0,734	1,114	0,776	0,000
σ_j	0,264	0,294	0,275	0,260	0,313	0,276
c_j	1,468	1,583	1,577	1,166	1,526	1,493
w_j	0,167	0,180	0,179	0,132	0,173	0,169

1) Ağırlıklı toplam model olarak isimlendirilen Saw yönteminde başlangıç aşamasında normalizasyon adımı gerçekleştirilmiştir. Normalizasyon adımı, farklı birimlerden oluşan kriterlerin tek bir birime dönüştürülme işlemidir. Normalizasyon adımı uygulandıktan sonra doğal elyaflar ile ilgili fayda matrisi oluşturularak doğal elyaf malzemeleri arasında Tablo 3'te şematize edildiği gibi önem derecelerini belirten sıralandırma işlemi yapılmıştır.

Tablo 3. Saw yöntemi fayda matrisi
Table 3. Saw method utility matrix

Opsiyonlar	Çekme dayanımı	Young modülü	Yüzde uzama	Nem içeriği	Fiyat	Yoğunluk
Kriter ağırlıkları	0,16700	0,18000	0,17900	0,13200	0,17300	0,16900
Abaka elyaf	0,11520	0,06138	0,02595	0,06613	0,11544	0,09599
Bambu elyaf	0,10491	0,10055	0,04161	0,06613	0,07965	0,16940
Muz elyaf	0,13373	0,05597	0,04922	0,08818	0,17316	0,10666
Hindistan cevizi elyaf	0,03244	0,01138	0,17897	0,09259	0,13275	0,11999
Pamuk elyaf	0,08193	0,01518	0,05369	0,02764	0,02213	0,11900
Keten elyaf	0,12771	0,11384	0,01879	0,13226	0,01281	0,10434
Kenevir elyaf	0,15662	0,08538	0,02729	0,11573	0,02569	0,10666
Jüt elyaf	0,08897	0,07115	0,02058	0,07715	0,04301	0,11706
Kenaf elyaf	0,11353	0,07779	0,04295	0,10174	0,10536	0,11999
Ananas elyaf	0,16654	0,13471	0,01790	0,06613	0,07965	0,09599
Rami elyaf	0,12400	0,17967	0,02685	0,06385	0,01991	0,09999
Sisal elyaf	0,12622	0,02941	0,02192	0,08417	0,06127	0,11999

Saw yöntemi ile ilgili normalize işlemleri ve fayda matrisi yapıldıktan sonra doğal elyafların bu yöntemle göre performans skorları oluşturularak performans sıralamaları yapılmıştır. Bu sıralama Tablo 4'te gösterilmiştir. Bu sonuçlar ışığında Saw yöntemi ile belirlenen sıralama değerleri muz elyaf, hindistan cevizi elyafı, bambu elyaf, keten elyaf, ananas elyaf, kenevir elyaf, rami elyaf, keten elyaf, abaka elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf, pamuk elyaf şeklinde oluşmuştur.

2) Topsis yöntemi her bir alternatif için pozitif ve negatif ideal çözümler üreterek ve bu çözümler ile öklid bağlantısı kurarak ideal uzaklıklar hesaplayıp performans skalası oluşturan karar verme metodudur. Uyguladığımız bu yöntemde normalize matris, ağırlıklı normalize matris, pozitif-negatif ideal çözümler, uzaklıkların hesaplanması ve performans skorlarını belirleme işlemleri takip edilmiştir.

Topsis metodolojisinde birçok normalizasyon adımı kullanılmakla birlikte bu normalizasyon adımlarının farklı birimlerden oluşan kriterleri tek bir tip birime dönüştürme amacı bulunmaktadır. Bu noktada Eşitlik 6 kullanılarak vektör normalizasyonu işlemi tercih edilmiş olup Tablo 5'te tüm kriterlerin tek birime dönüşüm çalışması şematize edilmiştir.

Tablo 4. Saw yöntemi performans sıralaması
Table 4. Saw method performance ranking

Doğal elyaflar	Performans skoru	Performans sıralaması
Muz elyaf	0,60691	1
Hindistan cevizi elyaf	0,56812	2
Bambu elyaf	0,56226	3
Kenaf elyaf	0,56136	4
Ananas elyaf	0,56092	5
Kenevir elyaf	0,51738	6
Rami elyaf	0,51427	7
Keten elyaf	0,50974	8
Abaka elyaf	0,48009	9
Sisal elyaf	0,44299	10
Jüt elyaf	0,41792	11
Pamuk elyaf	0,31956	12

Tablo 5. Topsis normalizasyon işlemi
Table 5. Topsis normalization stage

Doğal elyaflar	Çekme dayanımı	Young modülü	Yüzde uzama	Nem içeriği	Fiyat	Yoğunluk
Abaka elyaf	0,27889	0,19407	0,12284	0,27501	0,07441	0,33422
Bambu elyaf	0,25399	0,31795	0,19697	0,27501	0,10783	0,18939
Muz elyaf	0,32376	0,17697	0,23297	0,20626	0,04960	0,30080
Hindistan cevizi elyaf	0,07853	0,03599	0,84718	0,19644	0,06470	0,26738
Pamuk elyaf	0,19834	0,04799	0,25415	0,65806	0,38820	0,26961
Keten elyaf	0,30918	0,35994	0,08895	0,13750	0,67073	0,30748
Kenevir elyaf	0,37918	0,26995	0,12919	0,15715	0,33429	0,30080
Jüt elyaf	0,21539	0,22496	0,09743	0,23572	0,19971	0,27406
Kenaf elyaf	0,27485	0,24596	0,20332	0,17876	0,08152	0,26738
Ananas elyaf	0,40319	0,42593	0,08472	0,27501	0,10783	0,33422
Rami elyaf	0,30021	0,56810	0,12708	0,28483	0,43134	0,32085
Sisal elyaf	0,30559	0,09298	0,10378	0,21608	0,14018	0,26738

Tablo 6. Topsis ağırlıklı normalizasyon işlemi ve ideal çözümler**Table 6.** Topsis weighted normalization and ideal solutions

Doğal elyaflar	Çekme dayanımı	Young modülü	Yüzde uzama	Nem içeriği	Fiyat	Yoğunluk
Abaka elyaf	0,04645	0,03487	0,02199	0,03637	0,01288	0,05662
Bambu elyaf	0,04230	0,05713	0,03525	0,03637	0,01867	0,03208
Muz elyaf	0,05392	0,03180	0,04170	0,02728	0,00859	0,05095
Hindistan cevizi elyaf	0,01308	0,00647	0,15162	0,02598	0,01120	0,04529
Pamuk elyaf	0,03303	0,00862	0,04549	0,08704	0,06722	0,04567
Keten elyaf	0,05149	0,06467	0,01592	0,01819	0,11614	0,05209
Kenevir elyaf	0,06315	0,04850	0,02312	0,02079	0,05788	0,05095
Jüt elyaf	0,03587	0,04042	0,01744	0,03118	0,03458	0,04643
Kenaf elyaf	0,04577	0,04419	0,03639	0,02364	0,01412	0,04529
Ananas elyaf	0,06715	0,07653	0,01516	0,03637	0,01867	0,05662
Rami elyaf	0,05000	0,10207	0,02274	0,03767	0,07469	0,05435
Sisal elyaf	0,05089	0,01671	0,01857	0,02858	0,02427	0,04529
V* (pozitif ideal çözüm)	0,06715	0,10207	0,15162	0,01819	0,00859	0,03208
V- (negatif ideal çözüm)	0,01308	0,00647	0,01516	0,08704	0,11614	0,05662

Normalize işlemleri gerçekleştirildikten sonra Critic yöntemi ile hesaplanan ağırlıklar ile normalize ağırlıklar çarpılarak Tablo 6'da gösterilen ağırlıklı normalize tablosu elde edilmiştir. Pozitif ve negatif ideal çözümler maliyet ve fayda temelli kriterler baz alınarak oluşturulmuştur. İdeal çözümler ışığında öklid uzantısı kullanılarak her bir alternatifin ideal çözümlere olan pozitif ve negatif uzaklıkları Tablo 7'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 7. İdeal uzaklıklar ve performans skorları**Table 7.** Ideal distances and performance scores

Doğal elyaflar	S*	S-	PS	Doğal elyaflar	PS	Sıra
Abaka elyaf	0,15067	0,12327	0,44999	Hindistan cevizi elyaf	0,62260	1
Bambu elyaf	0,12889	0,12842	0,49910	Muz elyaf	0,50382	2
Muz elyaf	0,13280	0,13485	0,50382	Kenaf elyaf	0,50128	3
Hindistan cevizi elyaf	0,11093	0,18300	0,62260	Bambu elyaf	0,49910	4
Pamuk elyaf	0,17182	0,06193	0,26494	Ananas elyaf	0,49746	5
Keten elyaf	0,17896	0,09811	0,35409	Abaka elyaf	0,44999	6
Kenevir elyaf	0,14896	0,11024	0,42530	Rami elyaf	0,44911	7
Jüt elyaf	0,15439	0,10749	0,41046	Kenevir elyaf	0,42530	8
Kenaf elyaf	0,13161	0,13228	0,50128	Sisal elyaf	0,42011	9
Ananas elyaf	0,14251	0,14106	0,49746	Jüt elyaf	0,41046	10
Rami elyaf	0,14882	0,12133	0,44911	Keten elyaf	0,35409	11
Sisal elyaf	0,16057	0,11633	0,42011	Pamuk elyaf	0,26494	12

Maliyet temelli kriterler için en iyiye en uzak, en kötüye en yakın yaklaşımı; fayda temelli kriterler için en iyiye en yakın, en kötüye en uzak yaklaşımı esas alınmıştır. Topsis metodu ile oluşturulan alternatiflerin performans sıralaması hindistan cevizi elyaf, muz elyaf, kenaf elyaf, bambu elyaf, ananas elyaf, abaka elyaf, rami elyaf, kenevir elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf, keten elyaf, pamuk elyaf şeklinde hesaplanmıştır.

3) Marcos metodolojisinde diğer metotların karar matrislerinden farklı olarak karar matrisine ideal ve anti ideal alternatifler eklenerek Tablo 8'de gösterildiği gibi genişletilmiş karar matrisi oluşturulur. İdeal alternatif, fayda temelli her bir kriterin sütunundaki maksimum değer, maliyet temelli kriterin sütunundaki minimum değerdir. Anti ideal alternatif ise, fayda temelli kriterin bulunduğu sütundaki minimum değer, maliyet temelli kriter

bulunan sütündeki maksimum değerdir.

Tablo 8. Marcos metodu genişletilmiş karar matrisi
Table 8. Marcos method extended decision matrix

Doğal elyaflar	Çekme dayanımı	Young modülü	Yüzde uzama	Nem içeriği	Fiyat	Yoğunluk
Abaka elyaf	621,500	32,350	2,900	14,000	0,345	1,500
Bambu elyaf	566,000	53,000	4,650	14,000	0,500	0,850
Muz elyaf	721,500	29,500	5,500	10,500	0,230	1,350
Hindistan cevizi elyaf	175,000	6,000	20,000	10,000	0,300	1,200
Pamuk elyaf	442,000	8,000	6,000	33,500	1,800	1,210
Keten elyaf	689,000	60,000	2,100	7,000	3,110	1,380
Kenevir elyaf	845,000	45,000	3,050	8,000	1,550	1,350
Jüt elyaf	480,000	37,500	2,300	12,000	0,926	1,230
Kenaf elyaf	612,500	41,000	4,800	9,100	0,378	1,200
Ananas elyaf	898,500	71,000	2,000	14,000	0,500	1,500
Rami elyaf	669,000	94,700	3,000	14,500	2,000	1,440
Sisal elyaf	681,000	15,500	2,450	11,000	0,650	1,200
AI	898,500	94,700	20,000	7,000	0,230	0,850
AAI	175,000	6,000	2,000	33,500	3,110	1,500

Tablo 9. Marcos metodu fayda fonksiyonları ve performans sıralamaları
Table 9. Marcos method utility functions and performance rankings

Doğal elyaflar	S_i	K_i^-	K_i^+	$f(K^-)$	$f(K^+)$	$f(K)$	Doğal elyaflar	Sıra
Abaka elyaf	0,48009	2,42281	0,48009	0,16538	0,83462	0,46485	Muz elyaf	1
Bambu elyaf	0,56226	2,83750	0,56226	0,16538	0,83462	0,54442	HC elyaf	2
Muz elyaf	0,60691	3,06284	0,60691	0,16538	0,83462	0,58765	Bambu elyaf	3
HC elyaf	0,56812	2,86709	0,56812	0,16538	0,83462	0,55009	Kenaf elyaf	4
Pamuk elyaf	0,31956	1,61268	0,31956	0,16538	0,83462	0,30942	Ananas elyaf	5
Keten elyaf	0,50974	2,57249	0,50974	0,16538	0,83462	0,49357	Kenevir elyaf	6
Kenevir elyaf	0,51738	2,61100	0,51738	0,16538	0,83462	0,50096	Rami elyaf	7
Jüt elyaf	0,41792	2,10910	0,41792	0,16538	0,83462	0,40466	Keten elyaf	8
Kenaf elyaf	0,56136	2,83297	0,56136	0,16538	0,83462	0,54355	Abaka elyaf	9
Ananas elyaf	0,56092	2,83074	0,56092	0,16538	0,83462	0,54312	Sisal elyaf	10
Rami elyaf	0,51427	2,59534	0,51427	0,16538	0,83462	0,49795	Jüt elyaf	11
Sisal elyaf	0,44299	2,23558	0,44299	0,16538	0,83462	0,42893	Pamuk elyaf	12
AI	1,00000							
AAI	0,19815							

Tablo 9’da doğal elyaf türlerinin fayda değerleri ve fayda fonksiyon sonuçları tablosal olarak belirtilmiştir. Diğer yöntemlerden farklı olarak fayda fonksiyonu kavramının ortaya konduğu Marcos yöntemi ile, kriter ve alternatifler arasında fayda fonksiyonu ve fayda değerleri kavramları kullanması ve alternatifleri çok kriterli yöntem aşamaları ile değerlendirmesinden dolayı Tablo 9’da gösterilen sıralama elde edilmiştir.

3.1. Yaklaşımların değerlendirilmesi ve borda sayım yöntemi uygulaması

3.1. Evaluation of approaches and application of borda count method

Hafif silah gövdelerinde kullanılan PA 66 esaslı plastik malzemeler için en iyi takviye malzemesi seçiminde Saw, Topsis, Marcos yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan yöntemler neticesinde her yöntem için uygulama adımları oluşturulmuş ve alternatifler için sıralamalar belirlenmiştir. Tablo 10'da gösterildiği gibi Marcos ve Saw yöntemleri ile elde edilen alternatif sıralamalarında tam olarak aynı sıralama elde edilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere her iki yöntem için ilk 3 alternatif sıralaması sırasıyla muz elyaf, hindistan cevizi elyaf, bambu elyaf şeklinde olmuştur. Topsis yönteminde hindistan cevizi elyaf, muz elyaf, kenaf elyaf olarak belirlenmiştir. Her 3 yöntemde pamuk elyaf, ananas elyaf, rami elyaf malzemeleri aynı sıralamaya sahip olduğu görülmüştür. Bu sebeple yöntemler arasında farklı sıralamalar olduğu tespit edilmiştir. Takviye malzemelerinde net bir kanıya varmak önemli olduğu için Tablo 10'da görselleştirildiği gibi sıralamaların bütünleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu noktada tüm yöntemler için Borda Sayım yöntemi uygulanarak tek tip bir sıralama oluşturulmuştur. Borda Sayım yöntemi sonucunda elde edilen alternatif sıralaması muz elyaf, hindistan cevizi elyaf, bambu elyaf, kenaf elyaf, ananas elyaf, kenevir elyaf, rami elyaf, abaka elyaf, keten elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf ve pamuk elyaf şeklinde gerçekleşmiştir. Yöntemler arasındaki korelasyonu belirlemek amacıyla Tablo 11'de şematize edilen durum $\rho_{\text{Saw-Topsis}}=0.902$, $\rho_{\text{Saw-Marcos}}=1$, $\rho_{\text{Marcos-Topsis}}=0.902$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 10. Yöntemlerin spearman sıralama korelasyon katsayıları
Table 10. Spearman rank correlation coefficients of the methods

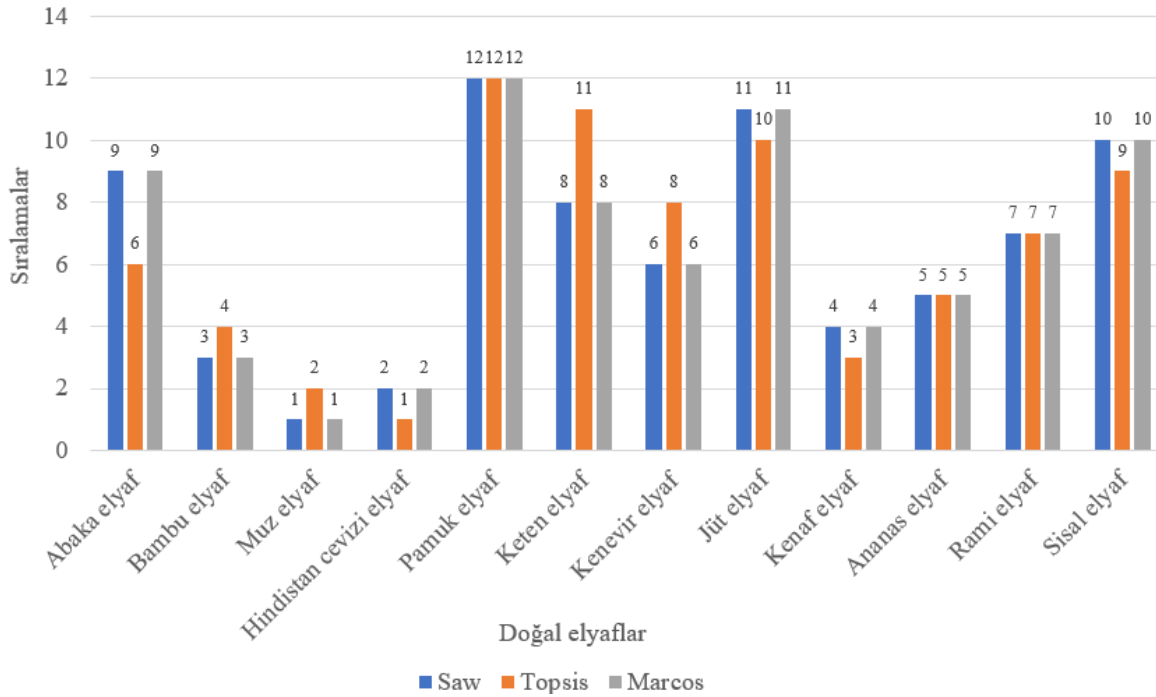
$\rho_{\text{Saw-Topsis}}$	$\rho_{\text{Saw-Marcos}}$	$\rho_{\text{Marcos-Topsis}}$
0,902	1	0,902

Tablo 11. Yöntemler arası sıralamaların oluşturulması

Table 11. Establishing of ranking between methods

Yöntemler	Saw		Topsis		Marcos		Borda sayım	
	Sıra	Borda değeri	Sıra	Borda değeri	Sıra	Borda değeri	Toplam borda skoru	Sıra
Abaka elyaf	9	3	6	6	9	3	12	8
Bambu elyaf	3	9	4	8	3	9	26	3
Muz elyaf	1	11	2	10	1	11	32	1
Hindistan cevizi elyaf	2	10	1	11	2	10	31	2
Pamuk elyaf	12	0	12	0	12	0	0	12
Keten elyaf	8	4	11	1	8	4	9	9
Kenevir elyaf	6	6	8	4	6	6	16	6
Jüt elyaf	11	1	10	2	11	1	4	11
Kenaf elyaf	4	8	3	9	4	8	25	4
Ananas elyaf	5	7	5	7	5	7	21	5
Rami elyaf	7	5	7	5	7	5	15	7
Sisal elyaf	10	2	9	3	10	2	7	10

Uygulanan yaklaşımlarına bakıldığında tercih edilen çok kriterli karar verme yöntemlerinin çalışmamız ile benzer sonuçlar oluşturduğu görülmektedir. Bulanık ortamda en güvenli kısa yol probleminde çözümler üreten çalışmada çok kriterli karar verme yöntemleri ve optimizasyon modeli öngörülmüştür. F-Saw, F-Topsis, F-Edas yöntemlerinin tercih edildiği çalışmada bulanık üçgensel sayılar kullanılarak F-Saw ile F-Topsis arasında kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. F-Saw ile F-Topsis yöntemlerinin oluşturulan 11 senaryoda %99 oranında önemli bir korelasyona sahip olduğu görülmüştür (Özçelik, 2022). Başka bir çalışmada ise 7.4 km ve 38 bölümden oluşan bir anayol ağının risk dereceleri belirlenmiştir. Üçgensel sayılar ile F-Marcos ile F-Piprecia metotları uygulanmıştır. Hesaplanan sonuçlar neticesinde F-Marcos, F-Saw ve F-Topsis yöntemleri ile kıyaslanarak doğrulama testleri yapılmıştır. Yöntemlerde ise 38 vaka içinde 15 vaka sıralamasında değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. F-Marcos, F-Saw ve F-Topsis ile karşılaştırıldığında küçük farklılıklar görülmüş ve çalışmanın doğruluğunu saptamışlardır (Stankovic vd., 2020).



Şekil 2. Tüm yöntemlerin sıralama sonuçlarının karşılaştırılması
Figure 2. Comparison of ranking results of all methods

4. Sonuçlar ve öneriler

4. Conclusions and recommendations

Polimer matrisli kompozit malzemeler, son yıllarda üretim proseslerinde sıklıkla kullanılan komplike malzeme haline gelmiştir. Bu malzemeler sahip olduğu kimyası, doğası, yapısı gereği birçok üretim yöntemlerinin ortak alanını oluşturmaktadır. Bu üretim yöntemlerinde son zamanlarda mevcut polimer matrisli kompozitler takviye elemanları ile güçlendirilmektedir. Bununla birlikte takviye elemanları içerisinde en çok kullanılan cam elyaf ve karbon elyaftır. Ancak son yıllarda karbon ve cam elyaf üzerine çalışmalar artmakla birlikte doğal elyaf takviye çalışmalarına da ağırlık verildiği görülmektedir. Ayrıca polimer malzemeler arasında en yaygın kullanılan türlerinden biri olan PA 66 malzemesi için bu çalışmada 12 farklı doğal elyaf takviye malzemesi seçilmiştir. Bu çalışmada ise hafif silah gövdelerinde kullanılan PA 66 malzemesine doğal elyaf takviye malzemeleri üzerine bir seçim çalışması yapılmıştır. Yapılan seçim ve sıralama çalışmasında çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Kriter ve alternatifler belirlenerek karar matrisi oluşturulmuştur. Alternatifler 12 tane doğal elyaf ile 6 tane kriterdir. Alternatifler; muz elyaf, hindistan cevizi elyaf, bambu elyaf, kenaf elyaf, ananas elyaf, kenevir elyaf, rami elyaf, abaka elyaf, keten elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf ve pamuk elyaftır. Kriterler; çekme dayanımı, yoğunluk, yüzde uzama, nem içeriği, Young modülü ve fiyat kriterleridir. Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra Saw, Topsis ve Marcos yöntemleri uygulanarak 12 doğal elyaf arasında sıralama işlemi yapılmıştır. Saw yöntemi sonuçlarına göre sırasıyla muz elyaf, hindistan cevizi elyafı, bambu elyaf, keten elyaf, ananas elyaf, kenevir elyaf, rami elyaf, keten elyaf, abaka elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf, pamuk elyaf şeklinde oluşmuştur. Topsis yöntemi sonuçlarına göre doğal elyaflar hindistan cevizi elyaf, muz elyaf, kenaf elyaf, bambu elyaf, ananas elyaf, abaka elyaf, rami elyaf, kenevir elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf, keten elyaf, pamuk elyaf şeklindedir. Marcos yöntemi sonuçlarına göre muz elyaf, hindistan cevizi elyaf, bambu elyaf, kenaf elyaf, ananas elyaf, kenevir elyaf, rami elyaf, keten elyaf, abaka elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf, pamuk elyaf olarak belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara bütünsel olarak bakıldığında Saw ve Marcos yöntemleri arasında $\rho_{\text{Saw-Marcos}}=1$ ile tam ve pozitif bir ilişki hesaplanmıştır. $\rho_{\text{Saw-Topsis}}=0,902$ ve $\rho_{\text{Marcos-Topsis}}=0,902$ olarak pozitif ve kuvvetli bir ilişki belirlenmiştir. Ayrıca, yöntemlerin sıralama sonuçlarına bakıldığında ortak bir sıralama elde edilmediği görülmüştür. Bu sebeple Borda Sayım yöntemi kullanılarak ortak bir sıralama oluşturulmuş ve en uygun takviye malzemesi kararı bu şekilde verilmiştir. Borda Sayım yöntemi ile elde edilen sıralama muz elyaf, hindistan cevizi elyaf, bambu elyaf, kenaf elyaf, ananas elyaf, kenevir elyaf, rami elyaf, abaka elyaf, keten elyaf, sisal elyaf, jüt elyaf ve pamuk elyaf olarak ortaya konmuştur. Bunlarla birlikte kullandığımız yöntemleri uygulayarak sonuçlar üreten çalışmalara yer verilerek ortak ve benzer sonuçlar bulunduğu görülmüştür. Sonuç

olarak hafif silah polimer gövde tasarımında kullanılacak en uygun doğal takviye malzemesi belirlenmiştir. Mevcut çalışma polimer malzeme kullanılan çalışma alanlarında uygulanabilir. Aynı zamanda mevcut çalışmada kullanılan klasik sayılar yerine üçgensel sayılar, yamuk sayılar, bipolar sayılar, küresel sayılar kullanılarak bulanık karar verme yöntemleri ve duyarlılık analizleri ile çalışma genişletilerek daha kapsamlı bir çalışma yürütülebilir.

Yazarların katkısı

Author contribution

Yazarlar arasında Yaşam Kandemir, çalışmanın veri toplama, uygulama ve yazım çalışmaları aşamasında; Temel Varol, yazım çalışmaları, konu ile problemin belirlenmesi ve danışmanlık konusunda, Mustafa Aslan danışmanlık desteği konusunda katkı sundular.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

Acknowledgement

Çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için vermiş oldukları destekler için Yükseköğretim Kurumu (YÖK), Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Trabzon Silah Sanayi A.Ş. (TİSAŞ) ve Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederiz. C119073 kodlu ve "Yenilikçi Hafif Silah Teknolojilerinin Geliştirilmesi ve Bu Alana Yönelik Nitelikli Araştırmacıların Yetiştirilmesi" isimli proje, Tübitak 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu ve TİSAŞ tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

References

- Akyüz, G., & Aka, S. (2017). Çok kriterli karar verme teknikleriyle tedarikçi performansı değerlendirmede toplamsal bir yaklaşım. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 15(2), 28-46. <https://doi.org/10.11611/yead.277893>
- Amarnath, K., Babu, K.J., & Kumar, M.S. (2022). Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for selection of optimal flax fiber reinforced components. *Positif Journal*, 22(8), 38-50.
- Aslan, M. (2012). *Characterisation of flax fibers and flax fiber composites being cellulose based sources of materials* [Doktora Tezi, Danimarka Teknik Üniversitesi].
- Bhadra, D., & Dhar, N.R. (2022). Selection of the natural fiber for sustainable applications in aerospace cabin interior using fuzzy mcdm model. *Materialia*, 21, 101270. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101270>
- Bhardwaj, S., & Sharma, R. (2021). Natural fiber composites: an opportunity for farmers. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 5(5), 509-514. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.5876>
- Ecer, F., Büyükaslan, A., & Zolfani, S.H. (2022). Evaluation of cryptocurrencies for investment decisions in the era of industry 4.0: a borda count-based intuitionistic fuzzy set extensions edas-mairca-marcos multi-criteria methodology. *Axioms*, 11(8), 404. <https://doi.org/10.3390/axioms11080404>
- Gençtürk, M., Senal, S., & Aksoy, E. (2021). Covid-19 pandemisinin katılım bankaları üzerine etkilerinin bütünleşik critic-marcos yöntemi ile incelenmesi. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 92, 139-160. <https://doi.org/10.25095/mufad.937185>

- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S.K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>
- Kalagi, G.R., Patil, R., & Nayak, N. (2018). Experimental study on mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composite materials for wind turbine blades. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2588-2596. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.043>
- Karslı, M., Sert, Y., & Küçükömeroğlu T. (2020). Tabanca gövdeleri için polimer kompozit malzeme geliştirilmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 38, 131-157.
- Kiruthika, A.V. (2017). A review on physico-mechanical properties of bast fibre reinforced polymer composites. *Journal of Building Engineering*, 9, 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.12.003>
- Li, H., Cao, Y., & Su, L. (2022). Pythagorean fuzzy multi-criteria decision-making approach based on spearman rank correlation coefficient. *Soft Computing*, 26(6), 3001-3012. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06615-2>
- Mansor, M.R., Sapuan, S.M., Zainudin, E.S., Nuraini, A.A., & Hambali, A. (2013). Hybrid natural and glass fibers reinforced polymer composites material selection using analytical hierarchy process for automotive brake lever design. *Materials & Design*, 51, 484-492. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.072>
- Özçelik, G. (2022). The attitude of mcdm approaches versus the optimization model in finding the safest shortest path on a fuzzy network. *Expert Systems with Applications*, 203, 117472. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117472>
- Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural fibre composites and their applications: a review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66. <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>
- Raffic, N.M., Babu, K.G., Srinivasan, S., Thirumurugaveerakumar, S., & Kanna, R.B. (2021). Experimental investigation on surface roughness and cutting tool workpiece interface temperature for aa6061 using critic and topsis techniques. *Materials Today: Proceedings*, 47(19), 6858-6863. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.145>
- Saba, N., Paridah, M.T., & Jawaid, M. (2015). Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: a review. *Construction and Building Materials*, 76, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043>
- Sanjay, M.R., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamaraiannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566-581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>
- Shaharuzaman, M.A., Sapuan, S.M., Mansor, M.R., & Zuhri, M.Y.M. (2018). Thermoplastic materials selection using vikor method for automotive part. *Colloquium of Advanced Materials and Mechanical Engineering Research*, 45(2), 75-77.
- Shaharuzaman, M.A., Sapuan, S.M., Mansor, M.R., & Zuhri, M.Y.M. (2019). Decision support strategy in selecting natural fiber materials for automotive side-door impact beam composites. *Journal of Renewable Materials*, 7(10), 997-1010. <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.07529>
- Singh, K., Rinawa, M.L., Ahamad, N., Chaudhary, V., Das, P.P., Gupta, S., & Gupta, P. (2022). Optimization of tribological performance of natural fibers/epoxy composites using anova & topsis approach. *Materials Today: Proceedings*, 56(5), 2549-2555. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.112>
- Sood, M., & Dwivedi, G. (2018). Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: a review. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 775-783. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005>
- Spearman, C. (1987). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 100, 441-471. <https://doi.org/10.2307/1422689>
- Stankovic, M., Stevic, Z., Das, D.K., Subotic, M., & Pamucar, D.A. (2020). New fuzzy marcos method for road traffic risk analysis. *Mathematics*, 8(3), 457. <https://doi.org/10.3390/math80304>
- Stevic, Z., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new mcdm method: measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (marcos). *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>

The new numerical solutions of conformable time fractional generalized Burgers equation with proportional delay

Oransal gecikmeli uyumlu zaman kesirli mertebeden genelleştirilmiş Burgers denkleminin yeni sayısal çözümleri

Abdullah KARTAL^{1,a} , Halil ANAÇ^{*2,b} , Ali OLGUN^{3,c} 

¹Kırıkkale University, Faculty of Science and Letters, Department of Mathematics, 71450, Kırıkkale

²Gumushane University, Torul Vocational School, Department of Computer Technologies, 29800, Gümüşhane

³Kırıkkale University, Faculty of Science and Letters, Department of Mathematics, 71450, Kırıkkale

• Received: 12.04.2022

• Accepted: 02.09.2023

Abstract

The conformable time-fractional partial differential equations with proportional delay are studied using two new methods: the conformable fractional q -homotopy analysis transform method and the conformable Shehu homotopy perturbation method. The numerical solutions to this equation are graphed. Numerical simulations show that the proposed techniques are effective and trustworthy.

Keywords: Conformable q -homotopy analysis transform method, Conformable time-fractional generalized Burgers equation, Proportional delay.

Öz

Oransal gecikmeli uyumlu zaman-kesirli kısmi diferansiyel denklemler, iki yeni yöntem olan uyumlu kesirli q -homotopi analizi dönüşüm yöntemi ve uyumlu Shehu homotopi pertürbasyon yöntemi kullanılarak incelenir. Bu denklemin sayısal çözümleri grafiklerle gösterilmiştir. Sayısal simülasyonlar, önerilen tekniklerin etkili ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Uyumlu q -homotopi analiz dönüşümü metodu, Uyumlu kesirli mertebeden genelleştirilmiş Burgers denklemi, Oransal gecikme.

*Halil ANAÇ; halilanac@gumushane.edu.tr

1. Introduction

Fractional calculus (FC) extends integer order calculus to arbitrary order. It was discussed in an early communication between the eminent mathematicians Leibniz and L'Hospital around 1695. Because of its ability to provide an exact description for numerous sorts of non-linear events, numerous authors have begun to investigate fractional calculus in recent years. Fractional order differential equations are a type of differential equation that has non-local and genetic material property consequences. Many prominent academics investigated and defined the concept of fractional calculus, developing revolutionary definitions that provided the groundwork for fractional calculus (Liouville, 1832; Riemann, 1896; Caputo, 1969; Miller&Ross, 1993; Podlubny, 1999; Baleanu et al. 2012; Povstenko, 2015). Fractional partial differential equations are now commonly used in the creation of nonlinear models and the study of dynamical systems. Many phenomena, including chaos theory (Baleanu et al., 2017) financial models (Sweilam et al., 2017), a noisy environment (Liu et al., 2015), optics (Esen et al., 2018), and others, have been associated with fractional-order calculus theory (Veerasha et al., 2019a; Caponetto et al., 2010; Prakash et al., 2019; Veerasha et al., 2019b; Atangana et al., 2022; Shahzad et al., 2023; Iqbal et al., 2023; Iyanda et al., 2023, Hasan et al., 2023; Liaqat et al., 2023). The solutions of fractional differential equations are crucial in describing the properties of natural nonlinear systems. We apply a number of analytical and numerical techniques to obtain exact solutions to fractional differential equations characterizing nonlinear processes.

The investigation deals with the numerical solution of conformable time-fractional partial differential equations with proportional delay defined by

$$\begin{cases} D_t^\alpha w(x, t) = \psi \left(x, w(\rho_0 x, \sigma_0 t), \frac{\partial w(\rho_1 x, \sigma_1 t)}{\partial x}, \dots, \frac{\partial^m w(\rho_m x, \sigma_m t)}{\partial x^m} \right), \\ w^{(k)}(x, 0) = \varphi_k(x). \end{cases} \quad (1)$$

where $\rho_i, \sigma_i \in (0,1)$ for all $i \in N$, φ_k is initial value, ψ differential operator and D_t^α is conformable time-fractional operator.

There are few publications about time fractional partial differential equations with proportional delay in the literature. These include the Chebyshev pseudospectral method (Zubik-Kawal, 2000), the homotopy analysis method (Alkan, 2022), the spectral collocation and waveform relaxation methods (Jackiewicz&Zubik-Kawal, 2006), and the iterated pseudospectral method (Mead&Zubik-Kawal, 2005). Abazari & Ganji (2011) were able to find approximate solutions to PDEs utilizing RDTM. These solutions involved proportional delay. Abazari & Ganji (2014) employed DTM to obtain analytical solutions to nonlinear integro-differential equations with proportional delay. These answers were obtained by solving the equations using DTM. Tanthanuch (2012) was successful in solving the non-homogeneous inviscid Burgers equation with proportional delay by employing a method known as group analysis. Analytical solutions to TFPDE with proportionate delay were found by using the homotopy perturbation approach by Sakar et al. (2016) and Biazar & Ghanbari (2012). Chen & Wang (2010) used the variational iteration method to solve a neutral functional-differential problem with proportional delays. Singh & Kumar (2017) accomplished their goal of finding an alternate approximation solution to the initial valued autonomous system of TFPDE with proportional delay by employing an additional variational iteration approach, abbreviated as AVIM. The fundamental objective of this research is to make two novel methodological suggestions: the conformable q-homotopy analysis transform method (Cq-HATM) and the conformable Shehu homotopy perturbation method (CSHPM).

2. Preliminaries

Now let's give the definitions to be used in the study.

Definition 2.1. Let a function $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$. Then, the conformable fractional derivative of f order α is described by (Khalil et al., 2014; Abdeljawad, 2015; Ala et al., 2020; Gözütok et al., 2019)

$$T_\alpha(f)(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x+\varepsilon x^{1-\alpha})-f(x)}{\varepsilon}, \quad (2)$$

for all $x > 0, \alpha \in (0, 1]$.

Theorem 2.1. Let $\alpha \in (0, 1]$ and f, g be α –differentiable at a point $x > 0$. Then (Khalil et al., 2014; Abdeljawad, 2015; Gözütok and Gözütok, 2017)

(i) $T_\alpha(af + bg) = aT_\alpha(f) + bT_\alpha(g)$, for all $a, b \in \mathbb{R}$,
(3)

(ii) $T_\alpha(x^p) = px^{p-1}$, for all $p \in \mathbb{R}$, (4)

(iii) $T_\alpha(\lambda) = 0$, for all constant functions $f(t) = \lambda$, (5)

(iv) $T_\alpha(fg) = fT_\alpha(g) + gT_\alpha(f)$, (6)

(v) $T_\alpha\left(\frac{f}{g}\right) = \frac{gT_\alpha(f) - fT_\alpha(g)}{g^2}$. (7)

Definition 2.2. Let $0 < \alpha \leq 1$, $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be real valued function. Then, the conformable fractional Shehu transform (CFST) of order α of f is defined by (Benattia & Belghaba, 2021)

$${}_cS_\alpha[f(t)] = V_\alpha(s; u) = \int_0^\infty \exp\left(\frac{-st^\alpha}{u^\alpha}\right) f(t)t^{\alpha-1} dt. \tag{8}$$

Definition 2.3 Let $0 < \alpha \leq 1$, $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ be real valued function. The conformable Shehu transform for the conformable fractional-order derivative of the function $f(t)$ is described by (Benattia & Belghaba, 2021)

$$V_\alpha[T_\alpha f(t)](v) = \frac{s}{u} V_\alpha(s; u) - f(0). \tag{9}$$

3. New numerical methods

We will introduce new methods.

3.1. Conformable q-homotopy analysis transform method

Consider the conformable time-fractional order nonlinear partial differential equation (CTFNPDE) with proportional delay to explain the fundamental idea of Cq-HATM:

$${}_tT_\alpha w(x, t) + Mw(\rho_i x, \sigma_i t) + Nw(\rho_i x, \sigma_i t) = f(x, t), t > 0, n - 1 < \alpha \leq n, \tag{10}$$

where M is a linear operator, N is a nonlinear operator, $f(x, t)$ is a source term, $\rho_i, \sigma_i \in (0, 1)$ and ${}_tT_\alpha$ is a conformable fractional derivative of order α .

Applying the conformable Laplace transform to Eq. (10) and utilizing the initial condition, then, we have

$$s\mathcal{L}_\alpha[w(x, t)] - w(x, 0) + \mathcal{L}_\alpha[Mw(\rho_i x, \sigma_i t)] + \mathcal{L}_\alpha[Nw(\rho_i x, \sigma_i t)] = \mathcal{L}_\alpha[f(x, t)]. \tag{11}$$

Rearranging the last equation, then we get

$$\mathcal{L}_\alpha[w(x, t)] - \frac{1}{s}w(x, 0) + \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[Mw(\rho_i x, \sigma_i t)] + \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[Nw(\rho_i x, \sigma_i t)] - \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[f(x, t)] = 0. \tag{12}$$

With the help of HAM, we can describe the nonlinear operator for real function $\varphi(x, t; q)$ as follows:

$$N[\varphi(x, t; q)] = \mathcal{L}_\alpha[\varphi(x, t; q)] - \frac{1}{s}\varphi(x, t; q) (0^+) + \frac{1}{s}(\mathcal{L}_\alpha[M\varphi(\rho_i x, \sigma_i t; q)] + \mathcal{L}_\alpha[N\varphi(\rho_i x, \sigma_i t; q)] - \mathcal{L}_\alpha[f(x, t)]), \tag{13}$$

where $q \in \left[0, \frac{1}{n}\right]$.

We construct a homotopy as follows:

$$(1 - nq)\mathcal{L}_\alpha[\varphi(x, t; q) - w_0(x, t)] = hqH(x, t)N[\varphi(\rho_i x, \sigma_i t; q)], \quad (14)$$

where, $h \neq 0$ is an auxiliary parameter and \mathcal{L}_α represents conformable Laplace transform. For $q = 0$ and $q = \frac{1}{n}$, the results of Eq. (14) are as follows:

$$\varphi(x, t; 0) = w_0(x, t), \varphi\left(x, t; \frac{1}{n}\right) = w(x, t), \quad (15)$$

Thus, by amplifying q from 0 to $\frac{1}{n}$, then the solution $\varphi(x, t; q)$ converges from $w_0(x, t)$ to the solution $w(x, t)$.

Using the Taylor theorem around q and then expanding $\varphi(x, t; q)$, we get

$$\varphi(x, t; q) = w_0(x, t) + \sum_{i=1}^{\infty} w_m(x, t)q^m, \quad (16)$$

where

$$w_m(x, t) = \frac{1}{m!} \frac{\partial^m \varphi(x, t; q)}{\partial q^m} \Big|_{q=0}. \quad (17)$$

Eq. (16) converges at $q = \frac{1}{n}$ for the appropriate $w_0(x, t)$, n and h . Then, we have

$$w(x, t) = w_0(x, t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x, t) \left(\frac{1}{n}\right)^m. \quad (18)$$

If we differentiate the zeroth order deformation Eq. (14) m -times with respect to q and we divide by $m!$, respectively, then for $q = 0$, we acquire

$$\mathcal{L}_\alpha[w_m(x, t) - k_m w_{m-1}(x, t)] = hH(x, t)\mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1}), \quad (19)$$

where the vectors are described by

$$\vec{w}_m = \{w_0(x, t), w_1(x, t), \dots, w_m(x, t)\}. \quad (20)$$

Applying the inverse conformable Laplace transform to Eq. (20), we get

$$w_m(x, t) = k_m w_{m-1}(x, t) + h\mathcal{L}_\alpha^{-1}[H(x, t)\mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1})], \quad (21)$$

where

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1}) = & \mathcal{L}_\alpha[w_{m-1}(x, t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right) \frac{1}{s} w_0(x, t) + \frac{1}{s} \mathcal{L}_\alpha[Mw_{m-1}(\rho_i x, \sigma_i t) \\ & + H_{m-1}(x, t) - f(x, t)], \end{aligned} \quad (22)$$

and

$$k_m = \begin{cases} 0, & m \leq 1, \\ n, & m > 1. \end{cases} \quad (23)$$

Here, H_m is homotopy polynomial and presented by

$$H_m = \frac{1}{m!} \frac{\partial^m \varphi(x,t;q)}{\partial q^m} \Big|_{q=0} \text{ and } \varphi(x,t;q) = \varphi_0 + q\varphi_1 + q^2\varphi_2 + \dots \quad (24)$$

Using Eqs. (21) - (22), we get

$$w_m(x,t) = (k_m + h)w_{m-1}(x,t) - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right) \frac{1}{s} w_0(x,t) + h\mathcal{L}_\alpha^{-1} \left[\left(\frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[Mw_{m-1}(\rho_i x, \sigma_i t) + H_{m-1}(x,t) - f(x,t)]\right) \right]. \quad (25)$$

When q-HATM is used, the series solution is given by

$$w(x,t) = \sum_{i=0}^{\infty} w_m(x,t). \quad (26)$$

3.2. Conformable Shehu homotopy perturbation method

We analyze the CTFNPDE with proportional delay:

$${}_t T_\alpha w(x,t) + Mw(\rho_i x, \sigma_i t) + Nw(\rho_i x, \sigma_i t) = f(x,t), t > 0, n-1 < \alpha \leq n, \quad (27)$$

with initial condition

$$w(x,0) = a(x), \quad (28)$$

where M is a linear operator, N is a nonlinear operator, $f(x,t)$ is a source term, $\rho_i, \sigma_i \in (0,1)$ and ${}_t T_\alpha$ is a conformable fractional derivative of order α .

Applying the conformable fractional Shehu transform to Eq. (27) and using the initial condition, then we get

$$\frac{s}{u} {}_c S_\alpha[w(x,t)] - \sum_{m=0}^{k-1} w(x,0) + {}_c S_\alpha[Mw(\rho_i x, \sigma_i t) + Nw(\rho_i x, \sigma_i t) - f(x,t)] = 0. \quad (29)$$

Eq. (29) is simplified, then we have

$${}_c S_\alpha[w(x,t)] - \frac{u}{s} a(x) + \frac{u}{s} {}_c S_\alpha[Mw(\rho_i x, \sigma_i t) + Nw(\rho_i x, \sigma_i t) - f(x,t)] = 0. \quad (30)$$

When Eq. (30) is rearranged, it is obtained as

$${}_c S_\alpha[w(x,t)] = \frac{u}{s} a(x) - \frac{u}{s} {}_c S_\alpha[Mw(\rho_i x, \sigma_i t) + Nw(\rho_i x, \sigma_i t) - f(x,t)]. \quad (31)$$

When the inverse conformable fractional Shehu transform is implemented to both sides of Eq. (31), we have

$$w(x,t) = A(x,t) - \left({}_c S_\alpha \right)^{-1} \left\{ \frac{u}{s} {}_c S_\alpha[Mw(\rho_i x, \sigma_i t) + Nw(\rho_i x, \sigma_i t)] \right\}, \quad (32)$$

where the term $A(x,t)$ emerges from the in-homogeneous term and initial conditions.

Applying the homotopy perturbation method yields

$$w(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} p^n w_n(x,t). \quad (33)$$

Now, let the nonlinear term be represented as

$$Nw(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} p^n H_n(w), \quad (34)$$

where $H_n(w)$ is defined by the form

$$H_n(w_0, w_1, \dots, w_n) = \frac{1}{n!} \frac{\partial}{\partial p^n} [N(\sum_{i=0}^{\infty} p^i w_i)]_{p=0}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (35)$$

Substituting the Eqs. (33)-(34) into Eq. (32), it is obtained as

$$\sum_{n=0}^{\infty} p^n w_n(x, t) = A(x, t) - p \left\{ ({}_c\mathcal{S}_\alpha)^{-1} \left[\frac{u}{s} {}_c\mathcal{S}_\alpha \{ M \sum_{n=0}^{\infty} p^n w_n(\rho_i x, \sigma_i t) + \sum_{n=0}^{\infty} p^n H_n(w) \} \right] \right\}. \quad (36)$$

Eq. (36) is the combination of the conformable fractional Shehu transform and the homotopy perturbation method. The coefficients of the same power terms of p is compared, then we have the following iterations.

$$p^0: w_0(x, t) = A(x, t), \quad (37)$$

$$p^1: w_1(x, t) = -({}_c\mathcal{S}_\alpha)^{-1} \left\{ \frac{u}{s} {}_c\mathcal{S}_\alpha [M w_0(\rho_i x, \sigma_i t) + H_0(w)] \right\}, \quad (38)$$

$$p^2: w_2(x, t) = -({}_c\mathcal{S}_\alpha)^{-1} \left\{ \frac{u}{s} {}_c\mathcal{S}_\alpha [M w_1(\rho_i x, \sigma_i t) + H_1(w)] \right\}, \quad (39)$$

$$p^3: w_3(x, t) = -({}_c\mathcal{S}_\alpha)^{-1} \left\{ \frac{u}{s} {}_c\mathcal{S}_\alpha [M w_2(\rho_i x, \sigma_i t) + H_2(w)] \right\}, \quad (40)$$

⋮

Thus, the series solution of the equation is obtained in the form

$$w(x, t) = \lim_{p \rightarrow 1} \sum_{m=0}^{\infty} p^m w_m(x, t) = w_0(x, t) + w_1(x, t) + w_2(x, t) + \dots \quad (41)$$

4. Application

Consider the conformable time-fractional Burgers equation with proportional delay (Sakar et al., 2016; Singh & Kumar, 2017)

$$\frac{\partial^\alpha w(x, t)}{\partial t^\alpha} = \frac{\partial^2 w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x^2} \frac{\partial w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t), \quad (42)$$

where $x, t \in [0, 1], 0 < \alpha \leq 1$, subject to initial condition

$$w(x, 0) = x^2. \quad (43)$$

Case (i) Cq-HATM solution

Implementing the conformable Laplace transform to Eq. (42) and using Eq. (43), then we get

$$\mathcal{L}_\alpha [w(x, t)] = \frac{1}{s} w(x, 0) + \frac{1}{s} \mathcal{L}_\alpha \left[\frac{\partial^2 w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x^2} \frac{\partial w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right], \quad (44)$$

We define the nonlinear operators by using Eq. (44), as

$$N[\varphi(x, t; q)] = \mathcal{L}_\alpha [\varphi(x, t; q)] - \frac{1}{s} x^2 - \frac{1}{s} \mathcal{L}_\alpha \left[\frac{\partial^2 w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x^2} \frac{\partial w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right]. \quad (45)$$

By applying the proposed algorithm, the $m - th$ order deformation equations are defined by

$$\mathcal{L}_\alpha [w_m(x, t) - k_m w_{m-1}(x, t)] = h \mathcal{R}_m [\vec{w}_{m-1}], \quad (46)$$

where

$$\mathcal{R}_m[\vec{w}_{m-1}] = \mathcal{L}_\alpha[\vec{w}_{m-1}(x, t)] - \left(1 - \frac{k_m}{n}\right) \frac{1}{s} x^2 - \frac{1}{s} \mathcal{L}_\alpha \left[\sum_{r=0}^{m-1} \frac{\partial^2 w_r(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x^2} \frac{\partial w_r(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w_{m-1}(x, t)}{\partial x} - w_{m-1}(x, t) \right]. \quad (47)$$

On applying inverse conformable Laplace transform to Eq. (46), then we have

$$w_m(x, t) = k_m w_{m-1}(x, t) + h \mathcal{L}_\alpha^{-1} \{ \mathcal{R}_m[\vec{w}_{m-1}] \}. \quad (48)$$

By the use of initial condition, then we get

$$w_0(x, t) = x^2. \quad (49)$$

To find the value of $w_1(x, t)$, putting $m = 1$ in Eq. (48), then we obtain

$$w_1(x, t) = h x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha}. \quad (50)$$

In the same way, if we put $m = 2$ in Eq. (48), we can obtain the value of $w_2(x, t)$

$$w_2(x, t) = (n + h) \left(h x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha} \right) - h^2 \left(\frac{x}{2.2^\alpha} - \frac{x}{4} - x^2 \right) \frac{t^{2\alpha}}{2\alpha^2}. \quad (51)$$

In this way, the other terms can be found. So, the Cq-HATM solution of the equaiton is given by

$$w(x, t) = w_0(x, t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x, t) \left(\frac{1}{n} \right)^m. \quad (52)$$

If we put $\alpha = 1, n = 1, h = -1$ in Eq. (52), then the obtained results $\sum_{m=1}^M w_m(x, t) \left(\frac{1}{n} \right)^m$ converges to the exact solution $w(x, t) = x^2 e^{-t}$ of the equation when $M \rightarrow \infty$.

Case (ii) CSHPM solution

Applying the conformable Shehu transform to Eq. (42) and using Eq. (43), then we get

$${}_c S_\alpha [w(x, t)] = \frac{u}{s} x^2 + \frac{u}{s} {}_c S_\alpha \left[\frac{\partial^2 w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x^2} \frac{\partial w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right]. \quad (53)$$

Applying the inverse conformable Shehu transform to Eq (53), then we obtain

$$w(x, t) = x^2 + \left({}_c S_\alpha \right)^{-1} \left\{ \frac{u}{s} {}_c S_\alpha \left[\frac{\partial^2 w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x^2} \frac{\partial w(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x} - \frac{1}{8} \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} - w(x, t) \right] \right\}. \quad (54)$$

Now HPM is applied, then we have

$$\sum_{m=0}^{\infty} p^m w_m(x, t) = x^2 + p \left[\left({}_c S_\alpha \right)^{-1} \left\{ \frac{u}{s} {}_c S_\alpha \left[\sum_{m=0}^{\infty} p^m H_m(w) - \frac{1}{8} \sum_{m=0}^{\infty} p^m \frac{\partial w_m(x, t)}{\partial x} - \sum_{m=0}^{\infty} p^m w_m(x, t) \right] \right\} \right] \quad (55)$$

We get to the first few components of $H_m(w)$ by

$$H_0(w) = \frac{\partial^2 w_0(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x^2} \frac{\partial w_0(\frac{x}{2}, \frac{t}{2})}{\partial x}, \quad (56)$$

$$H_1(w) = \frac{\partial^2 w_0(\frac{x}{2'})}{\partial x^2} \frac{\partial w_1(\frac{x}{2'})}{\partial x} + \frac{\partial^2 w_1(\frac{x}{2'})}{\partial x^2} \frac{\partial w_0(\frac{x}{2'})}{\partial x}, \tag{57}$$

$$H_2(w) = \frac{\partial^2 w_0(\frac{x}{2'})}{\partial x^2} \frac{\partial w_2(\frac{x}{2'})}{\partial x} + \frac{\partial^2 w_1(\frac{x}{2'})}{\partial x^2} \frac{\partial w_1(\frac{x}{2'})}{\partial x} + \frac{\partial^2 w_2(\frac{x}{2'})}{\partial x^2} \frac{\partial w_0(\frac{x}{2'})}{\partial x}, \tag{58}$$

$$\vdots \tag{59}$$

Comparing the coefficients of the same powers of p , then we have

$$p^0: w_0(x, t) = x^2, H_0(w) = \frac{x}{4}, \tag{60}$$

$$p^1: w_1(x, t) = -x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha}, H_1(w) = \frac{-xt^\alpha}{2\alpha 2^\alpha}, \tag{61}$$

$$p^2: w_2(x, t) = -h^2 \left(\frac{x}{2.2^\alpha} - \frac{x}{4} - x^2 \right) \frac{t^{2\alpha}}{2\alpha^2}, H_2(w) = -\frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{42^\alpha} - \frac{1}{8} - \frac{x}{2} \right) \frac{t^{2\alpha}}{.2^{2\alpha+1}\alpha^2} + \frac{xt^{2\alpha}}{.2^{2\alpha+2}\alpha^2} + \frac{h^2}{2} \frac{xt^{2\alpha}}{.2^{2\alpha+3}\alpha^2}, \tag{62}$$

As a result, the solution to Eq. (42) for CSHPM is given by

$$w(x, t) = x^2 - x^2 \frac{t^\alpha}{\alpha} - h^2 \left(\frac{x}{2.2^\alpha} - \frac{x}{4} - x^2 \right) \frac{t^{2\alpha}}{2\alpha^2}. \tag{63}$$

Figure 1 shows the graphs of Cq-HATM, exact solution and absolute error.

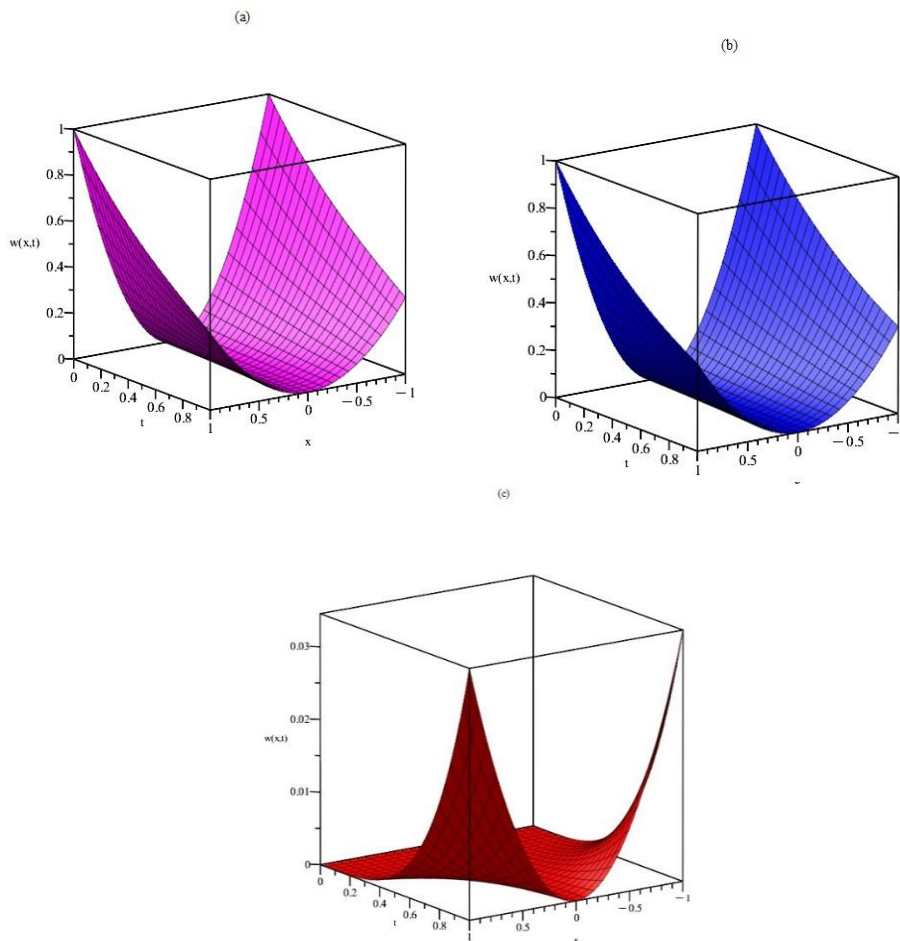


Figure 1. (a) Nature of Cq-HATM solution (b) Nature of exact solution (c) Nature of absolute error= $|w_{exact} - w_{Cq-HATM}|$ at $h = -1, n = 1, \alpha = 1$.

The graphs of Cq-HATM, exact solution, and absolute error are depicted in Figure 2

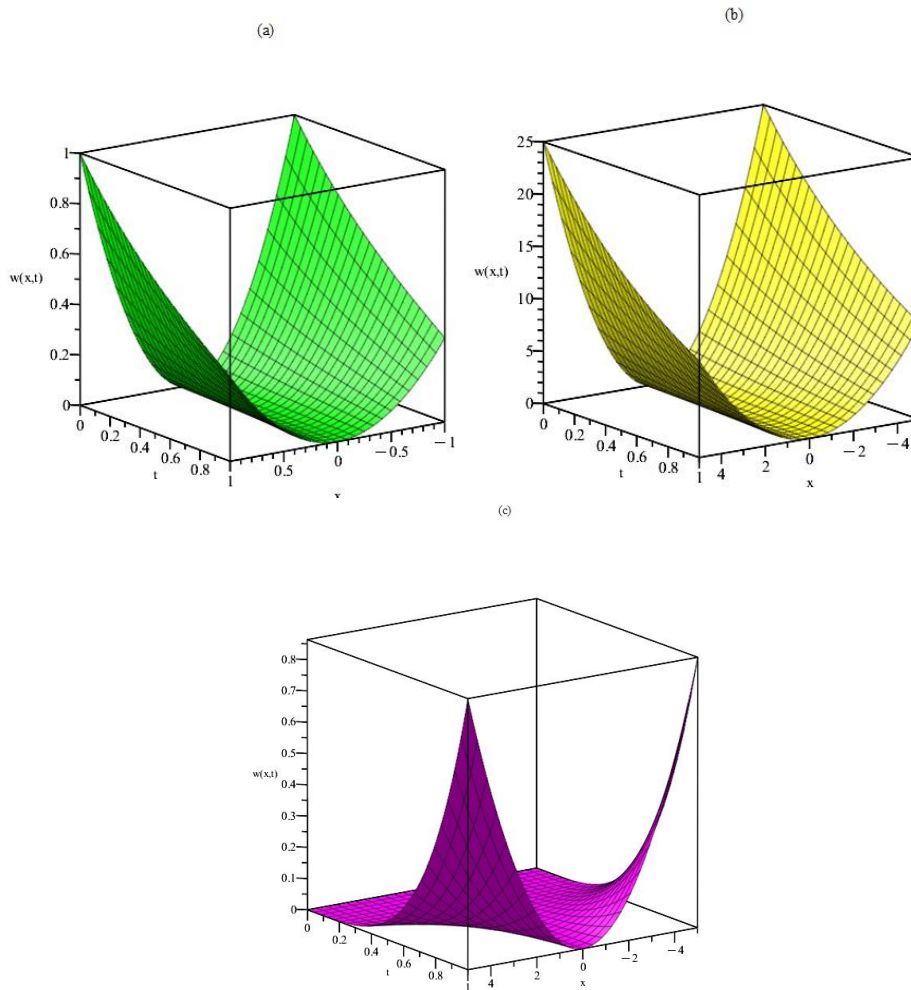


Figure 2. (a) Nature of CSHPM solution (b) Nature of exact solution (c) Nature of absolute error= $|w_{exact} - w_{CSHPM}|$ at $\alpha = 1$.

Figure 3 depicts comparison plots of Cq-HATM, CSHPM, and exact solutions for distinct α values.

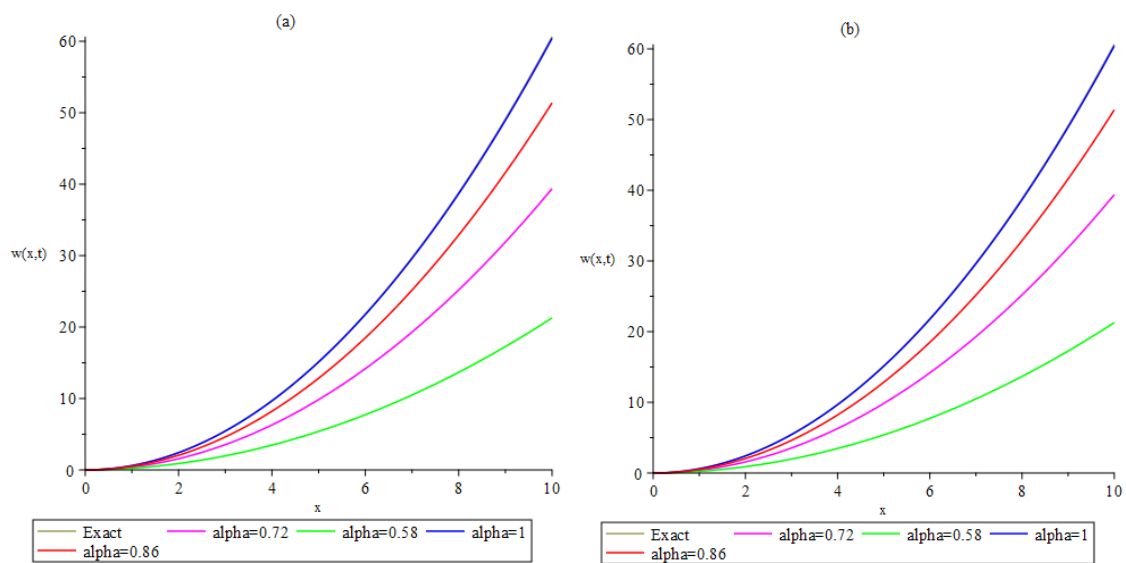


Figure 3. The comparison of the Cq-HATM solutions and exact solution (b) The comparison of the CSHPM solutions and exact solution at $h = -1, n = 1, t = 0.5$ with different α .

Table 1. Comparison of absolute error between Cq-HATM, CSHPM, and FVIM (Singh & Kumar, 2017) for Eq. (42) with $\alpha = 1$.

x		t				
		0.025	0.050	0.075	0.1	
Cq-HATM	0.25	1.0×10^{-9}	1.6×10^{-8}	8.1×10^{-8}	2.5×10^{-7}	
		CSHPM	1.0×10^{-9}	1.6×10^{-8}	8.1×10^{-8}	2.5×10^{-7}
		FVIM	5.8×10^{-5}	2.3×10^{-4}	5.3×10^{-4}	9.4×10^{-4}
Cq-HATM	0.50	4.0×10^{-9}	6.4×10^{-6}	3.2×10^{-7}	1.0×10^{-6}	
		CSHPM	4.0×10^{-9}	6.4×10^{-6}	3.2×10^{-7}	1.0×10^{-6}
		FVIM	2.3×10^{-4}	9.4×10^{-4}	2.1×10^{-3}	3.7×10^{-3}
Cq-HATM	0.75	9.1×10^{-9}	1.4×10^{-7}	7.3×10^{-7}	2.2×10^{-6}	
		CSHPM	9.1×10^{-9}	1.4×10^{-7}	7.3×10^{-7}	2.2×10^{-6}
		FVIM	5.2×10^{-4}	2.1×10^{-3}	4.7×10^{-3}	8.5×10^{-3}

5. Results and discussion

Table 1 evaluates the absolute error comparison between Cq-HATM, CSHPM, and FVIM for Eq. (42) with $\alpha = 1$ for the conformable time-fractional generalized Burgers equation (CTFGBE) with proportional delay. The 3D graphs of Cq-HATM, exact solution, and absolute error are depicted in Figure 1. Figure 2 depicts 3D graphs of Cq-HATM, exact solution, and absolute error. Figure 3 depicts a comparison of Cq-HATM, CSHPM, and exact solutions in 2D plots for various α values. It was observed that the proposed methods outlined in Table 1 yielded the same and even better outcomes than FVIM.

6. Conclusion

Conformable time-fractional partial differential equations with proportional delay are analyzed with Cq-HATM and CSHPM in this paper. In addition, graphs of the solutions to this equation for various values of α have been generated using the MAPLE program. The general structure of the surface graphs generated by the Maple software for Equation (42) is observed to vary. It is possible to conclude that the recently proposed methods for solving nonlinear conforming time-fractional partial differential equations with proportional delay are both advantageous and effective.

Authors contribution

The first author plotted the graphs using the Maple program. The second author obtained the solutions and composed the article. The article was edited by the third author.

Declaration of ethical code

The authors of this article declares that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Abazari, R., & Ganji, M. (2011). Extended two-dimensional DTM and its application on nonlinear PDEs with proportional delay. *International Journal of Computer Mathematics*, 88(8), 1749-1762. <https://doi.org/10.1080/00207160.2010.526704>
- Abazari, R., & Kilicman, A. (2014). Application of differential transform method on nonlinear integro-differential equations with proportional delay. *Neural Computing and Applications*, 24, 391-397. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1235-4>

- Abdeljawad, T. (2015). On conformable fractional calculus. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 279, 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.10.016>
- Ala, V., Demirbilek, U., & Mamedov, K. R. (2020). An application of improved Bernoulli sub-equation function method to the nonlinear conformable time-fractional SRLW equation. *AIMS Mathematics*, 5(4), 3751-3761. <https://doi.org/10.3934/math.2020243>
- Alkan, A. (2022). Improving Homotopy Analysis Method with An Optimal Parameter for Time-Fractional Burgers Equation. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 4(2), 117-134. <https://doi.org/10.55213/kmujens.1206517>
- Atangana, A., Akgül, A., Khan, M. A., & Ibrahim, R. W. (2022). Conformable derivative: A derivative associated to the Riemann-Stieltjes integral. *Progress in Fractional Differentiation and Applications*, 8(2), 321-348. <http://dx.doi.org/10.18576/pfda/080211>
- Baleanu, D., Diethelm, K., Scalas, E., & Trujillo, J. J. (2012). *Fractional calculus: models and numerical methods* (Vol. 3). World Scientific.
- Baleanu, D., Wu, G. C., & Zeng, S. D. (2017). Chaos analysis and asymptotic stability of generalized Caputo fractional differential equations. *Chaos, Solitons & Fractals*, 102, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.02.007>
- Benattia, M. E., & Belghaba, K. (2021). Shehu conformable fractional transform, theories and applications. *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, 18(1), 24-32. <https://dergipark.org.tr/en/pub/cankujse/issue/61974/852208>
- Biazar, J., & Ghanbari, B. (2012). The homotopy perturbation method for solving neutral functional-differential equations with proportional delays. *Journal of King Saud University-Science*, 24(1), 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.07.026>
- Caponetto, R., Dongola, G., Fortuna, L., & Gallo, A. (2010). New results on the synthesis of FO-PID controllers. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(4), 997-1007. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.05.040>
- Caputo, M. (1969). Elasticità e dissipazione (Elasticity and anelastic dissipation). *Zanichelli, Bologna*, 4, 98.
- Chen, X., & Wang, L. (2010). The variational iteration method for solving a neutral functional-differential equation with proportional delays. *Computers & Mathematics with Applications*, 59(8), 2696-2702. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.01.037>
- Esen, A., Sulaiman, T. A., Bulut, H., & Baskonus, H. M. (2018). Optical solitons to the space-time fractional (1+ 1)-dimensional coupled nonlinear Schrödinger equation. *Optik*, 167, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.015>
- Gözütok, U., Çoban, H., & SAGİROĞLU, Y. (2019). Frenet frame with respect to conformable derivative. *Filomat*, 33(6), 1541-1550. <https://doi.org/10.2298/fil1906541g>
- Jackiewicz, Z., & Zubik-Kowal, B. (2006). Spectral collocation and waveform relaxation methods for nonlinear delay partial differential equations. *Applied Numerical Mathematics*, 56(3-4), 433-443. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2005.04.021>
- Hasan, A., Akgül, A., Farman, M., Chaudhry, F., Sultan, M., & De la Sen, M. (2023). Epidemiological Analysis of Symmetry in Transmission of the Ebola Virus with Power Law Kernel. *Symmetry*, 15(3), 665. <https://doi.org/10.3390/sym15030665>
- Khalil, R., Al Horani, M., Yousef, A., & Sababheh, M. (2014). A new definition of fractional derivative. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 264, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.01.002>
- Iqbal, M. S., Yasin, M. W., Ahmed, N., Akgül, A., Rafiq, M., & Raza, A. (2023). Numerical simulations of nonlinear stochastic Newell-Whitehead-Segel equation and its measurable properties. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 418, 114618. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.114618>
- Iyanda, F. K., Rezazadeh, H., Inc, M., Akgül, A., Bashiru, I. M., Hafeez, M. B., & Krawczuk, M. (2023). Numerical simulation of temperature distribution of heat flow on reservoir tanks connected in a series. *Alexandria Engineering Journal*, 66, 785-795. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.10.062>

- Liaquat, M. I., Akgül, A., De la Sen, M., & Bayram, M. (2023). Approximate and exact solutions in the sense of conformable derivatives of quantum mechanics models using a novel algorithm. *Symmetry*, 15(3), 744. <https://doi.org/10.3390/sym15030744>
- Liouville, J. (1832). *Mémoire sur quelques questions de géométrie et de mécanique, et sur un nouveau genre de calcul pour résoudre ces questions*.
- Liu, D. Y., Gibaru, O., Perruquetti, W., & Laleg-Kirati, T. M. (2015). Fractional order differentiation by integration and error analysis in noisy environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(11), 2945-2960. <https://doi.org/10.1109/TAC.2015.2417852>
- Mead, J., & Zubik-Kowal, B. (2005). An iterated pseudospectral method for delay partial differential equations. *Applied Numerical Mathematics*, 55(2), 227-250. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2005.02.010>
- Miller, K. S., & Ross, B. (1993). *An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations*. Wiley.
- Podlubny, I. (1999). *Fractional differential equations, mathematics in science and engineering*. Academic Press.
- Povstenko, Y. (2015). *Linear fractional diffusion-wave equation for scientists and engineers* (p. 460). Cham: Springer International Publishing.
- Prakash, A., Veerasha, P., Prakasha, D. G., & Goyal, M. (2019). A homotopy technique for a fractional order multi-dimensional telegraph equation via the Laplace transform. *The European Physical Journal Plus*, 134, 1-18. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12411-y>
- Riemann, G. F. B. (1896). *Versuch Einer Allgemeinen Auffassung der Integration und Differentiation*. Gesammelte Mathematische Werke. Teubner, Leipzig.
- Sakar, M. G., Uludag, F., & Erdogan, F. (2016). Numerical solution of time-fractional nonlinear PDEs with proportional delays by homotopy perturbation method. *Applied Mathematical Modelling*, 40(13-14), 6639-6649. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.02.005>
- Shahzad, A., Imran, M., Tahir, M., Khan, S. A., Akgül, A., Abdullaev, S., ... & Yahia, I. S. (2023). Brownian motion and thermophoretic diffusion impact on Darcy-Forchheimer flow of bioconvective micropolar nanofluid between double disks with Cattaneo-Christov heat flux. *Alexandria Engineering Journal*, 62, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.023>
- Singh, B. K., & Kumar, P. (2017). Fractional variational iteration method for solving fractional partial differential equations with proportional delay. *International Journal of Differential Equations*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5206380>
- Sweilam, N. H., Abou Hasan, M. M., & Baleanu, D. (2017). New studies for general fractional financial models of awareness and trial advertising decisions. *Chaos, Solitons & Fractals*, 104, 772-784. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.09.013>
- Tanthanuch, J. (2012). Symmetry analysis of the nonhomogeneous inviscid Burgers equation with delay. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(12), 4978-4987. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2012.05.031>
- Veerasha, P., Prakasha, D. G., & Baskonus, H. M. (2019a). Novel simulations to the time-fractional Fisher's equation. *Mathematical Sciences*, 13(1), 33-42. <https://doi.org/10.1007/s40096-019-0276-6>
- Veerasha, P., Prakasha, D. G., & Baskonus, H. M. (2019b). New numerical surfaces to the mathematical model of cancer chemotherapy effect in Caputo fractional derivatives. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 29(1), 013119. <https://doi.org/10.1063/1.5074099>
- Zubik-Kowal, B. (2000). Chebyshev pseudospectral method and waveform relaxation for differential and differential-functional parabolic equations. *Applied Numerical Mathematics*, 34(2-3), 309-328. [https://doi.org/10.1016/S0168-9274\(99\)00135-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9274(99)00135-X)

Kalsine edilmiş zeolit esaslı geopolimerlerin basınç dayanımına mineral katkı olarak cürufun etkisi

The effect of slag as mineral admixture on the compressive strength of calcined zeolite-based geopolymer

Sevgi ÖZEN* 

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Rize

• Geliş tarihi / Received: 15.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2022

Öz

Geopolimerler, yeşil bağlayıcı malzeme olarak adlandırılan ve başlangıç hammaddeleri olarak doğal veya atık malzemeleri içeren yapı malzemeleridir. İnşaat sektöründeki potansiyel uygulamaları bilimsel olarak oldukça araştırılmış olmasına rağmen, doğal malzeme esaslı geopolimerlerin yaygın kullanımları sınırlı kalmıştır. Bunun temel nedeni, doğal malzeme esaslı geopolimerlerin düşük erken basınç dayanım değerlerine sahip olmaları ve dolayısıyla oda koşullarında erken dönemde yeterli kütleme sağlayamamalarıdır. Bu sorunu aşmak için öncelikle klinoptilolit içeren tuf 900°C’de kalsinasyon işlemine maruz bırakılmış, ardından mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu eklenmiştir. Elde edilen geopolimerlerin mukavemet gelişimi, basınç dayanım analizleri kullanılarak saptanmıştır. Mikro yapısal incelemeler, XRD ve SEM analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kalsinasyon işleminin erken dönemde mukavemeti artırdığı ve cüruf katkısıyla basınç dayanımının daha da iyileştiği belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre 900°C’de kalsine edilmiş yüksek fırın cürufu katkılı geopolimerin 28 günlük basınç dayanım değeri 46 MPa olarak saptanmıştır. XRD analizi sonucunda, malzemenin kalsinasyon başarısının amorf faz ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, SEM/EDX analizi ile geopolimer jelin en iyi cüruf katkılı geopolimerde geliştiği ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Cüruf, Geopolimer, Kalsinasyon, Klinoptilolit

Abstract

Geopolymers, referred to as green binder materials, are construction materials that incorporate natural or waste materials. Despite extensive scientific research on their potential applications in the construction sector, widespread utilization of natural material-based geopolymers has remained limited. The primary reason for this limitation is their low early compressive strength values, which consequently hinder achieving adequate curing under ambient conditions. To overcome this challenge, the tuff containing clinoptilolite was subjected to a calcination process at 900°C, followed by the addition of blast furnace slag as a mineral admixture. The strength development of the synthesized geopolymers was compared through compressive strength analyses. Microstructural examinations were conducted using XRD and SEM analyses. The analysis results demonstrated that the calcination process enhanced the early strength development, and the addition of slag further improved the compressive strength. As a result of XRD analysis it has been determined that the success of material calcination is associated with the amorphous phase. According to the analysis results, the compressive strength of the high blast furnace slag blended geopolymer, calcinated at 900°C, was determined as 46 MPa after 28 days. Moreover, the SEM/EDX analysis revealed that the geopolymer gel exhibited the best performance in the presence of slag additives.

Keywords: Slag, Geopolymer, Calcination, Clinoptilolite.

* Sevgi Özen, sevgi.ozen@erdogan.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Türkiye'nin de içinde yer aldığı Kyoto Protokolü gereği CO₂ ve sera etkisine neden olan gazların salınımının azaltılmasına yönelik çalışmalar inşaat sektörü üzerinde büyük bir baskı oluşturmaktadır. Bunun nedeni çimento ara maddesi olan klinker üretiminin CO₂ salınımını arttıran en önemli endüstriyel faaliyetlerden biri olmasıdır. Ayrıca çimento üretimi yüksek enerji gerektiren bir işlemdir. Gerek en önemli sera gazı olan CO₂ salınımının kontrol altına alınması, gerekse ekonomik nedenler dolayısıyla inşaat sektöründe çimento üretimi için yeni çözümler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda Portland çimentonun yerini alabilecek sentetik alumina silikat malzeme olan geopolimer çimento alternatif yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alkalilerle aktive edilmiş malzemeler yani geopolimerler geliştirilmiş, ileri teknoloji sentetik alumina silikat malzemelerdir. Geopolimer malzemenin kimyasal bileşimi doğal zeolitlere benzer ancak yapısı kristal yerine amorfür (Palomo vd., 1999; Xu & van Deventer 2000). İlk kez Gluchovskij tarafından "gruntosilikat" ya da "gruntoçimento-geoçimento" olarak adlandırılan bu yenilikçi ve alternatif malzeme, Davidovits tarafından "geopolimer" olarak tanımlanmıştır (Glukhovsky, 1967; Davidovits 1994). Ayrıca geocement (Krivenko, 1994), hidroseramik (Bao vd., 2005), inorganik polimer beton vb. olarak isimlendirilmişlerdir. Geopolimerizasyon sürecinde alumino silikat malzemenin belli sıcaklıklarda alkalın solüsyonlar ile (sodyum silikat, sodyum hidroksit, sodyum karbonat) kimyasal reaksiyonları sonucu üç boyutlu Si-O-Si bağlarından oluşan polimerik yapılar meydana gelmektedir (Moon vd., 2014; Nadoushan vd., 2016). Bu polimerik yapıların oluşumu hammaddenin çözünmesi, iyonların göçü, parçacıklar arasında jel oluşumu, moleküllerin yeniden düzenlenmesi ve parçacıkların sertleşmesi süreçlerini takiben meydana gelmektedir (Luukkonen vd., 2018). Jel fazı oluşumu esnasında alüminosilikat hammadde ile alkali çözelti arasındaki reaksiyon eşliğinde alkali metaller yeniden düzenlenmektedir. Tüm bu reaksiyonların neticesinde yüksek mekanik mukavemete sahip sertleşmiş geopolimer ürünler meydana gelmektedir.

Çimentosuz bağlayıcı malzeme olan geopolimerlerle ilgili çalışmalar son dönemde büyük oranda artmıştır. Uçak ve taşıt endüstrisi, tarihsel yapıların restorasyonu, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, yangına ve ağır iklim şartlarına dayanıklı duvar kaplaması üretimi gibi pek çok potansiyel kullanım alanı olan geopolimerlerin günümüzde özellikle Portland çimentonun yerini alabileceği düşünülmektedir. 1 ton Portland çimento üretimi ile karşılaştırıldığında geopolimer çimento %80-90 oranında CO₂ salınımını düşürebilmektedir (Davidovits, 1994). Şuan tüm dünyada çimento üretiminden kaynaklı CO₂ salınımının %7 civarında olduğu düşünülürse Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı malzemelerin üretilmesi konusunun aciliyeti anlaşılabilir. Ayrıca çimento üretimi yüksek enerji gerektiren bir süreç olduğundan ekonomik değildir. Geopolimerlerin Portland çimentosuna göre avantajları ise yüksek basınç dayanım, kimyasal koşullar altında yüksek dayanıklılık, düşük geçirgenlik, düşük CO₂ salınımı, atıkların geri dönüşümü olarak tanımlanabilmektedir.

Geopolimer üretiminde doğal ya da atık pek çok hammadde başlangıç malzemesi olarak kullanılabilir. Örnek olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, puzolanlar, zeolitler, metakaolin verilebilmektedir. Bunlar arasında endüstriyel atık malzemeler yüksek teknik özelliklerinden dolayı tercih edilseler de bu malzemelerin temini uzun vadeli tedarik açısından birtakım problemler oluşturmaktadır. Bu nedenle geopolimerlerin sadece atık malzemeler ile değil doğal malzemeler ile de kullanımı tavsiye edilmektedir (Almutairi vd., 2021). Bu doğal malzemelerden zeolitler geopolimer hammaddesi olarak oldukça umut vaat eden hammaddeler arasında bulunmaktadır.

Dünya zeolit rezervinin %40'ının Türkiye'de olduğu bilinmekle beraber bunlardan pek azı ekonomik olarak işletilmektedir. Bunun en büyük nedeni özellikle iç pazar açısından tüketim alanlarının sınırlı oluşudur. Türkiye'deki zeolitlerin, büyük hacimlerdeki malzemenin değerlendirilmesine olanak sağlayan inşaat sektöründeki kullanımı da yeterli değildir. Ayrıca zeolit mineralinin inşaat endüstrisindeki kullanımının yaygınlaştırılması malzemenin mekanik özellikleri konusundaki teknik verilerin artmasına bağlıdır. Ancak literatürde zeolitlerin geopolimerik malzeme olarak kullanımı ile ilgili son derece kısıtlı bilimsel veriler bulunmaktadır (Bondar vd., 2011; Nikolov vd., 2017; Nikolov vd., 2020). Kısıtlı olan çalışmalarda ise zeolitlerin geopolimer hammaddesi olarak sahip olduğu düşük erken dayanım, yüksek alkali solüsyon ihtiyacı, ısıl kür ihtiyacı gibi dezavantajları giderilebilmiş değildir. Bu durum zeolitlerin uygulamada kullanım potansiyellerini engellemektedir.

Bu çalışma kapsamında literatürde saptanan bu eksiklikten dolayı, Türkiye'de yaygın zeolit türlerinden olan klinoptilolit, reaktivitesinin artırılması amacıyla öncelikle kalsine edilmiştir. Kalsinasyon işlemi ile kristalen yapıya sahip olan klinoptilolitın amorf faza dönüştürülerek geopolimerleşmenin erken döneminde reaksiyona girmesi hedeflenmiştir. Ayrıca reaksiyon miktarını daha da artırmak için sisteme yüksek fırın cürufu mineral katkı olarak eklenmiştir. Bu müdahale sonucunda, uygulamada kullanılabilir nitelikte klinoptilolit-esaslı geopolimer üretimi sağlanmıştır. Özetle bu çalışma ile doğal malzeme esaslı geopolimerlerin yaygın kullanımlarının geliştirilmesi için klinoptilolit içeren tüfün kalsinasyon işlemi ve mineral katkı olarak cüruf etkisi incelenmiş olup, elde edilen bulguların, gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel sağlayacağı düşünülmektedir.

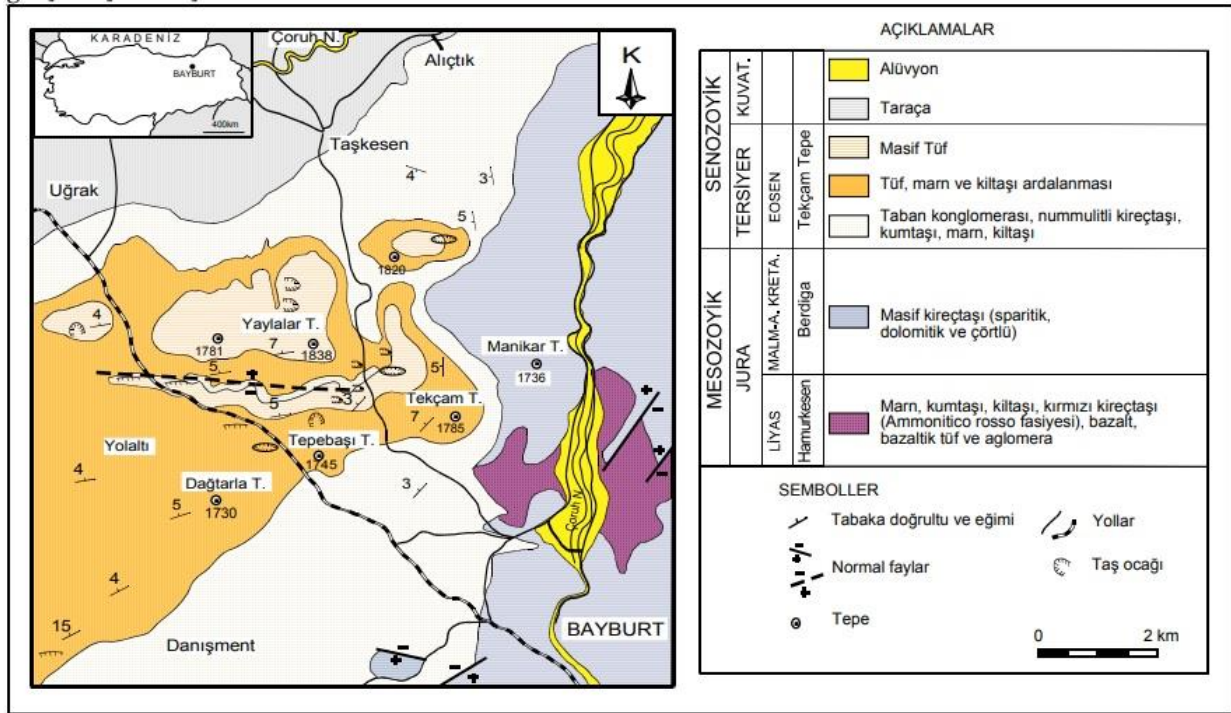
2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Başlangıç hammaddesi ve aktivatörler

2.1. Starting material and activators

Yapılan çalışmada geopolimer başlangıç malzemesi olarak klinoptilolit içeren tüf (Bayburt tüfü) kullanılmıştır. Bayburt Taşı olarak da bilinen bu endüstriyel hammadde kolay işlenebilmelerinden ötürü bölgede yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Bölge ekonomisinde ticari öneme sahip olan klinoptilolit içeren tüf ve tüfitler Eosen yaşlı ve dasitik bileşimlidirler (Şekil 1). Bayburt tüfü çökeltme ile eş zamanlı asidik bir volkanizma neticesinde oluşan kalkalkalin-alkalen ya da alkalen karakterli volkanoklastik ve sedimanterlerdir (Arslan vd., 2005).



Şekil 1. Bayburt yöresinin jeolojik haritası (Arslan vd., 2005)

Figure 1. Geologic map of Bayburt region (Arslan vd., 2005)

Alkaliler ile aktive edilerek geopolimer üretmek için karışımlarda sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmış olup kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sodyum hidroksitin saflığı %98,3'dür. Sodyum hidroksit pellet şeklinde temin edilmiş olup analizlerde kullanılmadan önce laboratuvar ortamında 10 Molarlık sulu çözelti haline getirilmiştir. Cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat ise sulu çözelti olarak temin edilmiştir.

Tablo 1. Alkali aktivatörlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri
Table 1. Chemical and physical properties of alkali activators

	Sodyum silikat	Sodyum hidroksit
Molekül formülü	Na ₂ SiO ₃	NaOH
Molekül ağırlığı (g/mol)	39,27	182
Yoğunluk (g/cm ³)	2,09	1,25-1,41
Renk	Beyaz	Beyaz
SiO ₂ (%)	27,7	
Na ₂ O (%)	9,8	
H ₂ O(%)	62,5	

2.2. Malzeme karakterizasyonu

2.2. Material characterization

Araziden alınan tuf örneği laboratuvar ortamında önce çeneli kırıcı ile küçültülmüş ardından Bond tipi bilyeli değirmen ile malzemenin %90'nı 45 mikron elekten geçecek şekilde öğütülmüştür. Tane boyut dağılımı elek analizi ile saptanmıştır. Başlangıç hammaddesinin kimyasal kompozisyon tayini X-ışını floresans (XRF) yöntemi ile yapılmıştır. 10 gr olarak toz haline getirilmiş hammadde pellet şekline dönüştürülüp XRF cihazında kimyasal taraması yapılmıştır.

Bayburt tufünün faz içeriği hangi mineralleri içerdiğinin yanında bu fazların miktarlarının saptanması olarak da yapılmıştır. Fazların miktarlarının sayısal olarak tespiti hammaddenin davranışını yorumlamada önem arz etmektedir. Kantitatif XRD çekimleri edilen okumalar 3'ten 80°C'ye kadar olacak şekilde 2θ açısı ile 40 kV ve 30 mA değerlerinde yapılmış ve sonuçlar sayısal olarak elde edilmiştir (PANtical X'Pert Pro cihazı X'Pert High Score Plus 3.0, Philips PW1730).

2.3. Kalsinasyon

2.3. Calcination

Klinoptilolit içeren tuf geopolimer sentezinden önce malzemenin reaktivitesini arttırmak amacıyla kül fırınında 900°C'de saatte 10°C artış olacak şekilde 1 saat süre ile kalsine edilmiştir.

2.4. Numune hazırlama

2.4. Sample preparation

Geopolimer sentezi için başlangıç hammaddesi (Bayburt tufü) Hobart mikserle boşaltılmış, NaOH alkali aktivatörü mikserle eklenmiş ve karışım 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından karışıma sodyum silikat eklenip karışım 3 dakika daha karıştırılmıştır. Üretilen geopolimer hamuru 5x5x5 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. 7, 28 ve 90 gün boyunca oda koşulunda kür edilmiştir. Geopolimer üretiminde tuf/aktivatör oranı 1.85, Na₂SiO₃/NaOH oranı ise 1.5 olarak kullanılmıştır.

2.5. Deneysel yöntemler

2.5. Analytical methods

Üretilen geopolimer hamurları üzerinde ASTM C39 (2018) standardına uygun olarak basınç dayanım analizleri yapılmıştır. Her bir basınç dayanım deneyi için 3 adet küp numuneden elde edilen sonuçların ortalamaları kullanılmıştır. Başlangıç hammaddesinin ve üretilen geopolimerlerin içerisinde bulunan ya da geopolimerleşme esnasında oluşan fazları saptamak amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizi Rigaku MiniFlax II serisi X-ışınları difraktometresi yardımıyla CuKα ışınması kullanılarak 30kV ve 15mA'da yapılmıştır. Tarama hızı ise 10°/dk'dır. Üretilen geopolimerlerin yarı-kantitatif kimyasal analizleri SEM/EDX analizi ile yapılmıştır. SEM/EDX analizinden önce örnekler altın ile kaplanmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Malzeme karakterizasyonu

3.1. Characterization of materials

Başlangıç hammaddesinin mineralojik içeriği Tablo 2’de verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere Bayburt Taşı %58 oranında klinoptilolit içermektedir. Klinoptilolit zeolit türü bir mineral olup geopolimerik yönden oldukça aktif olduğu bilinmektedir. Başlangıç hammaddesinin içerisinde %17 miktarında olduğu görülen kuvars ise geopolimerik yönden aktif değildir (Allahverdi vd., 2008). K-feldispatın ise klinoptilolit kadar olmasa da geopolimerleşmeye katıldığı ve reaksiyon esnasında aktif bir rol oynadığı bilinmektedir (Xu & van Deventer 2002). Tablodan Bayburt tufunun %25 oranında K-feldispat içerdiği görülmektedir. Tüm bu mineralojik bilgiler dahilinde hammaddenin geopolimerik yönden aktif olacağını sonucuna varılabilir.

Tablo 2. Başlangıç hammaddesinin kantitatif XRD (QXRD) analiz sonucu
Table 2. Quantitative XRD (QXRD) analysis of starting material

Mineralojik kompozisyon (%)	B-1
Klinoptilolit	58
Kuvarz	17
K-Feldispat	25
Toplam	100

Bayburt tufunun kimyasal analiz sonucu Tablo 3’te verilmiştir. Tablo incelendiğinde SiO_2 ve Al_2O_3 değeri toplamının % 70,9 olduğu gözükmektedir. Aslında bu değer geopolimerleşme için alt sınırlarda olan bir değerdir. SiO_2 ve Al_2O_3 değerlerinin toplamının %85 dolayında olması daha istenilen bir durumdur. Ancak Tablo incelendiğinde başka bir oksit değerinin yüksek olduğu görülmektedir. CaO değeri yaklaşık %9 civarındadır. Feldispattan geldiği düşünülen bu Ca değerinin geopolimerleşmede etkili olduğu bilinmektedir.

Tablo 3. Başlangıç hammaddesinin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri
Table 3. Chemical composition and physical properties of starting material

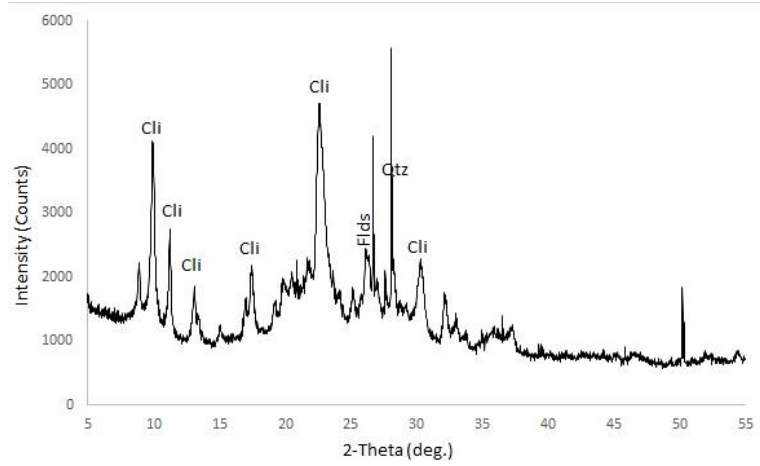
Kimyasal kompozisyon (%)	B-1
SiO_2	55.2
Al_2O_3	15.7
Fe_2O_3	3.1
CaO	9.4
MgO	1.2
Na_2O	0.4
K_2O	1
MnO	0.4
L.O.I.	13.6
Total	100.00
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık	2.11
İncelik (<45 μm ,%)	90.00

3.2. Başlangıç hammaddesi ve kalsine edilmiş hammaddenin XRD analizi

3.2. XRD analysis of starting material and calcined raw material

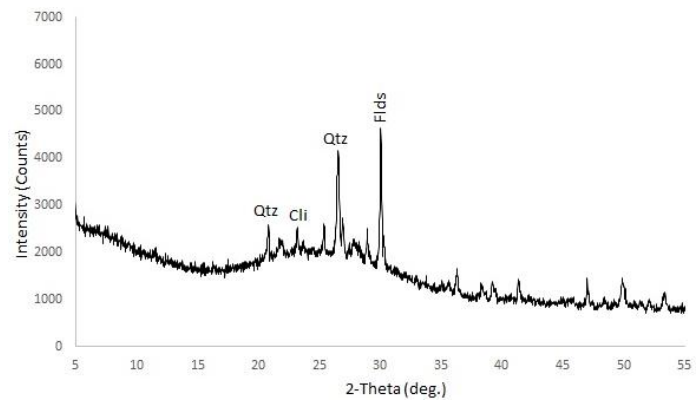
Klinoptilolitler geopolimerik yönden aktif malzemelerdir. Ancak bütün doğal malzemelerde olduğu gibi düşük erken dayanıma sahiptirler. Bunun nedeni kristalen yapıya sahip olmalarıdır. Bu yapılarından dolayı alkali solüsyonlarla reaksiyona girmeleri gecikmekte ve böylece erken dönemde düşük basınç dayanım değerlerine sahip olmaktadır. Bu sorun malzemelerin kalsinasyon edilmesi ile aşılabilmektedir. Kalsinasyon neticesinde klinoptilolitlerin kristal faz yapısı bozularak amorf faza dönüştürülebilmekte ve böylece erken dönemde geopolimerik reaksiyona katılmaları sağlanabilmektedir.

Bu çalışma ile yapılan kalsinasyon işleminin başarılı olup olmadığını anlamak amacıyla kalsinasyondan önceki klinoptilolit içeren hammadde (B-1) ve kalsinasyondan sonraki söz konusu hammaddenin (B-1-900°C) XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 2’de B-1 hammaddesinin kalsinasyondan önceki XRD grafiği görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kristal yapıya işaret eden klinoptilolit, feldispat ve kuvarz pikleri görülmektedir. Şekil 3’de ise kalsinasyon işleminden sonraki XRD grafiği görülmektedir. Bu grafiğe göre neredeyse tüm kristal yapı çökmüş ve amorf yapıda olan camsı faza işaret eden 2θ açısının 20° ile 35° arasında olan kambur eğri görülmektedir. Bu nedenle XRD analizi neticesinde, klinoptilolit esaslı geopolimerin kalsinasyon başarısı amorf faz varlığı ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 2. B-1 hammaddesinin XRD analiz grafiği (Cli: klinoptilolit; Flds: feldispat; Qtz: kuvars)

Figure 2. XRD analysis of B-1 raw material (Cli: clinoptilolite; Flds: feldspar; Qtz: quartz)



Şekil 3. 900°C’de kalsine edilmiş B-1 hammaddesinin (B-1-900°C) XRD analiz grafiği (Cli: klinoptilolit; Flds: feldispat; Qtz: kuvars)

Figure 3. XRD analysis of calcined B-1 raw material at 900°C (B-1-900°C) (Cli: clinoptilolite; Flds: feldspar; Qtz: quartz)

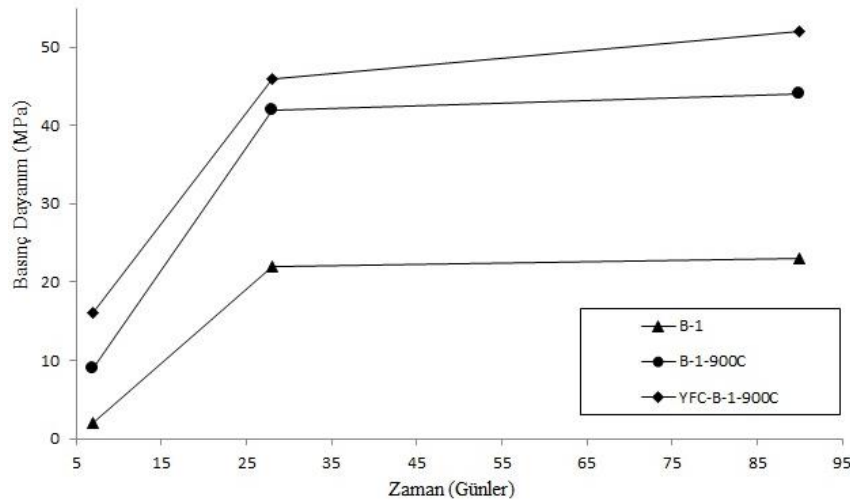
3.3. Basınç dayanım analizi

3.3. Compressive strength analysis

Mukavemet analizleri esnasında öncelikle başlangıç malzemesinin yani klinoptilolit içeren Bayburt tufünün 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Yukarıda bahsi geçtiği üzere doğal malzemeler yapılarında ihtiva ettikleri kristalen mineraller dolayısıyla geç reaksiyona girip geç dayanım vermektedirler. Diğer bir deyişle erken dayanım değerleri oldukça düşüktür. Şekil 4 incelendiğinde 7 günlük basınç dayanım değerlerinin oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bayburt tufü esaslı geopolimerin erken dayanım alamadığını görülmektedir. Ancak kür süresi uzadıkça mukavemet kazanmakta ve 90 günlük basınç dayanımının 23 MPa olduğu görülmüştür.

B-1 hammaddesinin kalsinasyon işlemi neticesinde (B-1-900°C) erken dönemdeki basınç dayanımının (7 günlük) oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Söz konusu bu artışın 28 günlük ve 90 günlük basınç dayanım sonuçlarında daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuca dayanarak kalsinasyon işleminin erken dönem basınç dayanım değerlerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. B-1-900°C geopolimerinin 90 günlük basınç dayanımı 44 MPa'dır.

Bu basınç dayanım değerlerinin daha da iyileştirilip iyileştirilemeyeceğini görmek için kalsine edilmiş klinoptilolit içeren tufün içerisine ağırlıkça %10 miktarında yüksek fırın cürufu eklenmiştir. Şekil 4'ten görüldüğü üzere yüksek fırın cürufunun her yaşta basınç dayanımını iyileştirdiği yani geopolimerlerin mukavemetleri üzerinde pozitif etkisinin olduğu görülmüştür. YFC-B-1-900°C geopolimerinin 90 günlük basınç dayanım değeri 52 MPa olarak ölçülmüştür.



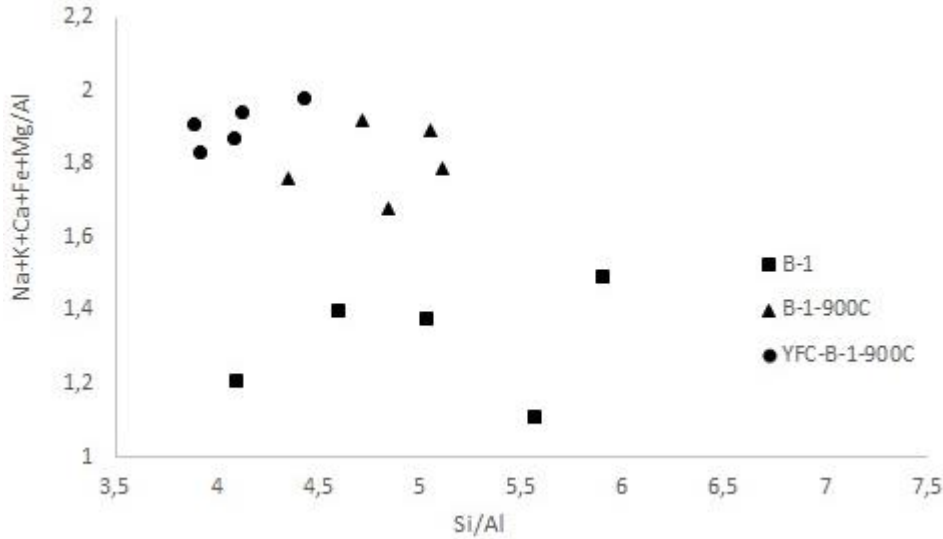
Şekil 4. B-1, B-1-900°C, YFC-B-1-900°C geopolimerlerinin basınç dayanım analizi (7, 28, 90 günlük)

Figure 4. Compressive strength analysis of B-1, B-1-900°C, YFC-B-1-900°C (7, 28, 90 days)

3.4. SEM/EDX analizi

3.4. SEM/EDX analysis

Sentezlenen geopolimerlerin yarı-kimyasal SEM/EDX analiz sonuçları Şekli 5'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde sonuçların üç bölge olarak yoğunlaştığı görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere B-1 geopolimeri düşük Na+K+Ca+Fe+Mg/Al olarak karakterize edilebilmektedir. B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerleri ise yüksek Na+K+Ca+Fe+Mg/Al değerlerine sahiptirler. B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerleri kendi aralarında kıyaslandığında ise YFC-B-1-900°C geopolimerinin düşük Si/Al değerine B-1-900°C geopolimerinin ise yüksek Si/Al değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerlerinin benzer değerlerde Si/Al oranlarına sahip olduğu ancak B-1 geopolimerinin Si/Al değerlerinin oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu veriye dayanarak geopolimerik jelin B-1 örneğinde iyi derecede gelişemediği, ancak B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerlerinde iyi derecede geliştiği sonucuna varılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. B-1, B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolimerlerinin yarı-kantitatif SEM/EDX analiz sonuçları

Figure 5. Semi-quantitative SEM/EDX analysis of B-1, B-1-900°C ve YFC-B-1-900°C geopolymers

4. Sonuç ve öneriler

4. Conclusion and recommendations

Bu araştırmada, klinoptilolit içeren tüf malzemesi 900°C sıcaklıkta kalsinasyon işlemine tabi tutulmuş ve sonrasında yüksek fırın cürufu mineral katkısı olarak eklenmiştir. Geopolimerlerin mukavemet gelişimi basınç dayanımı analiziyle incelenmiş ve XRD ve SEM analizleri ise mikro yapısal incelemeler için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kalsinasyon işleminin erken aşamalarda mukavemeti artırdığını ve cüruf katkısının basınç dayanımını daha da iyileştirdiğini göstermektedir. SEM/EDX analizi, cüruf katkılı geopolimerin en iyi jel gelişimine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Yaygın bir zeolit türü olan klinoptilolitlerin diğer doğal malzemelerde görüldüğü gibi düşük erken dayanım değerleri kalsinasyon neticesinde iyileştirilebilmektedir.
- 7 günlük basınç dayanım değeri (erken dönem) 2 MPa olan B-1 geopolimerinin 900°C’de kalsine edilmesinin ardından 7 günlük mukavemeti 9 MPa olarak saptanmıştır.
- Bu değer sisteme yüksek fırın cürufu eklenmesi neticesinde daha da arttırılabilmektedir. YFC-B-1-900°C geopolimerinin 7 günlük basınç dayanım değeri 19 MPa’dır.
- Bu sonuçlara dayanarak erken dönemde mukavemet kazanamayan doğal malzemelerin kalsinasyon ve mineral katkı eklenmesi neticesinde dayanımlarının yükseltilebildiği ve böylece yerinde dökülen beton uygulamalarında kullanılabilirliği gösterilmiştir.
- XRD analizi neticesinde kristal yapının çöküp, amorf yapıdaki camsı faza işaret eden kambur eğri saptanarak klinoptilolit esaslı geopolimerin kalsinasyon başarısı amorf faz varlığı ile ilişkilendirilmiştir.
- Geopolimer jelin benzer değerlerde Si/Al oranlarına sahip olan cüruf katkılı geopolimerde iyi derecede geliştiği ortaya konulmuştur (SEM/EDX).

İleriki çalışmalar olarak klinoptilolit dışında başka minerallerin kalsine edilerek geopolimerik davranışlarının incelenmesi ve birbirleriyle kıyaslanması önerilmektedir. Böylece kalsinasyon işleminin geopolimerleşme üzerindeki etkilerinin daha detaylı olarak anlaşılması mümkün olabilecektir.

Teşekkür / Katkı belirtme*Acknowledgement*

Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederim.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Aydoğdu, H., & Altındağ, Ö. (2015). Computation of the mean value and variance functions in geometric process, *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 86 (5), 986-995. <https://doi.org/10.1080/00949655.2015.1047778>
- Aydoğdu, H., & Karabulut, İ. (2014). Power series expansions for the distribution and mean value function of a geometric process with Weibull interarrival times, *Naval Research Logistics*, 61, 599-603. <https://doi.org/10.1002/nav.21605>
- Aydoğdu, H., Karabulut İ., & Şen, E. (2013). On the exact distribution and mean value function of a geometric process with exponential interarrival times, *Statistics and Probability Letters*, 83, 2577-2582. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2013.08.003>
- Aydoğdu, H., Şenoğlu, B., & Kara, M. (2010). Parameter estimation in geometric process with Weibull distribution, *Applied Mathematics and Computation*, 217 (6), 2657-2665. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.08.003>
- Chan, J. S. K., Lam, Y., & Leung, D. Y. (2004). Statistical inference for geometric processes with gamma distributions, *Computational Statistics and Data Analysis*, 47 (3), 565-581. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2003.12.004>
- Gutjahr, W. J. (1995). Optimal test distributions for software failure cost estimation, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 21, 219-228, <https://doi.org/10.1109/32.372149>
- Lam, Y. (2007). *The Geometric Processes and Its Applications* (1st ed.). World Scientific.
- Lam, Y., & Chan, J. S. K. (1998). Statistical inference for geometric processes with lognormal distribution, *Computational Statistics and Data Analysis*, 27 (1), 99-112. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(97\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(97)00046-7)
- Musa, J. D., Iannino, A., & Okumoto, K. (1987). *Software Reliability: Measurement, Prediction, Application* (1st ed.). McGraw-Hill.
- Pekalp, M. H., & Aydoğdu, H. (2018). An integral equation for the second moment function of a geometric process and its numerical solution, *Naval Research Logistics*, 65 (2):176-184. <https://doi.org/10.1002/nav.21791>
- Pekalp, M. H., & Aydoğdu, H. (2021). Power series expansions for the probability distribution, mean value and variance functions of a geometric process with gamma interarrival times, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 388, 113287. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2020.113287>
- Pekalp, M. H., Aydoğdu, H., & Türkman, K.F. (2022). Discriminating between some lifetime distributions in geometric counting processes, *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 51 (3), 715-737. <https://doi.org/10.1080/03610918.2019.1657452>

- Pham, H., & Wang, H. (2001). A quasi-renewal process for software reliability and testing costs, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 31 (6), 623-631. <https://doi.org/10.1109/3468.983418>
- Pham, H., & Zhang, X. (1997). An NHPP software reliability model and its comparison, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 4 (3), 269-282. <https://doi.org/10.1142/S0218539397000199>
- Pham, L., & Pham, H. (2000). Software reliability models with time-dependent hazard function based on Bayesian approach, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 30 (1), 25-35. <https://doi.org/10.1109/3468.823478>
- Tang, Y., & Lam, Y. (2007). Numerical solution to an integral equation in geometric process, *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 77, 549-560. <https://doi.org/10.1080/10629360600565343>
- Tokuno, K., & Yamada, S. (1999). Stochastic software safety/reliability measurement and its application, *Annals of Software Engineering*, 8, 123-145. <https://doi.org/10.1023/A:1018967011900>

Akıllı elektrik sayacı ile enerjinin takip ve kontrolü

Tracing and controls of energy with smart electricity meters

Mertcan NANE*^{1,a} , Halil GÖK^{1,b} , Ömür AKYAZI^{2,c} , Canan AKSOY^{3,d} 

^{1,3}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon, Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 30.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

Öz

Yaşamımızın her alanında ihtiyaç duyduğumuz elektrik enerjisi, kullanılan enerji kaynaklarının sınırlı olması ve enerjiye olan talebin sürekli olarak artması karşısında sürdürülebilir olması için enerjinin verimli kullanılması gerekmektedir. Akıllı elektrik sayaçları, bağlı oldukları elektrik şebekesinin elektriksel değerlerini ölçen, ölçüm değerlendirmelerine bağlı olarak fatura hesabı çıkaran, haberleşme teknolojileriyle enerjiyi uzaktan takip ve kontrolünü (açma-kapatma) sağlayan akıllı ölçümleme cihazlarıdır. Bu çalışmada, tek fazlı akıllı elektrik sayacı tasarımı yazılımsal ve donanımsal olarak gerçekleştirilmiş olup laboratuvar ortamında test edilmiştir. Tasarımda kullanılan STM32F103 mikrokontrolcü ile alınan enerji ölçüm verileri, hem Wi-Fi hem de LoRa RF haberleşmesi ile aktarılmıştır. Bunlara ek olarak, mobil uygulama arayüzü geliştirilmiş ve tüm tüketim verileri tüketicilere cep telefonları üzerinden sunulmuştur. Deneysel çalışmaların sonucuna göre cihazın ölçüm doğruluğu %99'dan büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, proje kapsamında LoRa RF haberleşme altyapısı kurulumu için elektrik sayaçların aynı zamanda modem olarak da kullanılabilceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Akıllı elektrik sayacı, Akıllı şebekeler, Enerji, Tasarruf, Uzaktan okuma, Verim

Abstract

The electrical energy we need in every aspect of our lives must be used efficiently in order to be sustainable in the face of the limited energy resources and the continuous increase in the demand for energy. One of the ways to use energy efficiently is to control the energy continuously with smart meters. Smart electricity meters are intelligent measuring devices that measure the electrical values of the connected electrical grid, generate billing based on measurement evaluations, and enable remote monitoring and control (switching on/off) of energy through communication technologies. In this study, the design of a single-phase smart electricity meter was carried out in software and hardware and tested in a laboratory environment. The energy measurements taken with the STM32F103 microcontroller used in the design were transferred via both Wi-Fi and LoRa RF communication. In addition, the mobile application interface has been developed and all consumption data is presented to consumers via mobile phones. According to the results of the experimental studies, it has been observed that the measurement accuracy of the device is greater than 99%. In addition, it has been shown that electricity meters can also be used as modems for the installation of LoRa RF communication infrastructure within the scope of the Project.

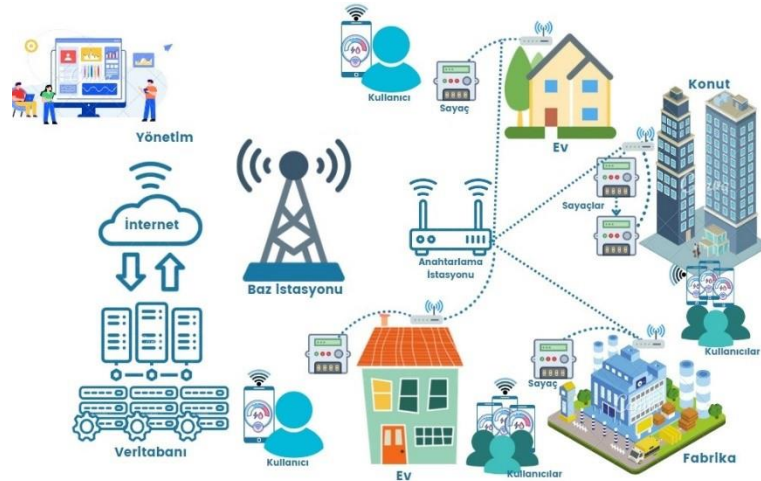
Keywords: Smart electricity meter, Smart grid, Energy, Saving, Remote reading, Efficiency

*^a Mertcan NANE; 397295@ogr.ktu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Gündelik yaşantımızın her alanında kullandığımız elektrik enerjisi, kullanılan kaynakların sınırlı olması ve enerjiye olan talebin her geçen gün artması nedeniyle mevcut kaynakların verimli kullanılması gerekmektedir (Kocaman, 2018). Enerjinin üretimden tüketime kadar izlediği tüm süreçte birçok kayıplara uğramaktadır. Enerjinin verimli kullanılması, kayıpların optimize edilmesi ya da yok edilmesi ile sağlanmaktadır (Düzgün, 2018). Enerji kayıpları hem üretici tarafında hem de tüketici tarafında olabilmektedir. Üretici tarafından incelendiğinde teknik ekipmanların hassasiyetinin sapması, iletim hatlarının uyumsuzluğu, soğutma sistemlerinin verimli çalışmaması, enerji dönüşümlerinden kaynaklanan kayıplar gibi senaryolar karşımıza çıkabilmektedir. Tüketici tarafında incelendiğinde ise enerjinin usulsüz (kaçak) kullanılması ve enerjinin bilinçli tüketilmemesi olarak ifade edilebilir (Fourie & Calmeyer, 2004; Xudong vd., 2021). Bahsi geçen tüm bu kayıpların azaltılması, akıllı elektrik şebekelerinin ana hedeflerinden biridir (Eldem, 2017; Martins vd., 2019). Geleneksel elektrik şebekeleri incelendiğinde enerji tüketim takibinin işçilik maliyeti olması, güvenilirlik ve kararlılık noktalarında sorunların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Önen & Kuran, 2015). Akıllı elektrik şebekeleri kavramıyla birlikte enerjinin üretim, dağıtım ve tüketim noktalarının her birinde hükmü olan, varlığı sürdürülebilir, bilgi ve haberleşme teknolojileri alt yapısı kullanan ve ana hedefi enerji verimliliği olan modern bir elektrik şebekesi modellenmiştir (İlisu vd., 2020; Salman, 2019; Akkaya O. S. vd., 2021). Enerji şirketleri, ulusal ölçekte enerji ihtiyacını verimli bir şekilde tedarik etmek için akıllı elektrik şebekesi alt yapılarına ciddi yatırımlar yapmaktadır (Bayindir, 2016). Planlanan alt yapıyla birlikte elektrik şebekesinin hem saha içi hem saha dışı operasyonlarını gerçek zamanlı takip ve kontrolü sağlanmaktadır. Akıllı elektrik şebekesinin en önemli bileşeni olan akıllı elektrik sayacı kavramıyla birlikte enerjinin ölçülmesi, faturalandırılması, tüketim verilerinin haberleşme altyapısı kullanarak uzaktan okunabilmesi (USOS) ve enerjinin uzaktan kontrolü sağlanabilmektedir (Jixuan vd., 2013). Enerji tüketicileri gerçek zamanlı ve güncel olacak biçimde tüketim verilerini takip edebileceğinden gereksiz harcamalarını azaltarak fatura fiyatlarını düşürebileceklerdir. Böylece, elektrik enerjisi efektif biçimde kullanılarak arz ve talep dengesinin güvenliği sağlanmış olur (Dileep, 2020; Karaman vd., 2021). Akıllı elektrik sayaçları üretiminden, tüketime kadar olan süreçte birçok operasyonel uygulama alanı bulunmaktadır (Aktaş, vd., 2021). Şekil 1’de sistemin operasyonel gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Akıllı elektrik sayaçlarının operasyonel gösterimi

Figure 1. Operational presentation of smart electricity meters

Literatürde, elektrik sayaçlarının uzaktan okunabilmesi için birçok farklı haberleşme çözümleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla bir elektrik sayacının RS-485 haberleşme portundan erişim sağlanarak ve bir haberleşme tekniği kullanarak elektrik sayaçlarına ait akım, gerilim, aktif güç, pasif güç ve güç faktörü gibi verilerin uzaktan okunması gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, elektrik enerjisi tüketicilerinin tüketim bilgilerini haberleşme teknolojileri aracılığıyla gerçek zamanlı olarak takip edebilmeleri amacıyla bir akıllı elektrik sayacı tasarlanmıştır.

Tasarlanan STM32F103 mikrokontrolcü tabanlı elektronik sistemin, PZEM-004T enerji ölçüm modülü tarafından alınan ölçüm verilerinin işlenmesiyle elde edilen fatura bilgileri, internet erişimi olan coğrafi

bölgelere Wi-Fi modülü ile birlikte TCP/IP tabanlı MQTT haberleşme protokolü üzerinden Shifter.io Cloud sunucusuna, internet erişimi olmayan bölgelere ise LoRa RF haberleşme modülü ile veri merkezine kablosuz olarak aktarılmıştır. App Inventor programında tasarlanan mobil arayüzü uygulaması ile birlikte bahsi geçen tüm veriler bulut sunucusundan alınarak tüketicilere cep telefonları veya tablet bilgisayarlarından anlık olarak akım, gerilim, aktif güç, reaktif güç, faz farkı, frekans, güç faktörü ve fatura bilgileri hem sayısal hem de grafiksel olarak sunulmuştur. Tasarımı yapılan cihazın elektrik enerjisi ile beslenen mesken hanelere entegrasyonu uyumlu olacak şekilde olması dikkate alınmıştır. Ayrıca, mevcut piyasada var olan cihazlarla arasındaki fark hem ölçü aleti olarak hem de modem cihazı olarak kullanılabilir olmasıdır.

Makalenin devam eden bölümlerinde, materyal ve metot başlığı altında elektrik sayacının ölçme teorisi, haberleşme sistemi performans analizleri ve internet bağlantısının katmanları anlatılmıştır. Deneysel çalışma başlığı altında sistemin hem donanım hem de yazılım olarak üzere tasarımı ve işleyişi anlatımı yapılmıştır. Cihazın test sonuçlarına karşı gösterdiği tepki ve doğruluğu bulgular ve tartışma başlığında analiz edilmiştir. Sonuçlar ve değerlendirme başlığı altında da yapılan çalışmanın eleştirel bakış açısıyla yorumlanmıştır.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1. Ölçümleme yöntemi

2.1. Measurement method

Elektrik sayaçlarının en temel işlevi, kullanıcıların elektrik enerjisi tüketimindeki aktif ve reaktif güç değerlerini zamanla ilişkilendirerek kaydetmektir. Bu bağlamda, en temelde akım ve gerilim değerleri ölçülünerek ilgili tüm tüketim verileri türetilmektedir. Elektrik sayaçlarında akım ve gerilim ölçümü Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmaktadır (Karaman vd., 2021).

$$V_{rms} = K_v \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v(n)^2}{N}} \quad (1)$$

$$I_{rms} = K_i \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N i(n)^2}{N}} \quad (2)$$

Buradaki parametreler;

V_{rms} : Etkin gerilim değeri

K_v : Gerilim kazanç çarpanı

I_{rms} : Etkin akım değeri

K_i : Akım kazanç çarpanı

N : Saniyede örneklenen sinyal sayısı

Aktif ve reaktif güç değerleri ise, ölçülünen akım ve gerilim sinyallerinden faydalanarak hesaplanmaktadır (Karaman vd., 2021).

$$P_{act} = K_p \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v(n) \cdot i(n)}{N}} \quad (3)$$

$$P_{react} = K_p \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v_{90^\circ}(n) \cdot i(n)}{N}} \quad (4)$$

Buradaki parametreler;

P_{act} : Aktif güç değeri

K_p : Güç kazanç çarpanı

P_{react} : Reaktif güç değeri

N : Saniyede örneklenen sinyal sayısı

v_{90° : Örnekleme anındaki gerilimin, 90 derece faz farkının olduğu değeri

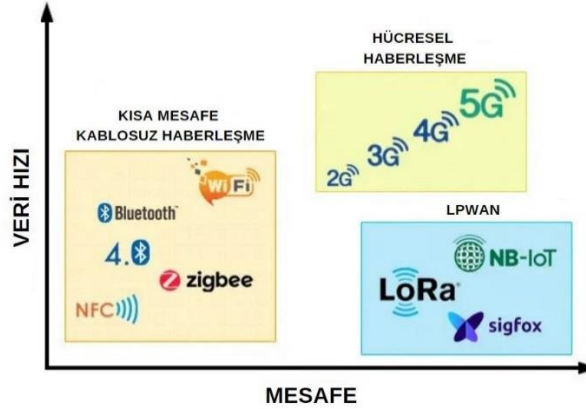
2.2. Haberleşme yöntemi

2.2. Communication method

Akıllı elektrik şebekelerinin haberleşme altyapısında verilerin iletimi kablolu ya da kablosuz olarak gerçekleştirilmektedir. Kablolu haberleşme tekniğinde iletim hattı olarak elektrik kablosu, koaksiyel kablolar ve fiber-optik kablolar kullanılırken, kablosuz iletişim tekniğinde hava ve uzay ortamı kullanılmaktadır (Folasade vd., 2021). Akıllı elektrik şebekelerinde kullanılan kablolu haberleşme sistemlerinde PLC, PSTN, fiber-optik ve ethernet yer alırken, kablosuz haberleşme sistemlerinde ise Wi-Fi, Bluetooth, LoRa RF, ZigBee ve GSM/GPRS gibi haberleşme yöntemleri yer almaktadır (Fredrik vd., 2021). Her haberleşme tekniğinin iletim şeklinde avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Haberleşme tekniklerinden hangisinin kullanılacağı belirlenirken maliyet, performans, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik faktörleri iyi analiz edilmelidir.

Wi-Fi haberleşmesi lisans gerektirmeyen frekanslarda çalışması, diğer kablosuz çözümlere kıyasla daha ucuz maliyetli ve kolay kurulumla sahip olması sistemin avantajları iken, veri iletim hızının düşük olması, güvenlik konusunda problemlerin olması ve diğer kablosuz cihazlarla birlikte birbirinin iletişimini engelleyebilmesi sistemin dezavantajıdır (Win, 2017). Wi-Fi haberleşmesinde veri iletim hızı 2 Gbps'a kadar çıkabilmektedir. Ancak geliştirilen sistemin donanım performansı gereği iletim hızı 2 Mbps'a kadar sağlanmaktadır.

LoRa haberleşmesi veri iletimi için elektromanyetik dalgaları kullanan, uzak mesafelere güvenilir haberleşme sağlayan ve düşük güç tüketimi ile ön plana çıkan radyo frekansı iletişim teknolojisidir. Düşük maliyet, yüksek hassasiyet, elektriksel gürültülere karşı dayanıklı olması ve uzun menzilli haberleşmede iyi performans sergilemesi sistemin avantajları iken, iletişim hızının düşük olması sistemin dezavantajıdır. LoRa haberleşmesinde veri iletim hızı 500 kbps'a kadar çıkabilmektedir. Ancak, geliştirilen sistemin donanım performansı gereği iletim hızı 2.4kbps'a kadar sağlanmaktadır (Anup vd., 2021). Haberleşme tekniklerinin performans karşılaştırmasının grafiksel gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Haberleşme tekniklerinin performans karşılaştırması

Figure 2. Performance comparison of communication techniques

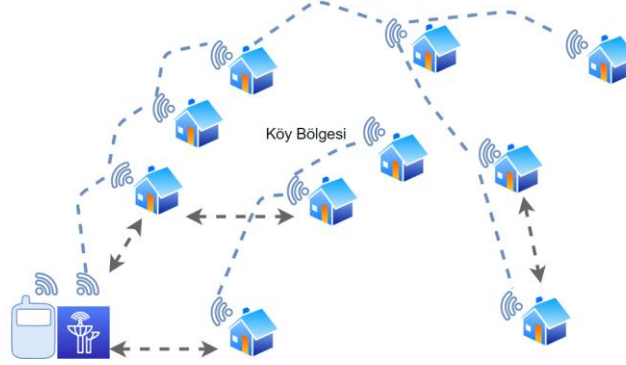
Bu çalışmada, veri iletimi için Wi-Fi ile LoRa RF haberleşmesi kullanılmıştır. Bu çalışmanın kapsamında Wi-Fi haberleşmesinin tercih edilmesinin ana nedeni; sistem entegrasyonu için düşük maliyetli ve kolay olmasının yanı sıra iletilecek verilerin noktadan noktaya iletişimde bulut hizmetlerinin sağladığı avantajlar ile birlikte sistem performansının daha verimli kullanılmasıdır. LoRa RF haberleşme tercihi ise, internet erişiminin olmadığı coğrafi bölgelerde elektrik sayaçlarının ölçüm verilerini uzaktan okumak için alternatif bir haberleşme çözümü olmasıdır. Böylece, sistemin kurulum aşamasında oluşabilecek farklı koşullar durumunda entegrasyon problemi olmayacaktır.

2.3. Gateway bağlantısı

2.3. Gateway connection

LoRa haberleşmesi geniş alanlarda uzun menzil kullanımı avantajına sahiptir. Ancak, bu haberleşme yönteminde doğrudan internete veya merkezi bir sunucuya bağlantısı yoktur. Bu bağlamda, elektrik

sayaçlarının topladığı tüketim verilerini internet veya bir ağ sunucuna iletmesi için Gateway bağlantısına ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece, LoRa cihazlarından gelen verilerin dış dünya ile etkileşimi sağlanmış olur. Gateway birden fazla LoRa cihazından gelen elektriksel sinyalleri alabilmenin yanı sıra ağdaki diğer cihazlara iletmek için bu verileri işleyebilir. Bu avantaj ile birlikte haberleşmenin kapsama bölgesi planlamasında optimizasyon yapılmıştır. LoRa haberleşmesinde merkezi bir görev üstlenen Gateway, geniş alanlarda veri toplama ve iletişim için etkili bir çözüm sunar (Adrian vd., 2019). Gateway kullanımının operasyonel gösterimi Şekil 3’de verilmiştir.

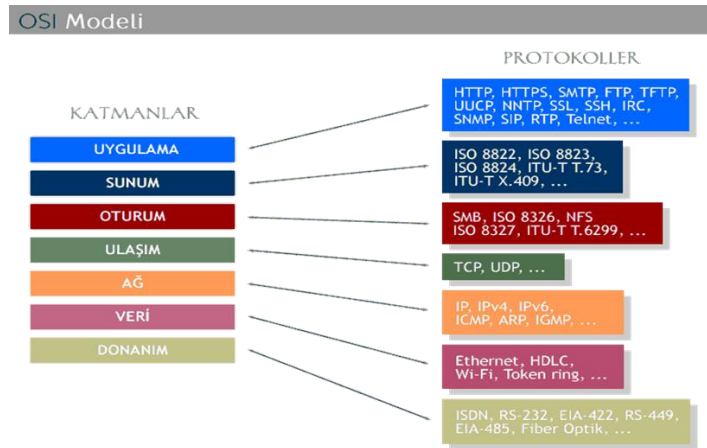


Şekil 3. Gateway operasyonel gösterimi
Figure 3. Operational presentation of gateway

2.4. İnternet ağı katmanları

2.4. Internet network layers

Haberleşme sisteminde bahsi geçen tüm teknikler verilerin bir noktadan başka bir noktaya ulaşmasından sorumludur. Haberleşme sisteminin performansı değerlendirilirken, verilerin güvenliği ve bütünlüğünün sağlanması da sistemin tasarımında düşünülmelidir. Bunun içinde bir network sistem yapısı ağa dahil edilme ihtiyacı duyulmaktadır. Bu network sistem yapısı da OSI katmanları ile ifade edilmektedir. OSI standardı iki bilgisayar arasındaki iletişimin nasıl olacağını tanımlamaktır. Gerek ağ içinde gerek ağ dışında veri iletişiminin gerçekleşmesi mutlaka her katmandan geçmesi gerekir (Ahmad, 2017). Uygulama, sunum, oturum, ulaşım, ağ, veri ve donanım olmak üzere yedi adet katmandan oluşmaktadır. Wi-Fi haberleşmesinde önemli bir yeri olan OSI katmanlarının blok diyagramı Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. OSI katmanları
Figure 4. OSI layers

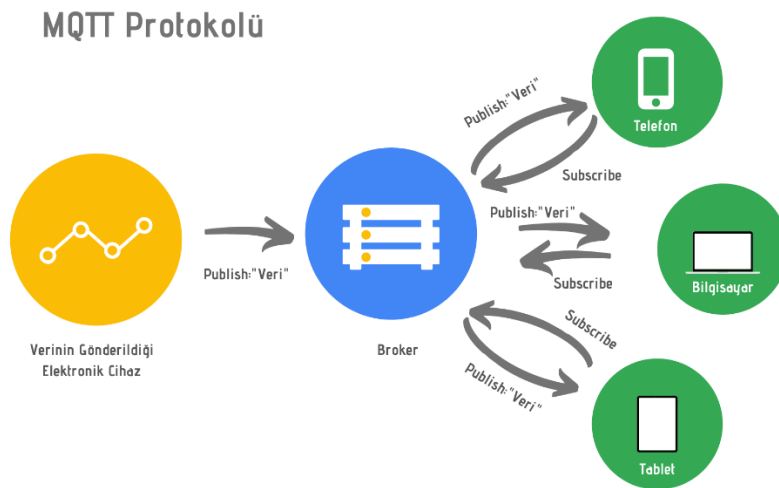
Veri katmanı, cihazlar arası haberleşmenin fiziksel olarak gerçekleştiği katmandır. Bu çalışmada kullanılan ESP8266 internet modülü, Wi-Fi haberleşme bağlantısını sağlamaktadır. Cihazlar fiziksel olarak birbirlerine bağlı olsalar da (Ethernet ve kablosuz haberleşme teknikleri) verinin gönderileceği hedef belirlenmediği için birbirleri arasında haberleşme gerçekleşmez.

Ağ katmanı, veri paketlerinin farklı bir ağa gönderilmesi için yönlendiricilerinin belirlendiği kısımdır. Verilerin paket şeklinde iletiildiği bu katmanda, ağa bağlı olan cihazlara DHCP tarafından otomatik bir IP adresi tanımlanmaktadır. Hem gönderici hem de alıcı tarafa tanımlanan IP adresleriyle birlikte ağın adreslenmesi ve kontrolü sağlanmaktadır.

Ulaşım katmanı, verinin hedefe uçtan uca iletilmesinden sorumludur. TCP protokolünün yer aldığı bu katmanda, verilerin parçalanarak, şeffaf ve güvenli olarak iletilmektedir. Veriler parçalandığında iletim sırasında birtakım bozunuma uğrayabilir. TCP protokolü bu noktada, haberleşmenin başlangıç ve bitiş zamanlarında bağlı istekleri üzerinden kontrol ederek tüm paketlerin düzenli iletilmesini sağlamaktadır.

Uygulama katmanı, bilgisayar uygulaması ile ağ servisi arasındaki iletişimin sağlandığı katmandır. Kullanıcıların isteklerini karşılayacak olan haberleşme protokolleri bu katmanda çalıştırılmaktadır. HTTP, HTTPS, SSH, TELNET, FTP, MQTT gibi protokoller bu katmanda yer alır.

Bu çalışmada, uygulama katmanında yer alan MQTT haberleşme protokolü kullanılmıştır. MQTT haberleşme protokolü, küçük cihazlar için düşük bant genişliği sunan makineden makineye haberleşme sağlayan telemetri mesajlaşma protokolüdür. IoT cihazları için popüler kullanıma sahip olan bu protokol yayımla/abone ol ilkesi ile çalışmaktadır. Pil gücünün yüksek olduğu uygulamalar için avantajlı kullanıma sahiptir (MQTT, 2022). Çok boyutlu ve karmaşık yapıları verilerin ayrıştırılarak iletiildiği bu protokolde kimlik doğrulama, yetkilendirme, abonelikler, cevapsız çağrılar ve aynı anda milyonlarca istemci hareketleri gibi tüm haberleşme süreci broker üzerinden gerçekleşmektedir (The HiveMQ Team, 2022). MQTT haberleşme protokolünün genel blok diyagramı Şekil 5’de gösterilmiştir.

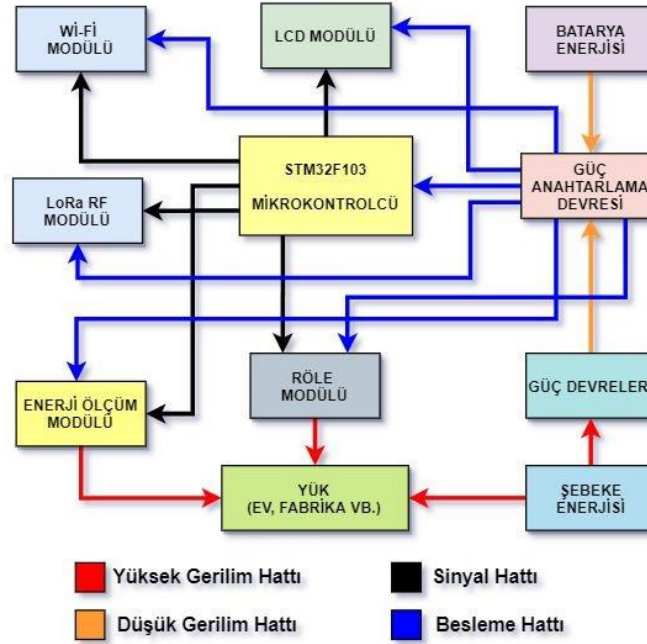


Şekil 5. MQTT protokolü blok diyagramı
Figure 5. MQTT protocol block diagram

2.5. Deneysel çalışmalar

2.5. Experimental studies

Bu çalışmada tek fazlı akıllı elektrik sayacı tasarlanmıştır. Elektronik sistem mimarisi kontrolcü, ölçüm, güç, anahtarlama, haberleşme ve gösterge alt sistemlerinden oluşmaktadır. Her bir alt sistem belirli bir görev için hizmet etmekte ve birlikte tüm sistemi oluşturmaktadır. Sistemin genel blok diyagram gösterimi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Sistemin blok diyagramı
Figure 6. Block diagram of the system

Ölçüm katmanında, PZEM-004T enerji ölçümleme modülü yer almaktadır. Bu modül 0-100 A akım ve 80-260 V gerilim ölçümleme aralığına sahiptir. Elektrik enerjisi tüketicilerinin faturalarına direkt olarak etkileyecek olan bu katmanda en temelde akım ve gerilim ölçümlerinden yararlanılarak güç hesaplama prensibine dayanır. Ölçümler sonucu elde edilen güç değerleri, zamana bağımlı olarak toplanarak toplam enerji tüketimini oluşturmaktadır. Bu tüketim değeri birimi kWh cinsindedir. Elektrik enerjisi, toplam tüketim üzerinden tüketicilere faturalandırılmaktadır.

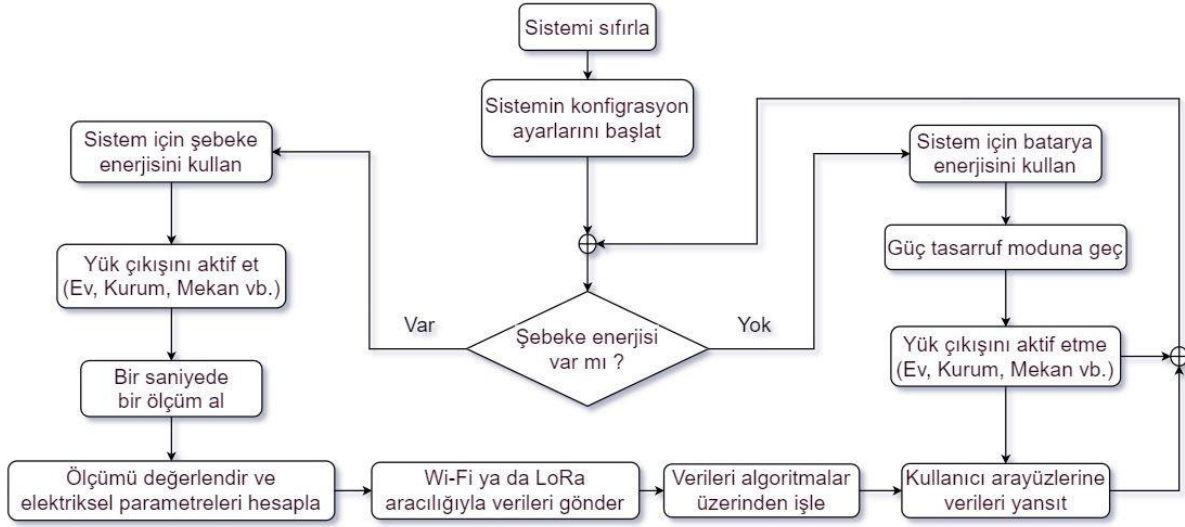
Elektrik şebekesine bağlanılan PZEM-004T enerji ölçüm modülü bünyesinde yer alan akım ve gerilim sensör devreleri ile anlık olarak ölçümler almaktadır. Temel iki parametreye ilave olarak faz açısı değerini de hesaplamasıyla birlikte aktif güç ve reaktif güç değerlerini hesaplamaktadır. Tüm elektriksel ölçüm verileri, kontrolcü sisteminde yer alan STM32F103 mikrokontrolçüsüne UART haberleşme protokolü üzerinden aktarılmaktadır.

Kontrolcü katmanında, STM32F103 mikrokontrolçüsü yer almaktadır. Ölçümleme verilerinin alınması, verilerin işlenmesi, elektriksel parametreleri LCD üzerinden görüntülenmesi, güç anahtarlama, LoRa RF ve Wi-Fi haberleşmesi ile verilerin iletilmesi gibi cihazın tüm fonksiyonlarını yöneten algoritma bu mikrokontrolcü içerisindeki yazılımda yer almaktadır.

Sistem yazılımı, STM32Cube IDE programı üzerinden C programlama dilinde tasarlanmıştır. Sistem yazılımı içerisinde, aktif ve reaktif güç değerleri Timer Interrupt fonksiyonu içerisinde her saniyede kümülatif olacak biçimde toplam tüketim değişkeninde toplanır. Sistemin algoritma akış diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.

Anahtarlama katmanında, röle modülü yer almaktadır. Elektrik şebeke hatlarında oluşabilecek tehlikeli gerilim seviyelerinde, sistem otomatik olarak röle modülü üzerinden çıkış hattının enerjisini kesmektedir. Ayrıca, olası olağanüstü durumlarda ya da istek dahilinde kullanıcılar enerjiyi uzaktan kapatabilmektedir.

Güç katmanında, anahtarlama devresi ve güç kaynağı modülü yer almaktadır. Sistem içerisinde yer alan tüm elektronik ekipmanların enerji besleme gereksinimi bu katman tarafından karşılanmaktadır. Sistem şebeke enerjisi olduğu zaman beslemeyi buradan alırken, şebeke enerjisi olmadığı zaman beslemeyi pil devresinden almaktadır. Her iki durumda da enerji besleme girişi regülötör katından geçirilerek sisteme dağıtılmaktadır.



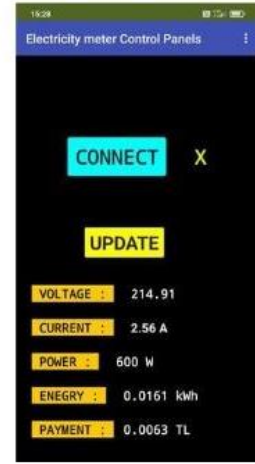
Şekil 7. Sistemin algoritma akış diyagramı

Figure 7. Algorithm flow diagram of the system

Haberleşme katmanında, ESP8266 Wi-Fi ve LoRa RF modülleri yer almaktadır. Bu katmanda internet altyapısının olduğu coğrafi bölgelerde Wi-Fi haberleşmesi kullanılırken, olmadığı bölgelerde ise RF haberleşmesi kullanılarak verilerin anlık olarak uzaktan okunması sağlanmıştır. Sistem içerisinde yer alan tüketim verileri MQTT haberleşme protokolü üzerinden brokera (Shifter.io) yayınlamaktadır. Kullanıcılar hem mobil uygulama hem de web sunucusu üzerinden tüketim verilerini takip edebilmektedir. Sistemin kullanıcı panelleri Şekil 8.a ve 8.b’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8. (a) Mobil uygulama (b) web arayüzü

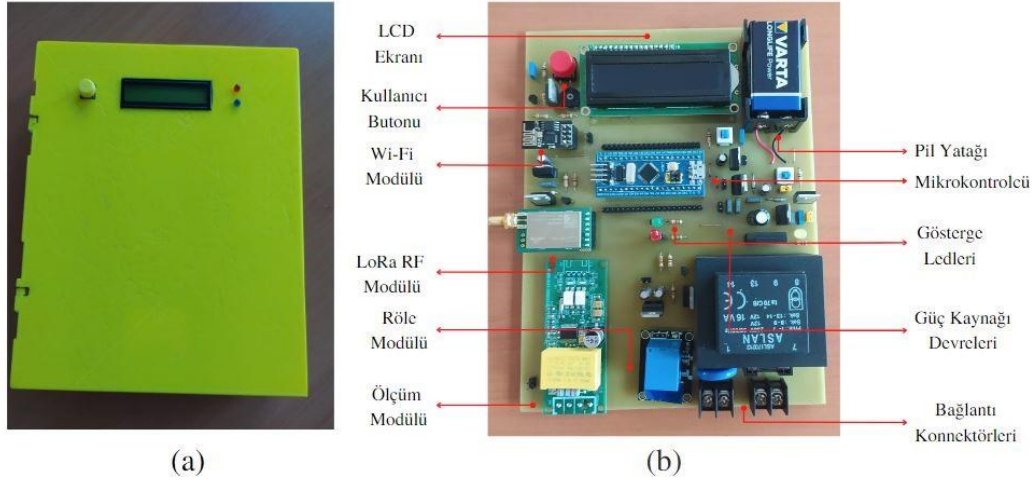
Figure 8. (a) mobile application interface (b) web application interface

Gösterge katmanında, 16x2 LCD modülü yer almaktadır. Elektronik sistemin kullanıcılar ile etkileşimde bulunmasında bu katman önemli bir görev üstlenmektedir. Sistem tarafından ölçümlenen ve anlamlı bilgilere dönüştürülen veriler, kullanıcılara gösterge ekranları tarafından gösterilmektedir.

Bu çalışmada, tüm sistemi çalıştıracak olan gömülü sistem yazılımı özgün olarak tasarlanmıştır. Güç takip edilebilirliğini artırması, sistem kesintilerinin daha hızlı tespit edilebilirliği, güç dengesizlikleri olduğunda korumalı entegrasyonları aktifliği gibi özellikler kazandırılmıştır. Böylece, maddi kayıpların ve zararların

önüne geçilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, internet erişiminin olmadığı koşullarda alternatif bir çözüm olarak RF haberleşmesi ile sistem entegrasyon problemi çözümlenmiştir.

Çalışmanın genel kapsamı incelendiğinde, yeni nesil elektrik sayaçlarının geliştirilmesinden, iletişim, işlemsel yönetim sistemlerinin inşasına ve istikrarlı operasyonuna kadar birçok hedefi kapsamaktadır. Uygulaması gerçekleştirilen cihaz Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. (a) Cihazın dış ve (b) iç görünümü
Figure 9. (a) External view of the device (b) internal view of the device

3. Bulgular ve tartışma

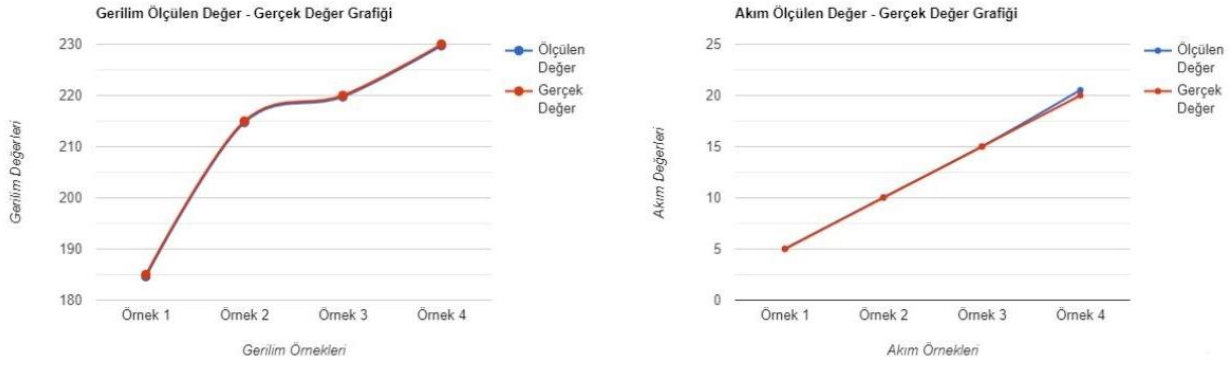
3. Findings and discussion

Akıllı elektrik sayacının deneysel ortamda testini yapabilmek için enerji kalibrasyon cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada, sayacın farklı ölçüm değerlerine karşı gösterdiği tepki ve doğruluğu test edebilmek için enerji kalibrasyon cihazının harcadığı gücü, panel üzerinden manuel olarak artırılarak sayacın ölçüm doğruluğu gözlemlenmiştir. Cihazın testlerinde, gerilim ve akım skalasında yer alan farklı değerler üzerinden sistemin performansı incelenmiştir. Cihazın ölçüm değerlerini kıyaslayabilmek adına referans olarak enerji kalibrasyon cihazının ölçüm paneli kullanılmıştır. Elektrik sayacı ile enerji kalibrasyon cihazı ölçümlerinin arasındaki fark, hata payı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kademeli olarak test edilen cihazın ölçüm tablosu Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Gerilim ve akım için ölçülen değer ve gerçek değer için ölçüm tablosu
Table 1. Measurement table for measured value and actual value for voltage and current

Ölçülen değer	Gerilim		Ölçülen değer	Akım	
	Gerçek değer	Doğruluk		Gerçek değer	Doğruluk
184.6 V	185.0 V	%99.78	5.029 A	5.0 A	%99.42
214.7 V	215.0 V	%99.86	10.048 A	10.0 A	%99.52
219.7 V	220.0 V	%99.86	15.022 A	15.0 A	%99.85
229.7 V	230.0 V	%99.86	20.18 A	20.0 A	%99.10

Tablo 1’den görüldüğü üzere, her gerilim ve akım değeri için ölçüm doğruluğu yaklaşık olarak %99.65 olarak belirlenmiştir. Ölçümlenen değer ile referans değeri birbirine yakın olduğu ve arasındaki farkın ihmal edilebilir boyutta olduğu gözlemlenmiştir. Cihazın ölçüm doğruluk grafiği Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Cihazın ölçüm doğruluk grafiği

Figure 10. Measurement accuracy chart of the device

Elektrik sayaç cihazlarının performansını değerlendirilirken ölçüm doğruluğu belirleyici etkenler arasındadır. Cihazın düşük hata payları ile uzun yıllar kararlı ölçümler yapabilmesi gerekmektedir. Bunun içinde profesyonel laboratuvarlarda, gelişmiş Ar-Ge çalışmaları sonucunda piyasa standartlarını karşılayan bir ürün ortaya konulmaktadır. Sayacın ölçülediği tüketim verileri, gerçek zamanlı olarak hem LCD ekranı göstergesine hem de mobil uygulama arayüzüne internet aracılığıyla aktarılmıştır. Ayrıca, mobil uygulama arayüzü ekranındaki buton ile enerjinin açma-kapatma testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında test edilen cihazın görüntüsü Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Cihazın laboratuvar ortamında test görüntüsü

Figure 11. Test image of the device in laboratory environment

Çalışmanın uygulanabilirlik boyutu incelendiğinde hem maliyetlerin indirgenmesi hem en optimum yaklaşım tarzı olarak şu anda hanelerin çoğunda takılı olan sayaçlara entegre edilebilir bir IoT (Internet of Things) cihazına dönüştürülebilir. Eğer bahsi geçen tüm özelliklerin tek bir sistem altında olması isteniyorsa proje yerleşik hayatta kullanılan cihazların yenileri ile değiştirilerek mümkün olabilir. Her iki yöntem de akıllı elektrik şebekeleri ve ev sistemleri otomasyonuna kolayca entegre olarak bu sistemlere hizmet edebilirler.

4. Sonuç ve değerlendirme

4. Conclusion and evaluation

Elektrik enerjisi, kaynakların sınırlı olması ve enerjiye olan talebin her geçen gün artması nedeniyle mevcut kaynakların efektif biçimde kullanılması gerekmektedir. Elektrik enerjisinin bilinçli kullanılmaması

üretimden tüketime kadar olan tüm süreçte birçok kayıplara uğramaktadır. Enerjinin verimli kullanılması için kayıpların iyileştirilmesi gerekmektedir. Tüm bu süreçlerde yaşanan kayıpların önüne geçilmesi akıllı elektrik şebekelerinin ana hedefidir.

Bu çalışmada, elektrik enerjisi kullanan tüketicilerin tüketim bilgilerini anlık olarak izleyebilmesi için bir akıllı elektrik sayacı tasarlanmıştır. Akıllı elektrik sayacı tarafından ölçümlenen tüm veriler, internet erişimi olan coğrafi bölgelere MQTT haberleşme protokolü üzerinden Shifter.io Cloud sunucusuna, internet erişimi olmayan bölgelere ise LoRa RF haberleşmesi ile veri merkezine kablosuz olarak aktarılmıştır. Ayrıca, kullanıcıların cep telefonlarından verileri uzaktan okuyabilmesi ve enerjiyi kontrol edebilmeleri için App Inventor programında bir mobil uygulama arayüzü geliştirilmiştir. Elektrik enerjisi tüketen kullanıcıların tüketim bilgilerini anlık olarak takip edebilmeleri ve analiz edebilmeleri sağlanmıştır. Böylece, enerjinin tasarruflu tüketilmesi hakkında bilinç ve alışkanlık kazandırılmasının yanı sıra enerji üretici ya da dağıtıcı firmalarına istatistiksel veriler toplanarak gelecek adına planlama yapılmasında katkı sunulmuştur. Ölçülen değerlerle mevcut değerler arasında $> \%99$ oranında uyum gözlenmiştir. Tüm sistemi çalıştıracak olan donanım ve gömülü sistem yazılımı özgün olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada sunulan yöntem ile akıllı elektrik şebekelerinin en önemli bileşeni olan akıllı elektrik sayacı uygulamasına bir örnek teşkil etmektedir. Ayrıca, proje kapsamında LoRa RF haberleşme altyapısı kurulumu için elektrik sayaçların aynı zamanda modem olarak da kullanılabilmesi sunulmuştur. Böylece, geniş alanlarda veri toplama ve iletişim için kapsama bölgesi planlamasında optimizasyon yapılmıştır.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma TÜBİTAK kurumunun 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir.

Yazar katkısı

Author contribution

Araştırmacılarından Mertcan NANE, proje fikrinin oluşturulması, elektronik sistem tasarımı, donanım tasarımı, Ar-Ge sürecindeki tüm saha testlerinin yapılması ve makalenin düzenlenmesini gerçekleştirmiştir. Halil GÖK ve Ömür AKYAZI, proje fikrinin geliştirilmesi, gömülü sistem yazılımının hazırlanması, Ar-Ge sürecinin planlaması ve makalenin ilgili tablo ve görsellerin hazırlanmasında yer almıştır. Canan AKSOY, literatür taraması, makale yazımının düzenlenmesi, ilgili tablo verilerinin yorumlanmasında katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

Adrian, I.P., Alexandru, L., Eugen, C. (2019). LoRaWAN gateway: design, implementation and testing in real environment. *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*

Ahmad, F. (2021). Computer networking layers based on the OSI model. *Test Engineering and Management*, 83, 6485-6495.

- Akkaya, O. S., & Soy, H. (2021). Hardware design of single-phase smart electricity meter based on multiple wireless connectivity technologies. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32, 332-338. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1040829>
- Aktaş, A. & Kırçıçek, Y. (2021). Solar hybrid systems for smart grids. *ScienceDirect*, 153–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88499-0.00008-2>
- Anup, M., Yaju, R., Ashish, S., Ajay, S., Anup, T., Francisco, G., Petr, K. & Seokjoo, S. (2021) Evaluation of a LoRa mesh network for smart metering in rural locations. *Electronics*, 10(6), 751. <https://doi.org/10.3390/electronics10060751>
- Bayindir, R., Colak, I., Fulli, G., & Demirtas, K. (2016). Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 499-516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.002>
- Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 146, 2589-2625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
- Düzgün, B. (2018). Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 621-632. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389604>
- Eldem, M.O. (2017). Akıllı şebekeler. *TMMOB EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni 2017/2*, 6-9.
- Folasade, D., Sunday, O., Akinlolu, P. & Oluwafemi, S. (2021). Communication network simulation for smart metering applications: a review. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 5(2), 101-128. <https://doi.org/10.38088/jise.835725>
- Fredrik, E.A., Yun, A. & Michael, C. (2021). Communication technologies for smart grid: a comprehensive survey. *Sensors*, 21(23), 8087. <https://doi.org/10.3390/s21238087>
- İlisu, F., Kolukısa Tarhan, A., Kavak, K. (2020). Akıllı şebeke uygunluk modelinin dünya çapındaki uyarlamaları ve türkiye için öneriler. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(2), 123-136. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.533221>
- J.W. Fourie & J.E. Calmeyer. (2004). A statistical method to minimize electrical energy losses in a local electricity distribution network. *IEEE AFRICON. 7th Africon Conference in Africa*, 667-673.
- Jixuan, Z., Li, L. & David, W.G. (2013). Smart meters in smart grid: an overview. *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 57-64. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2013.17>
- Karaman, B., Taşkın, S. & Tokay, M. (2021). Gerçek zamanlı enerji izleme ve tüketici farkındalığı için LabVIEW™ programı ile otomatik sayaç okuma. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(2), 225-232. <https://doi.org/10.7240/jeps.759782>
- Kocaman, B. (2018). Teknik olmayan enerji kayıplarının azaltılmasında PLC sayaçlarının önemi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 220-230. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.420198>
- Martins, P., Oleskovicz, M. & Silva Pessoa, A. L. (2019). A Survey on smart grids: concerns, advances, and trends. *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference- Latin America (ISGT Latin America)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895296>
- MQTT, (2022). *The standart for IoT messaging*. <https://mqtt.org/>
- Önen, A., Kuran, M.Ş. (2015). Günümüzün ve geleceğin elektrik şebekeleri, *Bilim ve Teknik Dergisi*, 54-57.
- Salman, S. K. (2019). Evolution of conventional power systems to smart grids. *2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2019.8893444>
- The HiveMQ Team, (2022). MQTT client and broker and MQTT server and connection establishment explained-MQTT essentials: part 3. <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-3-client-broker-connection-establishment/>
- Win, H. (2017). Implementation of WiFi-based single phase smart meter for Internet of Things (IoT). *5th International Electrical Engineering Congress*, 8(10).

Xudong, H., Jian W., Jiqiang L., Enze Y., Kailun W., & Zhen H. (2021). Smart grid nontechnical loss detection based on power gateway consortium blockchain, *Hindawi Security and Communication Networks*, 2, 20. <https://doi.org/10.1155/2021/9501572>

Fotovoltaik sistemlerde gri kurt optimizasyon (gko) algoritması ve artımlı iletkenlik (ai) yönteminin maksimum güç noktası takibi (mgnt) için karşılaştırılması

Comparison of grey wolf optimizer (gwo) and incremental conductance (inc) method for maximum power point tracking (mppt) in photovoltaic systems

Ömer ÖZTÜRK^{*1,a} , Ömür AKYAZI^{2,b}  Bora ÇAVDAR^{3,c} 

^{1,2,3}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 18.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

Öz

Dünyadaki enerji ihtiyacı teknolojiye yaşanan gelişmelerle gün geçtikçe artmaktadır. Bu sebeple, çevreye daha az zararlı olan yenilenebilir enerji kaynaklarına eğilim söz konusudur. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında sıklıkla tercih edilen ise doğrudan güneş enerjisinin (fotovoltaik modüllerin) kullanımınıdır. Fotovoltaik modüllerin dezavantajı elektrik şebekelerinde kararlılığı (frekans, gerilim) olumsuz etkilemesi ve sıcaklık, ışınım ve kısmi/tam gölgeleme gibi nedenlerle kesikli üretime sahip olmasıdır. Bu çalışmada kısmi gölgeleme koşulları altında fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası takibi (MGNT) konusu ele alınmaktadır. Çalışmada geleneksel tekniklerden biri olan artımlı iletkenlik yöntemi (AI) ve gri kurt optimizasyonu (GKO) algoritması Matlab/Simulink benzetim ortamında karşılaştırılmaktadır. Sistemin çıkış gücü veriminin GKO algoritması için 98,24% ve AI yöntemi için 93,72% olduğu elde edilmektedir. Sistem çıkış gücünün, GKO algoritması ve AI yöntemi için sırasıyla 0,08 s ve 0,18 s oturma zamanına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, GKO algoritmasının AI yöntemine göre başarısını göstermektedir. Ayrıca çalışmada sistemin GKO algoritmasındaki kurt (parçacık) sayısı değişiminin fotovoltaik sisteminin çıkışını nasıl etkilediği incelenmektedir. Kurt sayısı 3, 4, 5 ve 6 olduğunda sırasıyla 2413, 2196,4, 1536,8 ve 2349 W ortalama çıkış gücü değerleri elde edilmektedir. Kurt sayısı 3'ü geçtiğinde çıkış gücünde salınımların arttığı ve verimin düştüğü gözlemlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Artımlı iletkenlik yöntemi, Gri kurt optimizasyon algoritması, Kısmi gölgeleme, MGNT

Abstract

The need for energy in the world is increasing day by day with the advancements in technology. For this reason, there has been a trend towards renewable energy sources that are less harmful to the environment. Among renewable energy sources, solar energy (photovoltaic modules) is often preferred. The disadvantages of photovoltaic modules are that they negatively affect the stability (frequency, voltage) of electricity grids and have intermittent generation due to temperature, radiation and partial/full shading. This paper discusses maximum power point tracking (MPPT) in photovoltaic systems under partial shading conditions. In this study, the incremental conductance method (INC), one of the traditional techniques, and the gray wolf optimization (GWO) algorithm are compared in a Matlab/Simulink simulation environment. The output power efficiency of the system is 98.24% for GWO algorithm and 93.72% for INC method. The system output power is determined to have a settling time of 0.08 s and 0.18 s for the GWO algorithm and the INC method, respectively. These results demonstrate the success of GWO algorithm over INC method. Additionally, the study investigates how the change in the number of wolves (particle) in the GWO algorithm affects the output of the photovoltaic system. When the number of wolves is 3, 4, 5, the average output power values obtained are 2413 W, 2196.4 W, 1536.8 W, and 2349 W, respectively. When the number of wolves exceeds 3, oscillations in output power increase and efficiency decreases.

Keywords: Incremental conductance method, Grey wolf optimizer, Partial shading, MPPT

*a Ömer ÖZTÜRK; 412008@ogr.ktu.edu.tr

1.Giriş

1.Introduction

Teknolojinin gelişmesiyle enerjiye olan talep gün geçtikçe artmaktadır (Zafar vd., 2021). Artan enerji talebini karşılamak için fosil yakıtların kullanımı, maliyetleri ve karbon ayak izinin çevreye vermiş olduğu hasarı artırmaktadır (Mirza vd., 2020). Ayrıca fosil yakıtlar tükenme tehlikesiyle karşı karşıyadır. Bu gibi durumları göz önüne alan ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir (Mirza vd., 2020). Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimler incelendiğinde ise güneş enerjisinden elektrik üretimi diğer kaynaklara göre ön plandadır. Bu durum Tablo 1’de açıkça görülmektedir (Murdock vd., 2021).

Tablo 1. Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücü
Table 1. Installed capacity of renewable energy sources in the world

Santral türü/Güç	Kurulu güç (GW)		Artış (%)
	2020 yılı	2021 yılı	
Hidrolik enerji kapasitesi	1168	1195	2,31
Solar kapasitesi	767	942	22,82
Rüzgâr gücü kapasitesi	745	845	13,42
Biyo-enerji kapasitesi	133	143	7,52
Jeotermal enerji kapasitesi	14.2	14.5	2,11

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin popülerliği avantajlarının fazla olmasından kaynaklanır. Bu avantajlar güneşin milyarlarca yıllık enerjiye sahip olması, güneş enerjisinin kolayca elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi, elektrik üretiminde kullanılan panel ve sistemin bakım ve tamir masraflarının diğer üretim birimlerine göre düşük olması ve karbon ayak izinin az olmasıdır (Seyedmahmoudian vd., 2019). Güneş enerjisi kullanımının avantajları yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar fotovoltaik panellerin 15-20% arasında verime sahip olması, yüksek kurulum maliyeti, lineer olmayan P-V ve I-V karakteristikleri ve üretilen gücün salınımlı olmasıdır (Eetivand vd., 2022). Ayrıca fotovoltaik (FV) panellerin doğrusal olmayan elektriksel özelliklere sahip olması sebebiyle sıcaklık, rüzgâr, ışım, çevresel etkilerin oluşturduğu kısmi gölgelemelerin (ağaç, ev, hayvan) sistemin çıkış gücünü yüksek oranda etkilemesi de güneş enerjisi kullanımının dezavantajları arasındadır (Altıntaş vd., 2021).

FV modüllerinde oluşan gölgeleme etkisi güç-gerilim karakteristiğinde birden fazla maksimum güç noktası oluşturmaktadır (Sholikhah vd., 2022). Bu tepe noktalar maksimum gücü yakalamayı zorlaştırmaktadır (Zafar vd., 2021). Kısmi gölgeleme sonucu güç-gerilim ve akım-gerilim karakteristiğinde oluşan tepe noktalardan bir tanesi küresel maksimum gücün elde edilmesini sağlarken diğer noktalar küresel maksimum güç değerinden uzaklaşmasını ve yerel güç değerlerine ulaşılmasını sağlar (Gümüş vd., 2021). Bu sorunu çözmek için araştırmacılar maksimum güç noktası takibi (MGNT) adı verilen bir teknik geliştirmişlerdir (Gümüş vd., 2021). Bu tekniğin temel amacı maksimum güce yakınsamayı ve kararlılığı sağlamasıdır (Azli vd., 2022).

MGNT tekniği için literatürde sıkça kullanılan geleneksel yöntemler kısa devre akımı (KDA) (Baba vd., 2020), açık devre gerilimi (ADG) (Baba vd., 2020), değiştir ve gözle (D-G) (Chtita vd., 2022) ve artımlı iletkenlik (Aİ) (Altıntaş vd., 2021) yöntemleridir. Bunlardan en çok tercih edilenleri ise D-G ve Aİ yöntemleridir. D-G yönteminin çalışma prensibi panele küçük bir gerilim uygulanarak panel gücündeki değişimin bir önceki güç ile kıyaslanmasıdır (Ahmed vd., 2015). Güçte gerçekleştirilen kıyas sonucu değerlendirilerek maksimum güç noktasına ulaşılan kadar uygulama devam ettirilir. Bu yöntemin sıkça tercih edilmesinin sebebi maliyetinin ucuz ve kullanımının kolay olmasıdır. Bu yöntem çok popüler olsa da panelde oluşan kısmi gölgeleme durumunda küresel ve yerel maksimum güç noktaları arasında takılmaktadır (Javed vd., 2022). Aİ yöntemi ise paneldeki akım ve gerilim değerlerini aşamalı olarak değiştirerek gücün gerilime göre değişim oranının ($\Delta P/\Delta V$) hangi yönde olduğunu tespit etmek için FV panelin artırılmış iletkenliğini ($\Delta I/\Delta V$) kullanır. Bu yöntem de kısmi gölgeleme koşulları altında küresel ve yerel güç noktaları arasında takılmaktadır (Salman vd., 2018). Kısmi gölgeleme durumunda geleneksel MGNT teknikleri yetersiz olduğu anlaşılmakta olup bu sorunun üstesinden gelebilmek için araştırmacılar yapay sinir ağları (Almonacid

vd., 2010), bulanık mantık ve meta-sezgisel algoritmalara yönelmiştir (Vankadara & Mihet-Popa 2022a; Zhai vd., 2012).

Meta-sezgisel algoritmalar lineer olmayan gerilim-güç ve akım-gerilim karakteristiklerindeki yerel güç noktalarına takılmadan küresel güç noktalarına kolaylıkla ulaşabilmektedir (Eetivand vd., 2022). Bu sebeple literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde meta-sezgisel algoritmaların oldukça yaygın kullanıldığı görülmektedir. Literatürde FV sistemlerinde MGNT tekniklerinde kullanılan meta-sezgisel algoritmaları; Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) (Nusaif vd., 2020), Genetik Algoritma (GA) (Daraban vd., 2014), Guguk Kuşu Algoritması (GKA) (Basha vd., 2020), Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (GKO) (Mohanty vd., 2015), At Sürüsü Optimizasyon Algoritması (ASOA) (Sarwar vd., 2022), Hiper-Küresel Arama Algoritması (HKAA) (Eetivand vd., 2022), Yapay Arı Kolonisi (YAK) (Fan vd., 2022), Hibrit Genetik ve GKO Algoritması (GA-GKO) (Yadav vd., 2022), Yusufçuk Algoritması (YA) (Mansoor & Javed, 2020), Çekirge Algoritması (ÇA) (Mansoor & Javed, 2020b), Grup Öğretimi Algoritması (GÖA) (Zafar vd., 2020), Hibrit Gri Kurt- Sinüs Kosinüs Algoritması (GKOSKA) (Zafar vd., 2021), Harris Kartalı Algoritması (HKA) (Mansoor & Ling, 2020a), Uçan Sincap Algoritması (USA) (Singh vd., 2020), Levy Uçuşu Algoritması (LUA) (Charin vd., 2021) ve Deniz Yırtıcısı Algoritması (DYA) (Vankadara vd., 2022b) örnek olarak verilebilir. Tablo 2’ de MGNT için kullanılan yöntemlerin kıyaslaması yapılmaktadır.

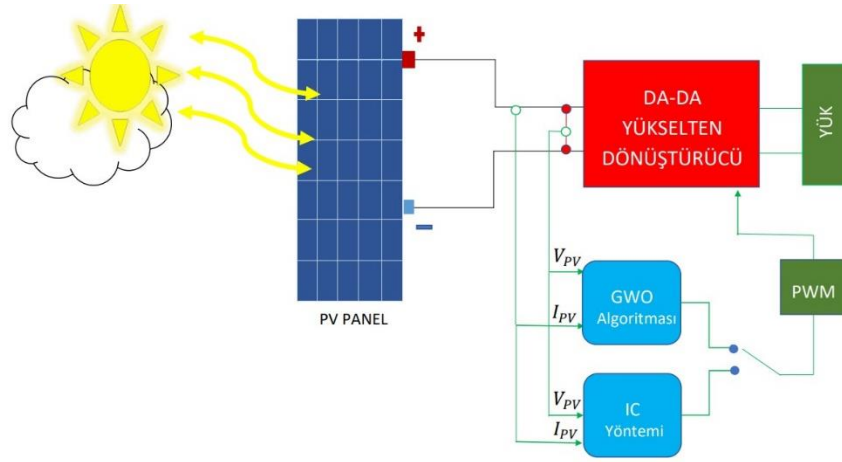
Tablo 2. MGNT teknikleri ve özellikleri

Table 2. MPPT techniques and features

Yıl	Referans	MGNT tekniği	Takip hızı	Dönüştürücü tipi	Yerel noktaya takılma	Gölgeleme altında performans
2012	Zhai vd.	PSO	Orta	Yükselten	Düşük	Orta
2015	Mohanty vd.	GKO	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2020	Basha vd.	GKA	Yüksek	SEPIC	Düşük	Yüksek
2020	Mansoor & Javed	YA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2020	Mansoor & Javed	ÇA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2020	Zafar vd.	GÖA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2020	Mansoor & Ling	HKA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2020	Singh vd.	USA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2021	Zafar vd.	GKOSKA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2021	Charin vd.	LUA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2022	Chtita vd.	D-G	Düşük	Yükselten	Yüksek	Düşük
2022	Sarwar vd.	ASOA	Yüksek	CUK	Düşük	Yüksek
2022	Eetivand vd.	HKAA	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek
2022	Fan vd.	YAK	Yüksek	Yükselten	Düşük	Orta
2022	Yadav vd.	GA-GKO	Yüksek	Yükselten	Düşük	Yüksek

Bu çalışmada meta-sezgisel algoritmalarından GKO ile hava koşullarından kaynaklı meydana gelen kısmi gölgeleme durumu için sistem yanıtı optimize edilmiştir. Meta-sezgisel algoritmalarda rastgele kullanılan parametreler küresel maksimum/minimum noktaya yakınsamayı engelleyebilir (Singh vd., 2020). Bu sebeple çalışmada farklı parçacık (kurt) sayısı üzerinde durularak kullanılan yöntemin başarısı artırılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntem geleneksel yöntemlerden ön plana çıkan AI yöntemiyle kıyaslanarak kullanılan yöntemin başarısı ispatlanmıştır. .

Şekil 1’de çalışmada kullanılan sistemin modeli verilmektedir.



Şekil 1. FV panel sistem diyagramı
Figure 1. PV panel system diagram

Makalenin sonraki bölümlerinin içeriği aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- 2. Bölüm: Bu bölümde FV panelinin eşdeğer devresi, matematiksel ifadesi, farklı sıcaklık ve ışınım durumundaki tepkisi, kısmi gölgeleme koşullarının etkisi ele alınmaktadır. Ayrıca yükselten dönüştürücüler, GKO algoritması ve Aİ açıklanmaktadır.
- 3. Bölüm: Bu bölümde sistemin simülasyon sonuçları ve performans analizleri ele alınmaktadır.
- 4. Bölüm: Bu bölümde çalışmanın tüm sonuçları birlikte değerlendirilmekte ve tartışılmaktadır.

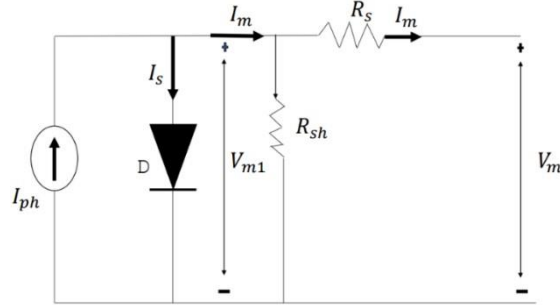
2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1. FV panel modeli ve kısmi gölgeleme koşulları

2.1. PV panel model and partial shading conditions

Karmaşık matematiksel hesaplar içermemesi sebebiyle FV panellerde çoğunlukla tek diyotlu modeller tercih edilmektedir (Vankadara vd., 2022a). Bir FV modülü akım kaynağı ve bu kaynağa paralel şekilde bağlanan bir adet diyottan oluşmaktadır. Şekil 2’de tek diyotlu bir FV modülün eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2. FV modülün eşdeğer devresi
Figure 2. Equivalent circuit of the PV module

Burada I_{ph} ışığa bağımlı akım kaynağı, D diyot, I_s diyottan geçen akım, R_{sh} toprağa akan kaçak akımlardan meydana gelen paralel direnç, R_s ise panelin iç kayıplarını ifade eden seri dirençtir. Kirchoff’un Akım Yasasını (KAY) devrede uygulayacak olursak (Gümüş vd., 2021):

$$I_m = I_{ph} - I_s \quad (1)$$

$$I_m = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_m + I_m R_s)}{n.k.T}\right) - 1 \right] - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

Denklem 2' de, n kalite faktörünü, k Boltzmann sabitini, q elektron yükünü, T panel hücresi sıcaklığını, V_m panel hücreğine düşen gerilim değerini ve I_0 ters diyotun ters doyum akımını temsil etmektedir.

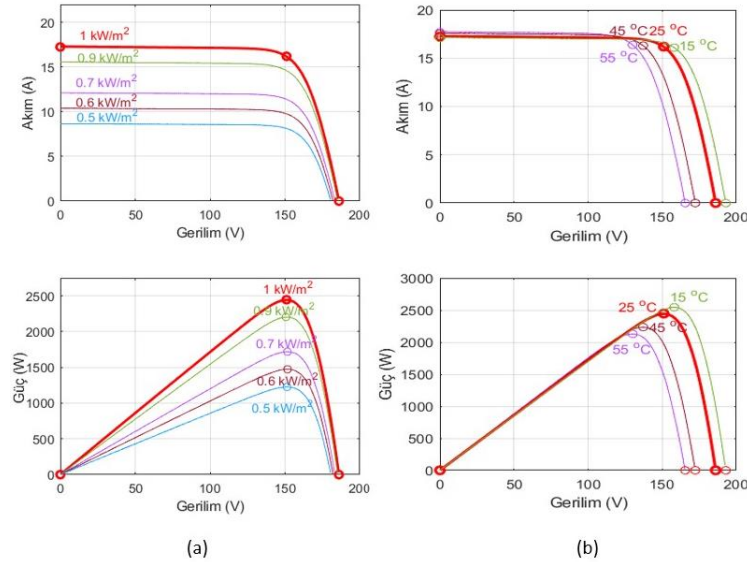
FV panelinin güç değerini yükseltmek için modülleri seri veya paralel bağlamak yeterlidir. Modüller birbirine seri bağlanırsa gerilim değeri, paralel bağlanırsa akım değeri artırılmış olur. Modüllerin seri veya paralel bağlandığı varsayılırsa denklem 3 elde edilir. Burada N_s seri hücre sayısını, N_p ise paralel hücre sayısını temsil etmektedir (Karagöz, 2021).

$$I_m = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V_m + I_m R_s}{N_s} \right)}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{N_p \cdot V_m + I_m \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

2.2. Değişken sıcaklık ve ışınım durumunda fotovoltaik sistemlerin tepkisi

2.2. Response of photovoltaic systems under variable temperature and radiation

FV sistemlerinin verimini etkileyen en önemli iki faktör sıcaklık ve ışınımdır. Test koşullarında bir FV panelin ışınım değeri 1000 W/m^2 sıcaklık değeri ise 25°C kabul edilmektedir. Bu koşullar sürekli sağlanmayabilir bu sebeple değişken durum karşısında akım ve gerilim değerleri etkilenir (Suryavanshi vd., 2012). Şekil 3' de çalışmada kullanılan panellerin farklı ışınım ve sıcaklık değerlerine göre I-V ve P-V grafikleri verilmiştir.



Şekil 3. (a) Farklı ışınım değerlerine göre I-V grafiği ve P-V grafiği (b) Farklı sıcaklık değerlerine göre I-V grafiği ve P-V grafiği

Figure 3. (a) I-V graph and P-V graph according to different radiation values (b) I-V graph and P-V graph according to different temperature values

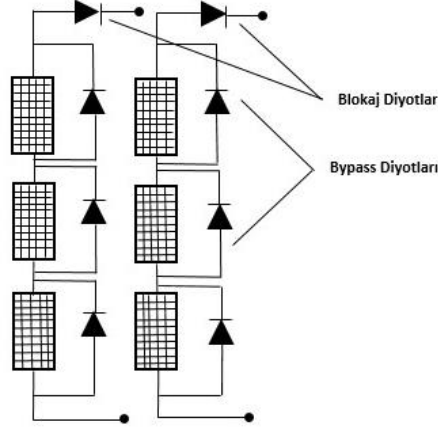
Şekil 3 (a)'da görüldüğü üzere panele 5 farklı ışınım değeri uygulanmıştır. Sabit sıcaklıkta ışınım değeri ne kadar yüksekse akım değeri de o kadar yüksektir. Akım değerinin değişimi çıkış gücünü etkileyeceği için çıkış gücü de akımın artışına bağlı olarak artmaktadır. Şekil 3 (b)'de ise sabit ışınım değerinde sıcaklığın artması gerilim değerini düşürmüştür. Gerilim değerinin değişimi çıkış gücünü etkileyeceği için gerilim değerinin azalmasına karşılık çıkış gücü de azalmaktadır.

2.3. Kısmi gölgeleme koşullarında FV panellerinin tepkisi

2.3. Response of PV panels in partial shading conditions

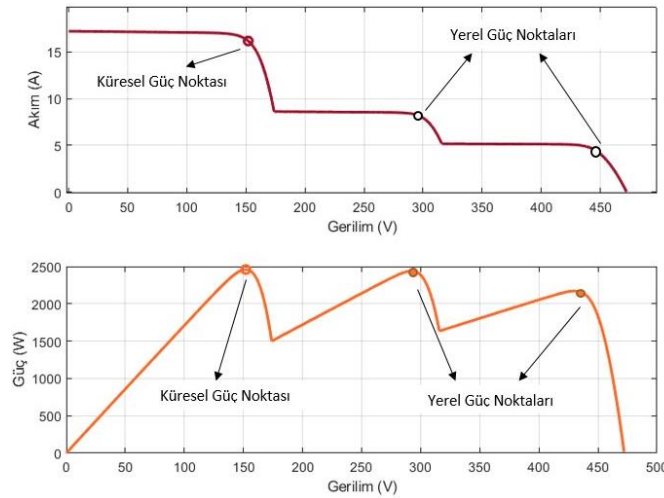
FV panellerinin verimini en çok etkileyen faktörlerden birisi de kısmi gölgeleme durumudur. Seri bağlanan modüller çevresel ve iklimsel etkenler sonucu farklı ışınımlara maruz kalabilir. Bu durumda panellerde kısmi

gölgeleme oluşur (Zafar vd., 2020). Oluşacak güç kayıpları gölgenin durumuna ve konumuna bağlı olarak farklılık gösterebilir (Özdemir vd., 2021). Bulutların konumu, ağaç dalları, yüksek binalar vb. etkenler kısmi gölgeleme meydana getirebilir. Böyle bir durumda oluşan gölgeleme akım değerini düşüreceği için güç değerinde bir azalma görülür. Gölgeleme oluşmayan bölgelerde gölgelemeye maruz kalan kısımlara göre daha çok akım ortaya çıkar ve bu durum sıcak nokta denilen olayı meydana getirir. Sıcak nokta panellere oldukça büyük zararlar vermektedir. Bu sorunun önüne geçebilmek için bypass diyotları panellere paralel olacak şekilde bağlanır. Şekil 4'te bypass diyotunun panele nasıl bağlandığı gösterilmektedir. Böylece panelde oluşabilecek sıcak nokta durumuna karşı önlem alınmış olur. Bu diyotlar sistemde herhangi bir gölgeleme durumu yoksa pasif konumdadır.



Şekil 4. Bypass diyotlarının PV sistemine bağlantısı
Figure 4. Connection of bypass diodes to the PV system

Bypass diyotlarının kullanımı oldukça önemli olsa da bazı negatif özellikleri bulunmaktadır. Bu negatif özelliklerden en önemlisi bypass diyotu iletim halindeyken akım doğrudan diyot üzerinden akarak panellerde güç üretimini kesmesidir. Bunun sonucunda panelin P-V ve I-V karakteristiklerinde hedef küresel noktanın yanında yerel noktalar da oluşacağından sistem daha karmaşık bir hal alacaktır (Kandemir, 2020). Çalışmada kullanılan FV sistemin kısmi gölgelemeye maruz kaldığı durumda oluşan küresel ve yerel maksimum güç noktaları Şekil 5'te belirtilmektedir. Matlab/Simulink kullanılarak benzetimi yapılan FV sisteminin kısmi gölgeleme altında maksimum güç değeri 2456W olarak belirlenmiştir.

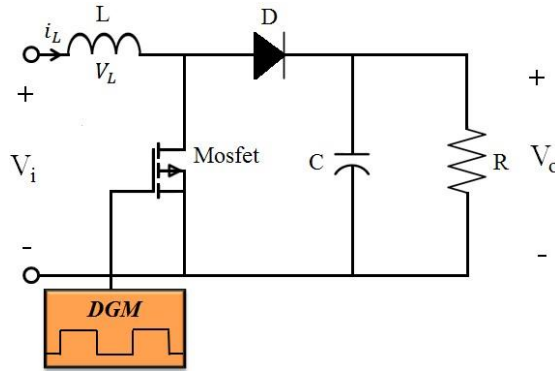


Şekil 5. P-V ve I-V karakteristiklerinde meydana gelen güç noktaları
Figure 5. The power points that occur in the P-V and I-V characteristics

2.4.DA-DA yükselten dönüştürücü

2.4.DC-DC boost converter

Güneş panellerinde üretilen elektrik enerjisi günün farklı saatlerinde farklı gerilim değerlerinde olur. Gerilim değerinin sabit olması istendiği için dönüştürücüler kullanılır (Demirtaş vd., 2008). Bu nedenle güneş enerjisi sistemlerinde anahtarlamalı DA-DA dönüştürücülere oldukça fazla ihtiyaç duyulur. Bu dönüştürücüler yüksek frekansta çalıştıkları için boyutları küçüktür. Boyutlarının küçük olması maliyeti azaltması sebebiyle avantajlıdır (Kaysal vd., 2023). Yüksek frekans ve hızlı anahtarlama her ne kadar avantaj olsa da beraberinde dezavantajlar getirmektedir. Yüksek frekans ve hızlı anahtarlama sebebiyle sisteme akım ve gerilim maksimum değere ulaşarak güç kayıplarını artırır (Sreekumar vd., 2008). Anahtarlamalı DA-DA dönüştürücülerin farklı tipleri mevcut olup bu çalışmada yükselten tip dönüştürücü kullanılmıştır. Şekil 6' da DA-DA yükselten dönüştürücünün devresi verilmiştir.



Şekil 6. Yükselten DA-DA dönüştürücü devre
Figure 6. DC-DC boost converter circuit

Yükselten dönüştürücü bobin, diyot, güç anahtarı, kondansatör ve yükten oluşmaktadır. Dönüştürücünün görev döngüsü Denklem 4' de belirtilmiştir. Görev döngüsü ayarlanarak istenilen çıkış gerilim değeri elde edilebilir (Elshara, 2021).

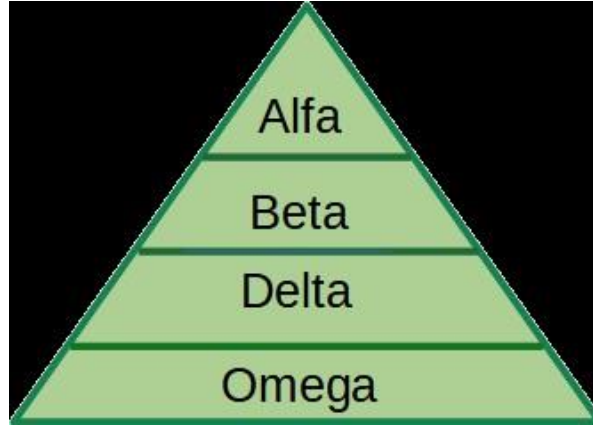
$$D = 1 - \frac{V_{giris}}{V_{çikis}} \quad (4)$$

Dönüştürücünün çalışma prensibi güç anahtarının iletim ve kesim durumuna göre değişir. Anahtarlama elemanı iletimdeyken bobinden akım geçerek enerji depolanır. Diyot ters polaritede olduğu için kondansatör yükü besler. Güç anahtarı kesimde olduğunda ise elde edilen çıkış gerilim değeri bobin ile kaynak gerilim değerlerinin toplamıdır (Gümüş vd., 2021). Bu sayede giriş gerilim değerine kıyasla yük üzerinde daha fazla bir çıkış gerilim değeri elde edilir (Vijayakumar vd., 2013).

2.5.Gri kurt optimizasyon algoritması

2.5.Grey wolf optimizer

GKO algoritması Seyedali Mirjalili, Sayed Mohammad ve Andrew Lewis tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir (Mirjalili vd., 2014). Geliştirilen algorithmada gri kurtların sosyal davranışları (hiyerarşi) ve avlanma sürecinden faydalanılmıştır. Gri kurtlar yaklaşık 5-12 üyeden oluşup grup halinde yaşar ve kendi içlerinde bir hiyerarşi barındırır. Bu hiyerarşide liderler "Alfa" olarak adlandırılır ve bir erkek ve dişi gri kurttan oluşur (Mirjalili vd., 2014). Hiyerarşide ikinci sırada "Beta" gri kurtlar bulunur. Bu kurtlar alfa gri kurtlara sürüyü yönetme konusunda yardımcı olur. Hiyerarşide üçüncü sırada ise "Delta" gri kurtlar bulunur. Bu kurtlar sürü içerisinde nöbetçilik, avcılık ve bakıcılık gibi görevleri üstlenir. Hiyerarşide en altta bulunan gri kurtlar ise "Omega" olarak adlandırılır. Diğer kurtlara boyun eğen bu kurtlar bazı durumlarda bebek bakıcılığı yapar. Gri kurt topluluğundaki hiyerarşik düzen Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Gri kurt topluluğundaki hiyerarşik düzen
Figure 7. The hierarchical order in the gray wolf community

Gri kurtların kendilerine özgü avlanma yöntemi bulunur. Bu yöntemde kurtlar, av hareket etmeyi durduruncaya kadar takip eder ve daha sonra avı çembere alarak sararak saldırır (Mirjalili vd, 2014). Bu durum göz önüne alınarak gri kurtların avın etrafını sarması matematiksel olarak modellenmiştir (Mirjalili vd, 2014).

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (5)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (6)$$

Denklem 5 ve 6'da t güncel iterasyon sayısını, \vec{A} ve \vec{C} vektörel katsayıları, \vec{X}_p ve \vec{X} sırasıyla avın ve gri kurdun vektörel pozisyonunu ifade eder. \vec{A} ve \vec{C} vektörleri sırasıyla denklem 7 ve 8'deki gibi hesaplanır (Mirjalili vd, 2014).

$$\vec{A} = 2\vec{a}\vec{r}_1 - \vec{a} \quad (7)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (8)$$

Denklem 7 ve 8'de hesaplanan \vec{A} ve \vec{C} vektörleri sayesinde gri kurtların av etrafındaki pozisyonu ayarlanır (Mirjalili vd, 2014). Denklem 7 ve 8'de \vec{a} bileşeni doğrusal olarak 2'den 0'a (iterasyon boyunca) azaltılır. Denklemlerde bulunan \vec{r}_1 ve \vec{r}_2 bileşenleri ise $[0,1]$ arasındaki değerleri rastgele alan vektörlerdir. Bu vektörler gri kurtların avın etrafındaki konumlara rastgele yerleşmesine imkân verir (Mirjalili vd, 2014). Burada kullanılan \vec{A} ve \vec{C} vektörlerinin keşif ve sömürü üzerindeki etkisi oldukça fazladır. $|\vec{A}| < 1$ olduğunda çözüm adayı ava yaklaşma, $|\vec{A}| > 1$ olduğunda ise çözüm adayı avdan uzaklaşma eğilimindedir (Mirjalili vd, 2014). İterasyon sayısı arttıkça $|\vec{A}|$ 'nın değerini etkileyen \vec{a} vektörü 0'da doğru yakınsar bu da ava saldırma durumunu ortaya çıkarmaktadır. Sonuç olarak avdan uzaklaşma algoritmanın keşif gücünü artırdığı ava yaklaşma ise sömürü gücünü artırdığı söylenebilir. Keşif için önemli olan bir diğer vektör ise daha önce bahsedildiği üzere \vec{C} vektörüdür (Mirjalili vd, 2014). Bu vektörün \vec{A} vektöründen farkı doğrusal olarak azalma eğilimi dışında hareket etmesi yani rastgele bir süreç içerisinde olmasıdır. Bu sayede algoritmanın herhangi bir iterasyonunda ava yaklaşmak ($|\vec{C}| < 1$) ya da avdan uzaklaşmak ($|\vec{C}| > 1$) mümkün olur (Mirjalili vd, 2014). Bu durum ise çözüm adaylarının yerel minimuma takılmasını engelleyerek keşfi stokastik bir etkiyle güçlendirir.

Problem uzayında en iyi konum hakkında bilgiye sahip olunmadığından başlangıçta her gri kurt problem uzayına rastgele dağılır ve bu uzayda elde edilen en iyi üç sonuç iyiden kötüye olmak üzere sırasıyla Alfa, Beta ve Delta gri kurtlar olarak seçilir (Mirjalili vd, 2014). Daha sonra geriye kalan çözüm adaylarının ise Omega gri kurtlardan oluştuğu varsayılır (Mirjalili vd, 2014). Bu sayede, Alfa, Beta ve Delta gri kurtlarının

elde ettiği en iyi üç çözüme (avlarına) göre Omega gri kurtların konumları güncellenir. Bahsedilen durumun matematiksel modellenmiş denklem 9, 10 ve 11’de verilmektedir (Mirjalili vd, 2014).

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (9)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \vec{D}_\alpha, \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \vec{D}_\beta, \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \vec{D}_\delta \quad (10)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (11)$$

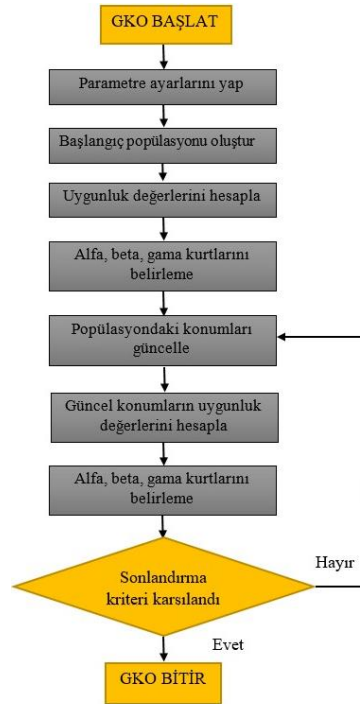
Sosyal davranışları ve avlanma yöntemleri ele alınarak matematiksel modeli ortaya koyulan GKO algoritmasının sözde kodu aşağıda verilmiştir (Mirjalili vd, 2014).

```

Xα: En iyi çözüm adayı (alfa gri kurt)
Xβ: İkinci en iyi çözüm adayı (beta gri kurt)
Xδ: Üçüncü en iyi çözüm adayı (delta gri kurt)
1  :while (t < maksimum iterasyon sayısı)
4  :for tüm çözüm adayları
5  : Denklemler 7 kullanılarak gri kurt konumu güncellenir
6  :end for
7  a, A ve C vektörleri güncellenir
8  Tüm gri kurtların uygunluk (fitness) değeri güncellenir
14 :Xα, Xβ ve Xδ güncellenir
15 :t=t+1
16 :end while
17 :return Xα

```

GKO algoritmasının daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 8’de algoritmanın akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 8. GKO akış diyagramı
Figure 8. GWO flow chart

2.6. Artımlı iletkenlik yöntemi

2.6. Incremental conductance method

Maksimum güç noktası takibinin geleneksel yöntemlerinden olan Aİ yöntemi gücün gerilime göre türevinin hesaplanmasına dayanmaktadır (Kulaksız vd, 2019). Bu yöntemde FV panelinden elde edilen anlık akım ve gerilim değerleri belirlenir. Belirlenen akım ve gerilim değerleri bir önceki değerlerle kıyaslanarak akım ve gerilimde meydana gelen farklar gözlemlenir. FV modülün iletkenliği, akım ve gerilim değerinin artışına göre gözlemlenir (Keskin, 2019). Yöntemde hedef anlık değişimin Aİ değerine eşit olduğu çalışma noktasına ulaşmaktır. Aİ yönteminin matematiksel denklemleri aşağıda verilmiştir (Hussein vd, 2019).

$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{ Çalışma noktası maksimum güç noktasında} \quad (12)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ Çalışma noktası maksimum güç noktasının solunda kalıyor} \quad (13)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ Çalışma noktası maksimum güç noktasının sağında kalıyor} \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemlerde güç yerine $I * V$ yazılırsa denklem 15 elde edilir. Denklem 15' e göre yeniden çıkarımlar yapılabilir.

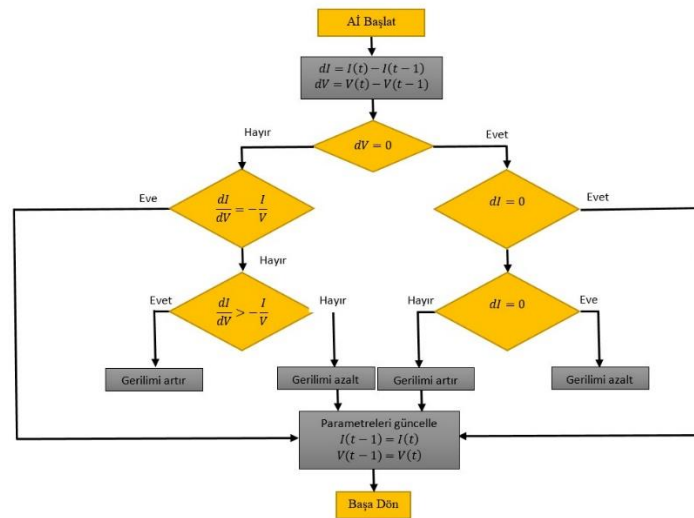
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I*V)}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \text{ Çalışma noktası maksimum güç noktasında} \quad (16)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \text{ Çalışma noktası maksimum güç noktasının solunda kalıyor} \quad (17)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \text{ Çalışma noktası maksimum güç noktasının sağında kalıyor} \quad (18)$$

Aİ yöntemi ucuz ve kolay olmasına rağmen kısmi gölgeleme durumunda verimi düşüktür. Bunun sebebi gölgeleme durumunda FV panellerin küresel güç noktasını yakalayamayarak yerel güç noktasına takılmasıdır. Şekil 9' da Aİ yönteminin akış diyagramı verilmiştir.



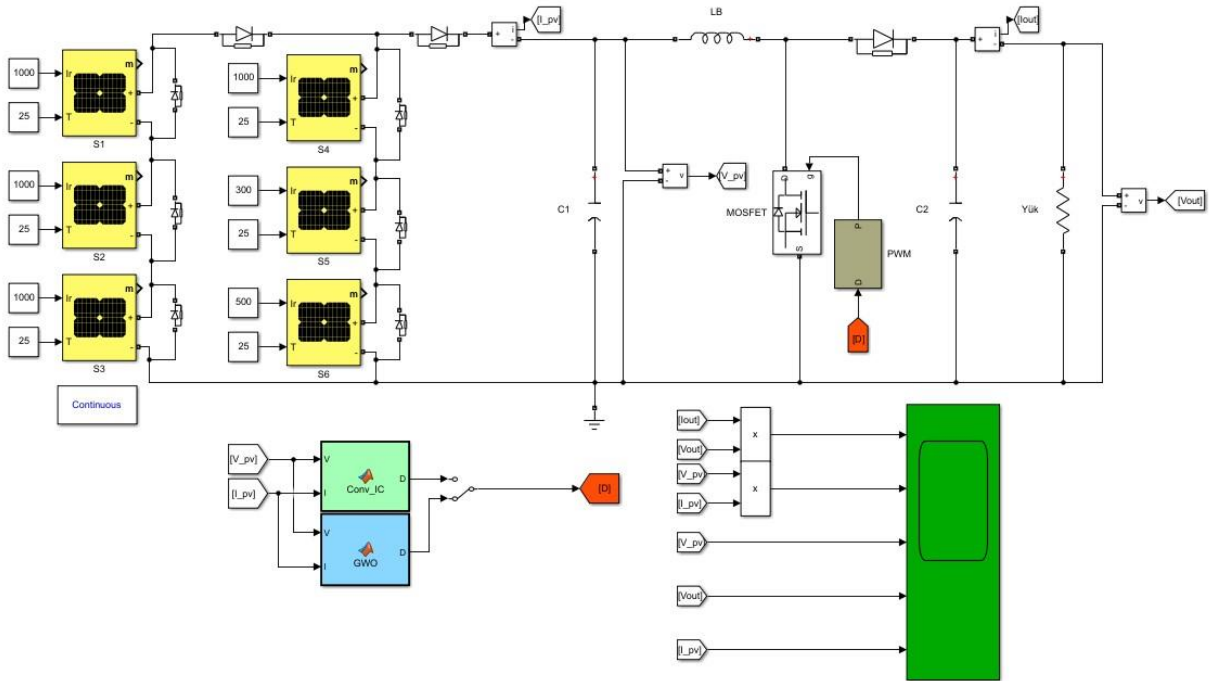
Şekil 9. Aİ akış diyagramı
Figure 9. INC flow chart

3.Bulgular

3. Results

Bu çalışmada maksimum güç takibi için AI yöntemi ile GKO algoritmasının performansları kıyaslanmıştır. Kıyaslama için oluşturulan modelde FV modül, yükselten dönüştürücü devresi, yük ve maksimum güç takibi yapıları bulunmaktadır. Şekil 10' da FV sistemin Matlab/Simulink modeli görülmektedir. Sistemdeki her bir panele düşen ışınım miktarı Tablo 3'te verilmiş olup ortam sıcaklığı sabit (25 °C) olarak kabul edilmiştir. Tablo 3'te son iki (S5 ve S6) paneldeki ışınım miktarları diğer panellerden farklıdır. Ayrıca Şekil 10'da görülen her bir panel kendi içinde dört panelin seri bağlanmasıyla oluşmaktadır. Matlab/Simulink'te oluşturulan FV sisteme sabit sıcaklıkta Tablo 3'te verilen ışınım değerleri uygulandığında küresel güç noktasının 2456 W olduğu görülmüştür. Elde edilen bu maksimum güç değeri aynı zamanda kısmi gölgeleme durumunda Şekil 5'te verilmiş olan küresel güç değeriyle aynıdır.

Tablo 4'te panel parametreleri verilmiştir. GKO algoritmasının kurt sayılarının kıyaslaması için bu sayılar 3, 4, 5 ve 6 olarak ele alınmıştır.



Şekil 10. Sistemin Matlab/Simulink modeli

Figure 10. Matlab/Simulink model of the system

Tablo 3. Panellerin Işınım Miktarları

Table 3. Radiation of the panels

Panel	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Işınım (W/m^2)	1000	1000	1000	1000	300	500

Sistemde kullanılan DA-DA dönüştürücü; hem yük ile güneş paneli arasındaki bağlantıyı sağlar hem de MGNT kontrolü için bir ortam oluşturmaktadır. Sistemde kullanılan DA-DA dönüştürücü parametre değerleri Tablo 5'te verilmiştir (Gümüş vd., 2021).

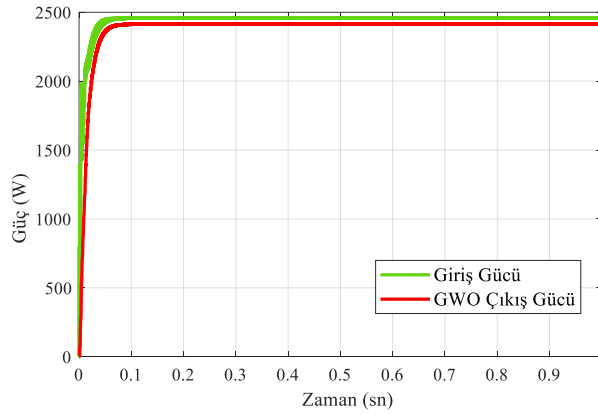
Tablo 4. FV panelin parametreleri
Table 4. Parameter of the PV panel

Parametre	Değer
Paralel diziler	1
Dizi başına seri bağlı modüller	4
Güç (P_{mp})	244,62 W
Maksimum Güç Gerilimi (V_{mp})	30,2 V
Maksimum Güç Akımı (I_{mp})	8,1 A
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	8,62 A
Açık Devre Gerilimi (V_{OC})	37,2 V

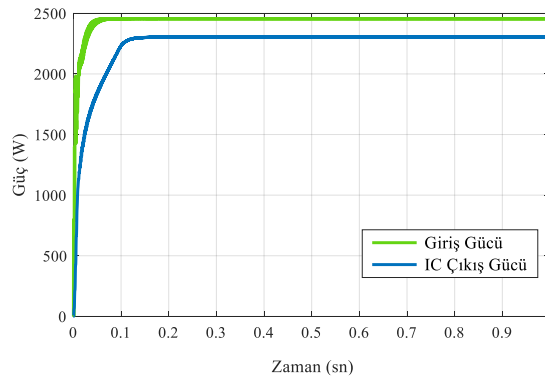
Tablo 5. Yükselten dönüştürücünün parametreleri
Table 5. Parameter of the boost converter

Parametreler	Değeri
Bobin (L)	0,7mH
Giriş Kondansatörü (C_{in})	100 μ F
Giriş Kondansatörü (C_{in})	300 μ F
Yük Direnç (R)	40 Ω

Sistem çalıştırıldığında küresel güç noktasının 2456 W değerinde olduğu görülmektedir. AI yöntemiyle çıkış gücü 2302 W değerine ulaşmaktayken, GKO algoritmasıyla çıkış gücü 2413 W değerine ulaşmaktadır. GKO algoritmasıyla elde edilen sonucun küresel güç noktasına daha yakın olduğu tespit edilmektedir. AI yöntemi ve GKO algoritmasının verimleri sırasıyla 93,72% ve 98,24% olarak hesaplanmıştır. Şekil 11’de GKO algoritmasının çıkış gücü grafiği verilmiştir.

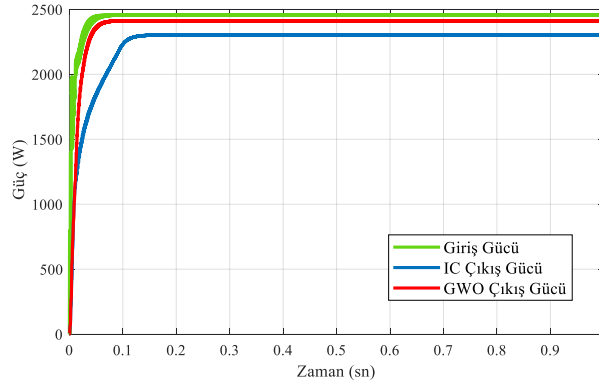
**Şekil 11.** GKO algoritmasının çıkış gücü
Figure 11. The output power of GWO algorithm

Şekil 11’den görüleceği gibi GKO algoritması giriş gücünü takip etmekte olup 2413 W çıkış gücüne ulaşmıştır. Bu sayede sistem verimi 98,24%, yakınsama zamanı 0,06 saniye ve yerleşme zamanı ise 0,08 saniye olarak hesaplanmıştır. Şekil 12’de AI yönteminin çıkış gücü grafiği verilmiştir.

**Şekil 12.** AI yönteminin çıkış gücü
Figure 12. The output power of INC method

Şekilden görüleceği üzere AI yöntemi yerel güç noktası ile küresel güç noktaları arasında takılmış olup çıkış gücü 2302 W'tır. Bunun neticesinde sistem verimi 93,72%, yakınsama zamanı 0,16 saniye ve yerleşme zamanı ise 0,18 saniye olarak bulunmuştur.

Şekil 13'te AI yöntemi ile GKO algoritmasının güç karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 13. AI yöntemi ile GKO algoritmasının çıkış güç karşılaştırılması

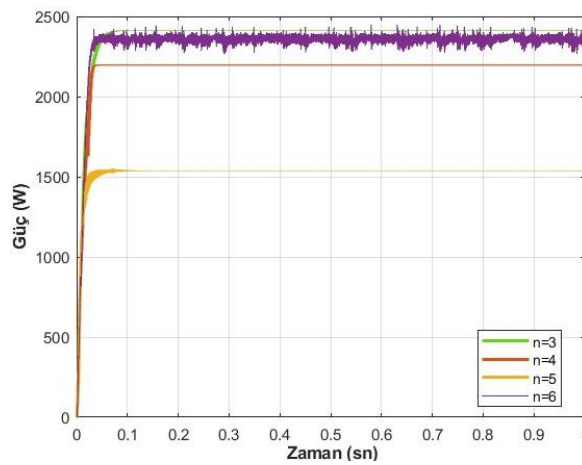
Figure 13. Comparison of the output power of the GWO algorithm with the INC method

Şekil 13'te GKO algoritmasının küresel güç noktasına AI yönteminden daha hızlı yakınsadığı ve daha iyi bir yerleşme zamanına sahip olduğu görülmektedir. Tablo 6' da GKO ile AI yönteminin yerleşme zamanı, yakınsama zamanı, güç değerleri ve verimleri verilmiştir.

Tablo 6. AI yöntemi ile GKO algoritmasının performans kıyaslaması
Table 6. Performance comparison of INC method and GKO algorithm

Algoritma	Güç (W)	Yakınsama zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	Verim (%)
Gri kurt	2413	0,06	0,08	98,24
A. iletkenlik	2302	0,16	0,18	93,72

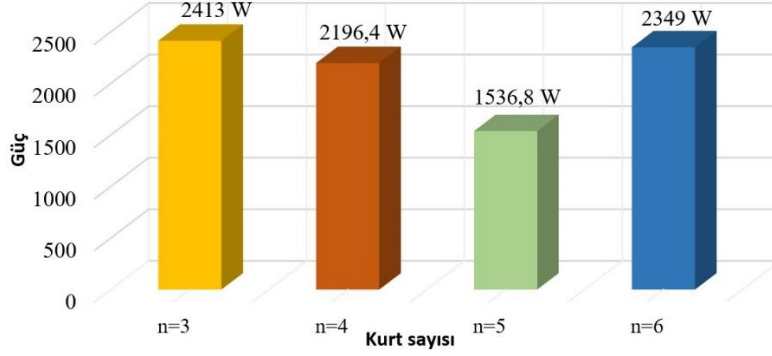
GKO algoritmasının değişken parametresi olan kurt sayısının sistem performansına olan etkisi Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. GKO algoritmasında kurt sayılarının vermiş olduğu çıkış gücü yanıtları

Figure 14. Output power responses given by wolf numbers in GWO algorithm

Kurt sayılarını artırmanın sistemde salınımları arttırdığı ve düşük verimli sonuçlar ortaya çıkardığı görülmektedir. 3 kurt sayısında sistem küresel güç noktasına kolaylıkla erişebilirken kurt sayılarındaki artış sistem yanıtını olması gereken değerden oldukça uzaklaştırarak yerel güç noktalarına takılmasına yol açmaktadır. Kurt sayısı 4 iken sistem 0,042 saniyede, kurt sayısı 5 iken 0,1 saniyede sistem yanıtının yerleştiği ve kararlı bir çıkış sağlandığı görülmektedir. Kurt sayısı 6' ya çıkarıldığında sistemde çıkış gücünün sürekli olarak 2266 W ile 2432 W değerleri arasında salındığı gözlemlenmektedir. Şekil 15'te GKO algoritmasının kurt sayılarına göre elde edilen çıkış gücünün ortalama değeri verilmiştir.



Şekil 15. GKO algoritmasındaki kurt sayılarına göre ortalama çıkış gücü

Figure 15. Average output power according to the number of wolves in GWO algorithm

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada kısmi gölgeleme koşullarında güneş panellerinin maksimum güç noktası takibini iyileştirmek adına Matlab/Simulink ortamında GKO algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma ile AI yöntemi güç değeri, verimlilik ve yerleşme zamanı gibi parametreler bakımından karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada sabit sıcaklık ve Tablo 3'te verilen ışınım değerlerine göre sistem yanıtları alınmıştır. Ayrıca GKO algoritmasının değişken parametresi olan kurt sayılarının sistem performansına etkisi incelenmiştir. GKO algoritmasının verimi (kurt sayısı 3 alındığında) yaklaşık olarak 98,24% iken AI yönteminin 93,72% olduğu görülmüştür. Sistemde belirlenen ışınım ve sabit sıcaklık değerlerine göre GKO algoritması ile elde edilen sonuçların AI yöntemine göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

GKO algoritmasının kurt sayıları 3, 4, 5 ve 6 olarak belirlendiğinde sistemin çıkış gücü (ortalama) sırasıyla 2413 W, 2196,4 W 1536,8 W ve 2349 W değerinde elde edilmiştir. Küresel güç noktasına sadece 3 kurt kullanan GKO algoritması yaklaşmışken diğer GKO algoritmaları sistemin yerel güç noktalarına takıldığı gözlemlenmiştir. Kurt sayısı 6 iken sistemin çıkış gücünün 2266 W ile 2432 W arasında yüksek salınımlı bir yanıt oluşturduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak kurt sayısını arttırmanın verimi düşürdüğü ve salınımları artırabileceği tespit edilmiştir.

Yazar katkısı

Author contribution

Ömer Öztürk: Makale formatının belirlenmesi, literatür taraması, simülasyon çalışmalarının yürütülmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi.

Ömür Akyazı: Makale formatının belirlenmesi, simülasyon çalışmalarına yön verilmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazımı,

Bora Çavdar: Makale formatının belirlenmesi, simülasyon çalışmalarına yön verilmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi,

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Ahmed, J., & Salam, Z. (2015). An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*, 150, 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.006>
- Almonacid, F. J. M. F., Rus, C., Hontoria, L., & Munoz, F. J. (2010). Characterisation of PV CIS module by artificial neural networks. A comparative study with other methods. *Renewable Energy*, 35(5), 973-980. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.018>
- Altıntaş, N., Yılmaz, A., DEMIRCI, A., & Tercan, S. M. (2021). Bataryalı PV sistemlerde maksimum güç noktası takip yöntemlerinin karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 369-377. <https://doi.org/10.31590/ejosat.702393>
- Azli, H., Titri, S., Larbes, C., Kaced, K., & Femmam, K. (2022). Novel yellow saddle goatfish algorithm for improving performance and efficiency of PV system under partial shading conditions. *Solar Energy*, 247, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.029>
- Baba, A. O., Liu, G., & Chen, X. (2020). Classification and evaluation review of maximum power point tracking methods. *Sustainable Futures*, 2, 100020. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100020>
- Basha, C. H., Bansal, V., Rani, C., Brisilla, R. M., & Odofin, S. (2020). Development of cuckoo search MPPT algorithm for partially shaded solar PV SEPIC converter. *In Soft Computing for Problem Solving*, 1, 727-736. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0035-0_59
- Charin, C., Ishak, D., Zainuri, M. A. A. M., Ismail, B., & Jamil, M. K. M. (2021). A hybrid of bio-inspired algorithm based on Levy flight and particle swarm optimizations for photovoltaic system under partial shading conditions. *Solar Energy*, 217, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.049>
- Chtita, S., Motahhir, S., El Hammoumi, A., Chouder, A., Benyoucef, A. S., El Ghzizal, A., ... & Askar, S. S. (2022). A novel hybrid GWO-PSO-based maximum power point tracking for photovoltaic systems operating under partial shading conditions. *Scientific Reports*, 12(1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14733-6>
- Daraban, S., Petreus, D., & Morel, C. (2014). A novel MPPT (maximum power point tracking) algorithm based on a modified genetic algorithm specialized on tracking the global maximum power point in photovoltaic systems affected by partial shading. *Energy*, 74, 374-388. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.001>
- Demirtaş, M., İbrahim, S. E. F. A., Irmak, E., & Çolak, İ. (2008). Güneş enerjili sistemler için mikrodenetleyici tabanlı DA/DA yükselten dönüştürücü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3).
- Eetivand, K., Zangeneh, A., & Nabavi, S. M. (2022). Hyper-Spherical search algorithm for maximum power point tracking of solar photovoltaic systems under partial shading conditions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1101692>
- Elshara, R. O. H. (2021). *Parçacık sürü optimizasyonu yöntemine dayalı maksimum güç noktası izleme algoritmasının incelenmesi* [Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Fan, L., & Ma, X. (2022). Maximum power point tracking of PEMFC based on hybrid artificial bee colony algorithm with fuzzy control. *Scientific Reports*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08327-5>

- Gümüş, Z., & Demirtaş, M. (2021). Fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası takibinde kullanılan algoritmaların kısmi gölgeleme koşulları altında karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 1-1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.725255>
- Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., & Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(1), 59-64. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19951577>
- Javed, M. Y., Hasan, A., Rizvi, S. T. H., Hafeez, A., Sarwar, S., & Telmoudi, A. J. (2022). Water cycle algorithm (WCA): A new technique to harvest maximum power from PV. *Cybernetics and Systems*, 53(1), 80-102. <https://doi.org/10.1080/01969722.2021.2008683>
- Kandemir, E. (2020). *Kısmi gölgeleme koşullarında maksimum güç noktasında çalışan enerji geri kazanımlı tek dönüştürücülü şebeke bağlantılı PV sistem tasarımı ve uygulaması* [Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]
- Karagöz, M. K. (2021). *Design and implementation of the BAT algorithm based maximum power point tracker that able to manage partial shadow conditions for PV systems* [Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Eğitim Enstitüsü]
- Kaysal, A., Köroğlu, S., Yüksel, O. Ğ. U. Z., & Kaysal, K. (2023). Kendinden ayarlı bulanık PI denetleyici tabanlı DA-DA dönüştürücü tasarımı ve deneysel uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 483-496. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.739775>
- Keskin, T. (2019). *MPPT algoritmalarının gerçek zamanlı olarak karşılaştırılması ve PV sisteme uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kulaksız, A., Gökkuş, G., & Alhajomar, F. (2019). Rapid control prototyping based on 32-Bit ARM Cortex-M3 microcontroller for photovoltaic MPPT algorithms. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(4), 1939-1947.
- Mansoor, M., Mirza, A. F., & Ling, Q. (2020a). Harris hawk optimization-based MPPT control for PV systems under partial shading conditions. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122857>
- Mansoor, M., Mirza, A. F., Ling, Q., & Javed, M. Y. (2020b). Novel Grass Hopper optimization based MPPT of PV systems for complex partial shading conditions. *Solar Energy*, 198, 499-518. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.070>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Mirza, A. F., Mansoor, M., Ling, Q., Yin, B., & Javed, M. Y. (2020). A Salp-Swarm Optimization based MPPT technique for harvesting maximum energy from PV systems under partial shading conditions. *Energy Conversion and Management*, 209, 112625. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112625>
- Mohanty, S., Subudhi, B., & Ray, P. K. (2015). A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(1), 181-188. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2482120>
- Murdock, H. E., Gibb, D., André, T., Sawin, J. L., Brown, A., Ranalder, L., ... & Brumer, L. (2021). *Renewables 2021-Global status report*. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:52059346y
- Nusaiif, A. I., & Mahmood, A. L. (2020). MPPT algorithms (PSO, FA, and MFA) for PV system under partial shading condition, Case study: BTS in Algalazia, Baghdad. *International Journal of Smart Grid-ijSmartGrid*, 4(3), 100-110.
- Özdemir, A., & Pamuk, N. (2021). Kısmi gölgeleme şartları altındaki kompleks yapıları fotovoltaik enerji sistemlerinde maksimum güç noktası takibinin metasezgisel algoritmalar kullanılarak incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 157-164. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1006248>
- Salman, S., Ai, X., & Wu, Z. (2018). Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 3(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0099-8>

- Sarwar, S., Hafeez, M. A., Javed, M. Y., Asghar, A. B., & Ejsmont, K. (2022). A horse herd optimization algorithm (HOA)-Based MPPT technique under partial and complex partial shading conditions. *Energies*, 15(5), 1880. <https://doi.org/10.3390/en15051880>
- Seyedmahmoudian, M., Soon, T. K., Horan, B., Ghandhari, A., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2019). New ARMO-based MPPT technique to minimize tracking time and fluctuation at output of PV systems under rapidly changing shading conditions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2895066>
- Singh, N., Gupta, K. K., Jain, S. K., Dewangan, N. K., & Bhatnagar, P. (2020). A flying squirrel search optimization for MPPT under partial shaded photovoltaic system. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(4), 4963-4978. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3024719>
- Sholikhah, E. N., Windarko, N. A., & Sumantri, B. (2022). Tunicate swarm algorithm based maximum power point tracking for photovoltaic system under non-uniform irradiation. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 12(5). <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i5.pp4559-4570>
- Sreekumar, C., & Agarwal, V. (2008). A hybrid control algorithm for voltage regulation in DC–DC boost converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2530-2538. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918640>
- Suryavanshi, R., Joshi, D. R., & Jangamshetti, S. H. (2012). PSO and P&O based MPPT technique for SPV panel under varying atmospheric conditions. In *2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/EPSCICON.2012.6175270>
- Vankadara, S. K., Chatterjee, S., & Balachandran, P. K. (2022a). An accurate analytical modeling of solar photovoltaic system considering R_s and R_{sh} under partial shaded condition. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13198-022-01658-6>
- Vankadara, S. K., Chatterjee, S., Balachandran, P. K., & Mihet-Popa, L. (2022b). Marine predator algorithm (MPA)-based MPPT technique for solar PV systems under partial shading conditions. *Energies*, 15(17), 6172. <https://doi.org/10.3390/en15176172>
- Vijayakumar, G., & Hemakumar, K. (2013). Development of low cost high efficient DC-DC converter for photovoltaic system with fast converging MPPT algorithm. In *2013 International conference on Renewable energy and Sustainable energy (ICRESE)* (pp. 98-104). <https://doi.org/10.1109/ICRESE.2013.6927795>
- Yadav, K., Kumar, B., Guerrero, J. M., & Lashab, A. (2022). A hybrid aenetic algorithm and grey wolf optimizer technique for faster global peak detection in PV system under partial shading. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 100770. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100770>
- Zafar, M. H., Al-shahrani, T., Khan, N. M., Feroz Mirza, A., Mansoor, M., Qadir, M. U., ... & Naqvi, R. A. (2020). Group teaching optimization algorithm based MPPT control of PV systems under partial shading and complex partial shading. *Electronics*, 9(11), 1962. <https://doi.org/10.3390/electronics9111962>
- Zafar, M. H., Khan, U. A., & Khan, N. M. (2021). Hybrid grey wolf optimizer sine cosine algorithm based maximum power point tracking control of PV systems under uniform irradiance and partial shading condition. In *2021 4th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1109/ICECE51984.2021.9406309>
- Zhai, P., & Williams, E. D. (2012). Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. *Renewable Energy*, 41, 350-357. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.041>

Makine öğrenmesi algoritmaları ile deprem katalogları kullanılarak deprem tahmini

Earthquake prediction using earthquake catalogs with machine learning algorithm

Ertuğrul DEMİRELLİ*^{1,a} , Halil İbrahim SOLAK^{2,3,b} , İbrahim TİRYAKİOĞLU^{1,3,c} 

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 03204, Afyonkarahisar

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uzaktan Eğitim MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 03200, Afyonkarahisar

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, 03200, Afyonkarahisar

• Geliş tarihi / Received: 21.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

Öz

Ülkemiz taşıdığı coğrafi şartlar gereği doğal afetler, özellikle de deprem gerçeği ile düzenli olarak yüzleşmektedir. Can ve mal kayıplarının büyük bölümünün depremlerde meydana geldiği ve ortalama beş yıllık periyotlarla bu coğrafyanın yıkıcı bir depremle sarsıldığı düşünülürse, deprem afeti alınacak önlemler bakımından ilk sırada gelmektedir. Depremler için alınabilecek önlemlerin belirlenmesi için depremlerin önceden tahmin edilebilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda son yıllarda makine öğrenmesi ile deprem tahmini çalışmaları hız kazanmıştır. Bu çalışmada deprem kataloğu ile jeolojik veriler ve jeodezik verilerin birleştirildiği bir veri seti kullanılarak deprem tahminleri yapılmıştır. Bu veri seti çalışmada kullanılan algoritma modellerini eğitmek ve eğitilen modellerin performansını ölçmek adına test ve eğitim verisi olarak bölünmüştür. Rastgele orman, ekstrem gradyan artırma, karar ağacı ve k en yakın komşu regresyon algoritmaları kullanılarak eğitim seti ile modeller eğitilmiş, eğitilen modeller test verisi ile test edilmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre rastgele orman ve ekstrem gradyan artırma regresyon algoritmaları en başarılı sonuçların alındığı algoritmalar olmuştur. Ortalama kare hatası (MSE) değerleri incelendiğinde, en iyi sonuçlar deprem bilgileri, gerinimler ve fay bilgilerinden oluşan veri setinde gözlenmiştir. MSE için rastgele orman ve ekstrem gradyan artırma algoritmaları ile 0.09, karar ağacı algoritması ile 0.16, k en yakın komşu algoritması ile 0.11 değerleri elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma makine öğrenmesi ile deprem tahmini çalışmalarında, kullandığı veri seti ile farklı bir bakış açısı getirerek literatüre katkıda bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Deprem, Deprem kataloğu, Makine öğrenmesi, Regresyon

Abstract

Due to its geographical conditions, our country regularly faces the reality of natural disasters, especially earthquakes. Considering that most of the loss of life and property is caused by earthquakes and this region is shaken by a devastating earthquake in an average of five years, earthquake disaster comes first in terms of precautions to be taken. It is of great importance to be able to predict earthquakes in order to determine the precautions that can be taken for earthquakes. In this context, earthquake prediction studies with machine learning have gained momentum in recent years. In this study, earthquake predictions were made using an earthquake catalog and a data set combining geological and geodetic data. This data set is divided into test and training data in order to train the algorithm models used in the study and to measure the performance of the trained models. By using random forest, extreme gradient boosting, decision tree and k nearest neighbor regression algorithms, the models were trained with the training set and the trained models were tested with the test data. Analysis results were compared and evaluated. According to the analysis results, random forest and extreme gradient increment regression algorithms were the algorithms with the most successful results. When the mean square error (MSE) values are examined, the best results are observed in the data set consisting of earthquake information, strains and fault information. This study contributed to the literature by bringing a different perspective to the data set used in earthquake prediction studies with machine learning.

Keywords: Earthquake, Earthquake catalog, Machine learning, Regression

*a Ertuğrul Demirelli; ertugruldemirelli@gmail.com

1. Giriş

1.1. Introduction

İnsanoğlu varolageldiği günden buyana geçen süreçte doğal afetlerle mücadele etmiştir. Afetler insanlığa ve medeniyetlere büyük zararlar vermiştir. İnsanlığa kültürel, sosyal ve ekonomik anlamda büyük zarar veren yüzü aşkın afet çeşidi vardır (Genç, 2007). Toplumların birikimlerini dakikalar hatta saniyeler içinde yok edebilen deprem bu afetlerden en tehlikelisi olarak kabul edilebilir (Gündoğdu vd., 2012). Ülkemiz afet yönetimi ve afetlere yönelik istatistiklerin verildiği (AFAD, 2018) tarafından yapılan çalışmada, ülkemizde afet kaynaklı ölümlerin %60'ı depremler nedeniyle olmuştur. Ortalama olarak yılda 1000 vatandaşımız hayatını kaybetmekte, 2100 vatandaşımız yaralanmakta ve 7000 bina hasar görmektedir. Deprem, yer kabuğunda bulunan ve fay olarak isimlendirilen kırıklarda biriken enerjinin ani boşalması ile açığa çıkan yer değiştirmenin neden olduğu karmaşık elastik dalga hareketleri olarak tanımlanmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalar doğrultusunda depremin oluş nedenlerinin yanı sıra deprem kavramının nicel özellikleri de ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde meydana gelmiş bir depremin büyüklüğü, enlem-boylam olarak merkezi, derinliği bilinebilmektedir (Gündoğdu, 1986; Işık vd., 2012).

Dünya üzerindeki nüfusun artması ve endüstriyelleşmeden dolayı toplumlar daha geniş yerleşim alanlarına dağılmış ve bu yerleşim alanları artan bir ivme ile büyümüştür. Toplumların tektonik açıdan aktif veya bu bölgelere komşu bölgelere yerleşmesi, bu bölgelerde yaşayan insanların depremden etkilenme risk durumlarının artmasına neden olmuştur. 1994 yılında Kaliforniya'da meydana gelen Northridge depremi ($M_w = 6.7$), 1995 yılında Japonya'da meydana gelmiş olan Kobe depremi ($M_w = 7.5$) ve Tayland'da meydana gelen Chi-Chi depremi ($M_w = 7.6$) ciddi sayıda can kayıplarına, ekonomide milyarlarca dolarlık kayıplara neden olmuş depremlerdir (Utkucu & Alptekin, 2001; Utkucu vd., 2011). Ülkemiz de coğrafi olarak yükseltili, eğimli ve fay hatlarının bulunduğu bir bölgede yer almasından dolayı doğal afetler sıklıkla yaşanmaktadır (Genç, 2007). 2020 yılında meydana gelmiş olan Elazığ depremi ($M_w = 6.8$), Sisam Adası açıklarında meydana gelen Sisam depremi ($M_w = 6.9$) ve 2023 yılında Kahramanmaraş'ta meydana gelen depremler ($M_w = 7.7$, $M_w = 7.6$) son yıllarda, ülkemizde can ve mal kaybına neden olmuş depremlerdir. Ülkemizde yaşanan depremler ve sonuçları göz önüne alındığında, afet yönetimi üzerine çeşitli çalışmaların yürütülmesi gerekliliği kaçınılmaz bir gerçektir. Afet yönetimi çalışmalarında gelişen bilgisayar teknolojilerinden, son yılların yükselen değerleri olan makine öğrenmesi ve yapay zeka gibi yöntemlerden faydalanmak, analizlerin daha doğru ve hızlı şekilde elde edilmesini sağlayacaktır.

Son dönemde teknoloji alanında meydana gelen hızlı gelişmeler ile birlikte yapay zekâ ve makine öğrenmesi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde makine öğrenmesinin farklı disiplinlerde kullanıldığı görülmektedir. Sağlıkta hastalık teşhisi ve tedavi yöntemleri, finans, bankacılık, siber saldırıların tespiti ve inşaatla depreme dayanıklı mimari tasarım gibi alanlarda kullanıldığı görülmektedir (Başer vd., 2021; Kaya & Yıldız, 2014; Bingöl vd., 2020).

Diyabet hastalığı tahmini için (Özkan vd., 2022) yaptıkları çalışmada k-en yakın komşu, rastgele orman ve karar ağacı algoritmaları yanında farklı algoritmalar kullanılmıştır. Çalışmada diyabet tanısı için birden fazla yaklaşım uygulanmıştır. En iyi sonuçların rastgele orman bayesnet algoritmaları ile elde edildiği görülmüştür. BİST bankacılık endeksinde yer alan bazı bankaların fiyat tahmini için (Duygu & Kılıç, 2019) çoklu regresyon, rastgele orman ve karar ağacı algoritmaları kullanılmıştır. Model eğitimi için teknik ve temel göstergelerden oluşan 2 farklı veri seti kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre tüm algoritmalar 0.95 R2 skoru üzerinde bir başarı göstermiştir. Bu çalışmaların yanı sıra makine öğrenmesi algoritmaları yer bilimlerinde de kullanılmaktadır. Hava kirliliği tahmini ile ilgili (Ünalı & Yalçın, 2019) tarafından yapılan çalışmada rastgele orman, k-en yakın komşu, karar ağacı ve çoklu doğrusal regresyon gibi algoritmalar kullanılmıştır. Havadaki CO, SO₂, O₃ vb. kirlitici konsantrasyonları bu algoritmalar ile tahmin edilmiştir. Tahmin sonuçlarında en başarılı algoritmaların rastgele orman ve çoklu doğrusal regresyon algoritmalarının olduğu görülmüştür. Literatürde deprem tahmini üzerine de farklı çalışmalar mevcuttur.

Gelecek bir tarihte meydana gelebilecek depremlerin tahmin edilmesi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde farklı yöntemler ve veri setleri ile yapılan çalışmaların olduğu görülmüştür. Yunanistan bölgesi için (Moustra, 2011) tarafından, deprem öncesinde ortaya çıktığı düşünülen sismik elektrik sinyalleri kullanılarak deprem tahmini üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bir diğer çalışma ise (Rouet-Leduc vd., 2017) tarafından rastgele orman algoritması kullanılarak laboratuvar ortamında yapılmıştır. Çalışmadaki amaç laboratuvar ortamında

depremler oluşturarak fay bloklarının hareketi ile ortaya çıkan akustik sinyallerin elde edilmesi ve bu sinyaller ile deprem tahmini yapılmasıdır. Aynı şekilde (Lubbers vd., 2018) laboratuvar ortamında rastgele orman algoritmasını kullanarak verileri katalog haline getirmişler ve akustik sinyallerinin deprem büyüklüğüne etkisini gözlemlemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise (Gitis & Derendyaev, 2019) makine öğrenmesi algoritmaları ve deprem kataloglarını kullanarak depremin zamansal ve mekânsal tahmini üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Bu çalışmada makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak ileri bir tarihte meydana gelebilecek depremlere ait yaklaşık büyüklüklerin tahmini amaçlanmıştır. Burada elde edilecek tahmin değerleri ile ileriye dönük riskli bölgelerin tespit edilmesi planlanmaktadır. Makine öğrenmesi ile tahmin süreci ilk olarak veri ön işleme ardından tahmin modellerinin eğitimi ve son olarak da sonuçların doğruluklarının değerlendirilmesi olmak üzere üç adımdan oluşmaktadır. Süreç içinde kullanılan veriler tarihsel deprem katalogları, Türkiye’de yer alan diri fay bilgileri gibi jeolojik veriler ve jeodezik ölçmelerle elde edilmiş gerinimlerden oluşmaktadır. Katalog verileri deprem oluş tarihi, enlem, boylam, derinlik (KM), büyüklük (xM), jeolojik veriler fay uzunluğu ve depremin faya olan uzaklığı, jeodezik veriler ise gerinimlerden oluşmakta olup Tablo 1’de gösterilmiştir. Bu veriler kullanılarak ileri bir tarihte oluşabilecek deprem büyüklüğü tahmin edilmeye ve bunun için en iyi algoritma seçilmeye çalışılmıştır.

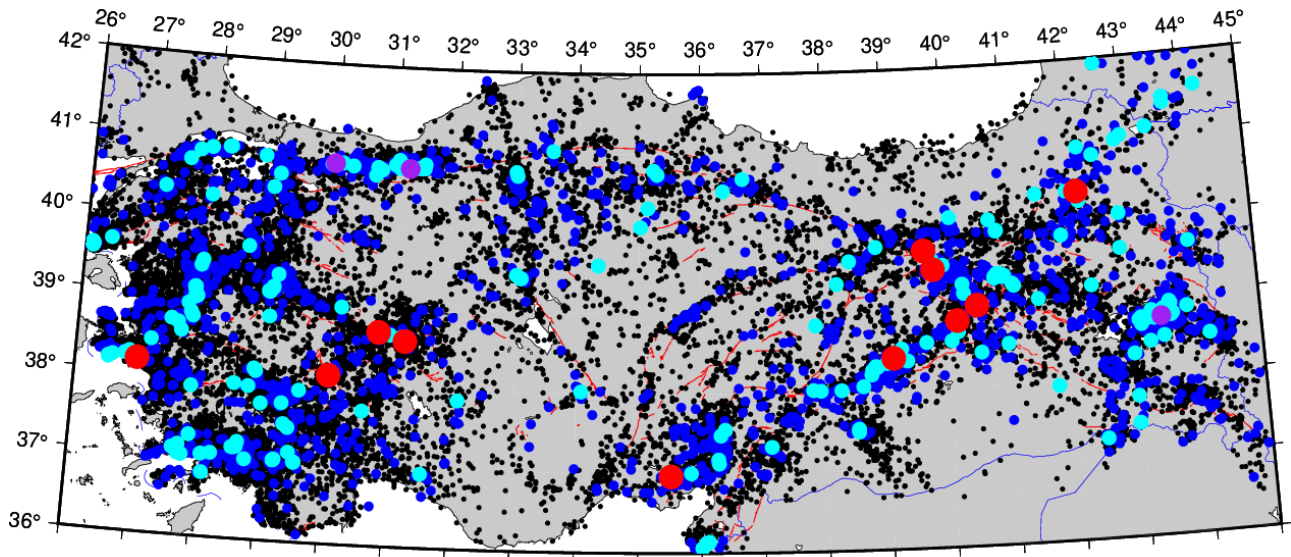
2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Veri setinin oluşturulması

2.1. Creating the dataset

Çalışma kapsamında veri seti oluşturabilmek için öncelikle Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü’nün (KRDAE) deprem kataloğunda yer alan depremler filtrelenmiştir. KRDAE kataloğunda 1900 – 2021 yılları arasında ülkemizde meydana gelen depremlere ait ~350000 kayıt yer almaktadır (Şekil 1). Katalog depremleri Şekil 1’de harita üzerinde gösterilmiştir. Bu depremlerden yaklaşık 10500’ü Batı Anadolu’da $37.90^{\circ} - 40.10^{\circ}$ enlemleri ve $26.16^{\circ} - 30.46^{\circ}$ boylamları arasındadır. Bu bölge hem yoğun deprem aktivitesi hem de karmaşık tektonik yapısı nedeniyle çalışma bölgesi olarak seçilmiş ve bu depremler veri setine dahil edilmiştir. Veri setinde bulunan depremler ülkemizde meydana gelmiş ve komşu ülkelerde meydana gelerek ülkemizde de hissedilen depremlerden oluşmaktadır. Deprem kataloğunda bulunan her bir veri için deprem oluş tarihi, depremin enlem ve boylam değerleri, derinliği ve deprem büyüklüğü öznitelik bilgileri bulunmaktadır.



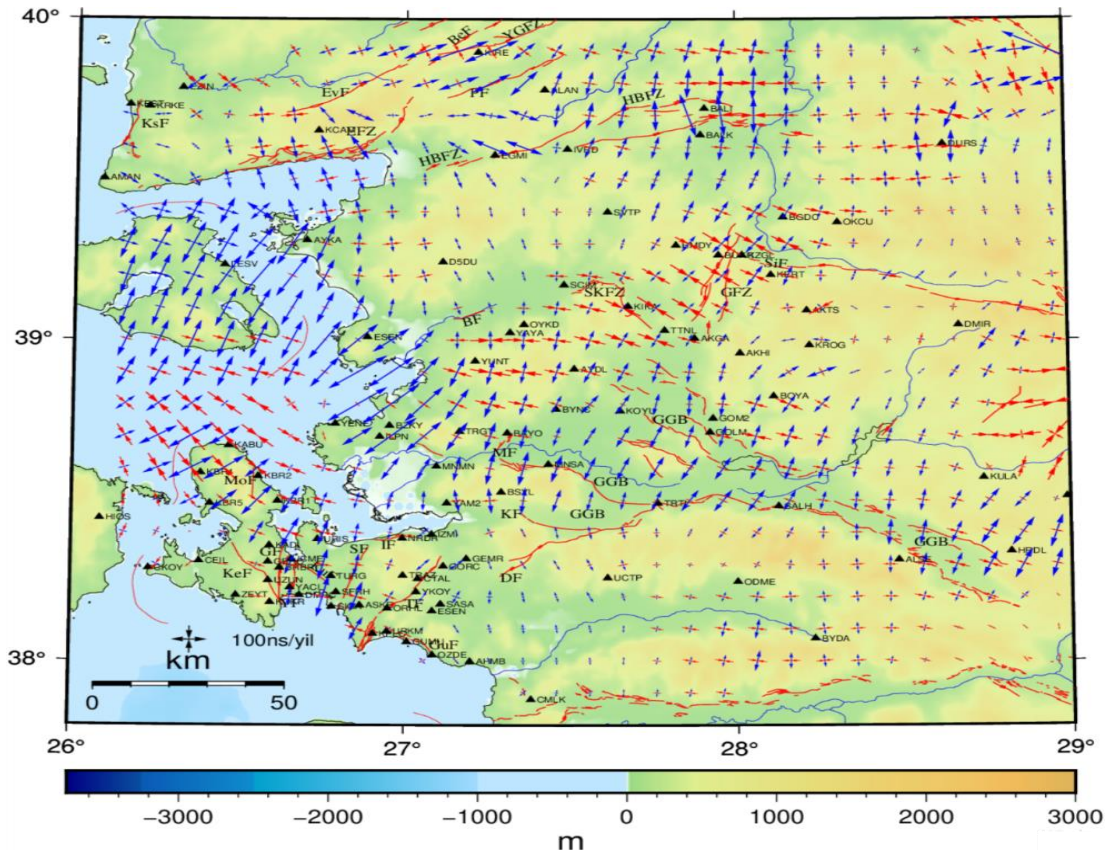
Şekil 1. Türkiye’de aletsel dönemde meydana gelen $M \geq 3$ depremler (KRDAE) (kırmızı çizgi: aktif fay, siyah daire: M:3., mavi daire: M:4., turkuaz daire: M:5., mor daire: M:6., kırmızı daire: M:7)

Figure 1. $M \geq 3$ earthquakes in the instrumental period in the working area (red line: active fault, black circle: M:3., blue circle: M:4., turquoise circle: M:5., purple circle: M:6., red circle: M:7)

Depremlerin oluşumunda en önemli parametre olarak öne çıkan faylara ait veriler ise MTA'nın (Maden Tetkik ve Arama) diri fay haritaları ve ek olarak (Emre vd., 2018)'den elde edilmiştir. Fay uzunluğunun deprem büyüklüğünü önemli ölçüde etkilemesi nedeniyle her bir faya ait uzunluklar, o fay kırıkları arasındaki mesafeler toplanarak km cinsinden elde edilmiştir. Ayrıca her fay için bir id atanmıştır. Bunlara ek olarak fayların tipleri de (RL: Sağ yanal, N: Normal Fay, LL: Sol yanal, R: Ters vb.) (Emre vd., 2018)'den alınmıştır. Fay bilgilerinin model eğitiminde önemli veriler olduğu düşünüldüğünden, hesaplanan fay uzunlukları, deprem-fay arasındaki mesafeler ve fay tipleri veri setine eklenmiştir.

Makine öğrenmesi uygulamalarında modelin başarısını arttırmak için sistemi etkileyen girdi verilerinin iyi tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla günümüzde GNSS verilerinden elde edilen jeodezik gerinimler deprem tehlike analizi çalışmalarında etkin olarak kullanılmaktadır. Gerinim bir cisim üzerinde o ana kadar meydana gelen güncel deformasyon hakkında bilgi vermektedir. Tektonik olarak değerlendirildiğinde bu durum levhalar veya daha küçük bloklar üzerinde meydana gelen stres birikimine karşılık gelir. Gerinimler fayın depremselliği ve kinematığı ile ilgili bilgi veren en önemli parametrelerdir. Bir bölgede gerinim hızlarının büyüklüğü oradaki sismik tehlikeyi ifade etmektedir. (Solak, 2015; Aktuğ, 2017; Araszkiwicz, 2016).

Makine Öğrenmesi için gerçekleştirilecek uygulamaya çalışma bölgesindeki faylara ait bilgiler ile bölgeye ait gerinimlerin de dahil edilmesinin modelin başarısını arttıracak değerlendirilmiştir. Bu amaçla hem modelin başarısını arttırmak hem de gerinimlerin etkisini görmek için ikinci bir veri seti oluşturulmuştur. Bu nedenle (Solak, 2020) tarafından yapılmış olan çalışmada İzmir-Balıkesir bölgesi için verilmiş hız alanları kullanılarak, Geodisuit programı ile bölgenin 0.1° grid aralığında jeodezik gerinimleri hesaplanmıştır (Shen vd. 2015). Elde edilen gerinimler Şekil 2'de gösterilmiştir. Yoğun ağ tasarımı (111 nokta), yüksek hız doğruluğu (max. 1.5 mm/yıl) ve buna bağlı olarak Türkiye geneline kıyasla doğruluğu yüksek gerinim değerleri elde edileceğinden dolayı bu bölge ikinci veri seti için çalışma alanı olarak seçilmiştir.



Şekil 2. Çalışma bölgesi gerinim alanı (kırmızı oklar: sıkışma, mavi oklar: açılma, kırmızı çizgiler: diri fay, mavi kıvrımlı çizgiler: ana nehirler, siyah üçgenler: GNSS noktaları).

Figure 2. Strain rates in the study area (red arrows: compression, blue arrows: extension, red lines: active fault, curved blue lines: main rivers, black triangles: GNSS sites).

Tablo 1. Değişkenler ve veri setinin özellikleri
Table 1. Variables and properties of the dataset

Değişken ismi	Değişken tipi	Değer	Detay
Oluş tarihi	Girdi	Etiket	
Enlem	Girdi	Ondalık	Depremin merkez üssü
Boylam	Girdi	Ondalık	
Der (km)	Girdi	Ondalık	Depremin derinliği
xM	Çıktı	Ondalık	Depremin büyüklüğü
Fay Tipi	Girdi	Etiket	Depreme neden olan fayın türü
Faya uzaklık (km)	Girdi	Ondalık	Depreme neden olan faya uzaklık
Fay uzunluğu (km)	Girdi	Ondalık	Depreme neden olan fayın uzunluğu
Gerinim (ns/yıl)	Girdi	Ondalık	Depremin merkez üssündeki gerinim

2.2. Veri ön işleme

2.2. Data preprocessing

Veri setleri genellikle sonuçları etkileyebilecek hatalı veriler içermektedir ve bu hatalı veriler gürültü olarak tanımlanmaktadır. Veri içerisinde gürültü ne kadar çoksa sonuçların güvenilirliği de o kadar tartışmalı olacaktır (Oğuzlar, 2003). Bu çalışmada 1900 – 1970 yılları arasında meydana gelmiş küçük ölçekli depremlerin teknik yetersizliklerden dolayı katalogta yer almadığı görülmüştür. Veri içerisinde yer alan bu boşluğun sonuçlara olumsuz etkilerini önlemek için 70 yıllık bu bölüm veri setinden çıkartılmış ve çalışmada 1970 yılı sonrası depremler kullanılmıştır. Meydana gelmiş depremler Türkiye sınırları içerisinde, denizde ve ülkemizin komşularında meydana gelmiş depremleri içermesine rağmen kullanılan fay verileri ülke sınırı içindeki karasal fayları içermektedir. Bu nedenle deprem ve depreme neden olan fay eşleştirmelerinde deniz depremleri ve komşu ülkelerde meydana gelen depremlerin fay-deprem eşleştirmelerinden kaynaklanacak hataları elemine etmek için deniz ve ülke sınırı dışında meydana gelmiş depremler de veri seti içinden çıkartılmıştır. Depremlerden sonra meydana gelen artçı depremlerin yarattığı gürültüyü önlemek için artçı depremler veri setinden ayıklanmıştır. Artçı depremlerin ayıklanmasında; M:4. olan depremler için depremin oluş tarihinden itibaren 1 hafta sonrasında ve 5 km yakınında meydana gelmiş depremler, M:5. olan depremler için depremin oluş tarihinden itibaren 2 ay sonrasında ve 15 km yakınında meydana gelmiş depremler, M:6. olan depremler için depremin oluş tarihinden itibaren 3 ay sonrasında ve 20 km yakınında meydana gelmiş depremler ve M:7. olan depremler için depremin oluş tarihinden itibaren 6 ay sonrasında ve 20 km yakınında meydana gelmiş depremler artçı depremler olarak kabul edilmiştir.

37.90 – 40.10 enlemleri ve 26.16 – 30.46 boylamları arasında elde edilmiş olan gerinimler bu enlem ve boylam aralıklarında meydana gelmiş ~10500 depreme eklenmiştir. Veri setinin bir bölümü Tablo 2`de, veri setine ilişkin istatistikî bilgiler ise Tablo 3`de gösterilmiştir. Gerinimler eklenirken ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemi kullanılmış ve her depremin içinde bulunduğu gridin köşe noktaları kullanılarak deprem merkez üssü koordinatlarındaki gerinimler hesaplanmıştır. Gerinimlerin, fay bilgilerinin eklenmesi ve artçı depremlerin çıkarılması ile veri seti son halini almıştır.

Tablo 2. Deprem verileri ve öznitelikleri. (NN: Normal, RL: Sağ atımlı. Depremlerin oluş tarihleri jülyen gününe çevrilerek etiketlenmiştir.)

Table 2. Earthquake data and attributes (NN: Normal, RL: Right Lateral. earthquake occurrence dates have been added by converting the julian day)

Olus tarihi (Julian Günü)	Tarih (gg.aa.yy)	Enlem ^o	Boylam ^o	Der(km)	xM	Fay tipi	Faya uzaklık(km)	Fay uzunluk(km)	Gerinim (ns/yıl)
2442450.5	07.02.1975	38.75	28.35	5	4.1	RL	441	56	68.54
2442455.5	12.02.1975	39.14	29	15	4.2	RL	368.8	56	64.29
2442562.5	19.02.1975	39.12	27.68	10	4	NN	514.9	56	107.75
2442562.5	19.02.1975	38.75	27.6	9	4.2	RL	524.1	56	82.49
2459566.5	18.12.2021	39.0075	27.8813	8.9	3.3	RL	492.5	56	74.83
2459570.5	22.12.2021	39.8318	29.1303	4.8	3.2	RL	10.52	29	247.17
2459578.5	30.12.2021	39.2802	28.2493	7.3	3.3	RL	452.6	56	64.49

Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminde dayanak noktaları ile gerinim değeri belirlenecek noktanın aralarındaki mesafenin tersi ağırlıklandırılarak ilgili noktanın gerinim değeri Denklem 1`de verilen eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$g_e = \frac{\sum_{i=1}^n S_i * G_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1)$$

Eşitlikte hesaplanan g değeri depremin meydana geldiği noktadaki gerinim değerini, G değeri ise dayanak noktalarındaki gerinim değerini ifade etmektedir. Denklemde verilen S değeri ağırlık değerleri, n değeri ise dayanak noktalarının sayısı için kullanılmaktadır. Ağırlık değerlerinin hesaplanması için kullanılan formül Denklem 2`de gösterilmiştir.

$$S_i = 1/d_i, i = 1,2,3,4 \dots \quad (2)$$

Ağırlıkların hesaplanmasında kullanılan d değeri dayanak noktası ve gerinim değeri hesaplanan nokta arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Noktalar arasındaki mesafe hesaplanırken python/geopy kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Tablo 3. Veri setinin istatistiki bilgileri. (Verinin çeyreklik kısımlarının (25%, 50% ve 75%) maksimum değerleri gösterilmiştir.)

Table 3. Statistical information of the data set. (The maximum values of the quartiles (25%, 50% and 75%) of the data are given.)

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Oluş tarihi (Julyen günü)	10364	2451168.47	4446.79	2442427.5	2448197.75	2451344.5	2454884.5	2459578.5
Enlem (°)	10364	38.94	0.56	37.9	38.47	39.07	39.32	40.1
Boylam (°)	10364	28.21	1.04	26.16	27.5	27.99	29.06	30.45
Der(km)	10364	7.17	5.32	0.0	4.2	6.6	10.0	30.0
xM	10364	3.26	0.32	3.0	3.0	3.2	3.4	6.0
Faya uzaklık (km)	10364	345.57	214.01	0.33	211.4	377.7	512.5	675.4
Fay uzunluk (km)	10364	53.07	12.51	9.0	56.0	56.0	56.0	90.0
Gerinim (ns/yıl)	10364	76.4	46.44	12.2	49.48	71.48	91.15	389.33

2.3. Algoritma seçimi

2.3. Algorithm selection

Deprem gerçekleşme olayının lineer olarak tanımlanması mümkün olmamasından dolayı lineer çözüm sunan makine öğrenmesi algoritmaları tercih edilmemiştir. Bunun yerine daha komplike modelleme çalışmalarında yüksek doğrulukta sonuçlar sunan K-en yakın komşu (K-nearest neighbor, KNN), Karar ağacı (Decision Tree, DT), Rastgele orman (Random Forest, RF) ve Ekstrem gradyan artırma (Extreme Gradient Boosting, XGBoost) regresyon algoritmaları tercih edilmiştir.

K-en yakın komşu (K-nearest neighbor, KNN): K en yakın komşu algoritması regresyon ve sınıflandırma problemlerinde kullanılan en temel denetimli öğrenme algoritmalarından biridir. Algoritma örnek tabanlı öğrenme esasına göre tahminler yapmaktadır. Bu tip örnek tabanlı olan öğrenme algoritmalarında, eğitim setinde yer alan veriler kullanılarak öğrenme işlemi gerçekleştirilir. Algoritma tahmini istenen örneğin en yakın komşuları ile olan ilişkisine bağlı kalarak tahminde bulunmaktadır. En yakın komşular en küçük Öklid mesafesi baz alınarak bulunabildiği gibi Manhattan, Minkowski ve Chebyshev fonksiyonları kullanılarak da bulunabilir. (Taşçı & Onan, 2016; Altunkaynak vd., 2020).

Karar ağacı (Decision Tree, DT): Karar ağacı regresyon ve sınıflandırma uygulamalarında veriyi ağaç tipinde ele alan bir algoritmadır. İşlem sırasında kullanılan veri topluluğu her defasında yapraklar, dallar ve

karar düğümlerinden oluşan alt kümelere bölünür. Öznitelikler düğümler tarafından temsil edilmektedir. Yapraklar ve düğümler ile düğümler arasındaki temsil etmek için ise dallar kullanılmaktadır. Karar ağaçlarının oluşturulmasının temelinde verilere sorulan sorular ile bir karar kurallarının bulunmasıdır. Karar ağaçlarındaki en önemli aşama ağaç yapısındaki dallanmanın hangi kurala veya özneliğe göre şekilleneceğinin belirlenmesidir (Kavzoğlu vd., 2012).

Rastgele orman (Random Forest, RF): Rastgele orman tekniği çok sayıda karar ağacının performansını birleştirerek tahmin veya sınıflandırma yapmaktadır (Rodriguez-Galiano vd., 2015). Bu algoritma kategorik, sürekli veya ikisini birden barındıran veri setlerinde kullanılabilir gibi aynı zamanda küçük veya büyük yoğunluktaki veri setlerinde de rahatlıkla kullanılmaktadır (Akman vd., 2011; Korkmaz vd., 2018). Rastgele orman algoritması diğer algoritmalara göre doğruluk açısından daha tatmin edici olmakla beraber algoritmadaki ağaç yapısının görülememesi dezavantaj olarak görülmektedir (Akin & Terzi, 2020).

Ekstrem gradyan artırma (Extreme Gradient Boosting, XGBoost): XGBoost algoritması 2016 yılında tahmin algoritmalarına alternatif olarak geliştirilmiştir. Algoritma gradyan artırma ve karar ağacı temelli çalışmaktadır. Yarışmalarda gösterdiği başarı ile dikkatleri üzerine çekmiş olan XGBoost algoritması sınıflandırma ve regresyon problemlerinde başarı ile kullanılmaktadır. Öğrenme aşamasında ağaçları oluştururken CART algoritmasını kullanan XGBoost algoritması, kaynak kullanımına dikkat etmesi, hesaplama hızı ve model performansına odaklanması gibi konularda kullanıcıya avantajlar sunmaktadır (Verma vd., 2018; Morde, 2019; Brownlee, 2016; Kurt vd., 2020).

2.4. Model başarısının belirlenmesi

2.4. Determination of modelling performance

Çalışmanın en önemli adımlarından birisi de tahmin doğruluklarının ve kullanılan algoritmaların performanslarının karşılaştırılmasıdır. Makine öğrenmesi algoritmalarında performans ölçmekte kullanılan temel metrikler MSE (Mean Squared Error) ve RMSE (Root Mean Squared Error) olarak sayılabilir (Karasu vd., 2018; Gültepe, 2019). Bu çalışmada performans ölçmekte kullanılan MSE ve RMSE değerlerinde elde edilen düşük değerler ters orantılı olarak performansın ne kadar iyi olduğunu göstermektedir. Bu değerler sıfıra yaklaştıkça modelin daha iyi bir performans sergilediği söylenebilir (Wang & Xu, 2004; Çınaroğlu, 2017).

Algoritmanın yaptığı tahminler ve gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalaması karesel ortalama hatayı (MSE) vermektedir. RMSE değeri ise hesaplanan MSE değerinin karekökünün alınması ile bulunmaktadır. MSE değerinin hesaplama formülü Denklem 3'de ve RMSE değerinin hesaplama formülü Denklem 4'de verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_t^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_t^2} \quad (4)$$

3. Uygulama ve algoritma performanslarının belirlenmesi

3. Application and determination of algorithm performances

3.1 Uygulama

3.1. Application

Oluşturulan veri setleri ile ML algoritmalarını test etmek için SciKit-Learn kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane Python programlama dili ile yazılmış olup çok sayıda regresyon ve sınıflandırma algoritmalarını içeren bir makine öğrenmesi kütüphanesidir. Python kütüphaneleri olan NumPy ve Matplotlib kütüphaneleri üzerine inşa edilmiştir (Buitinck vd., 2013). Model başarısını artırmak için GridSearchCV ile belirlenen algoritma hiper-parametrelerinin tüm kombinasyonları denenmiş ve en ideal değerler kullanılmıştır. K-en

yakın komşu algoritması için en ideal k komşu sayısı değeri belirlenirken, karar ağacı, rastgele orman ve ekstrem gradyan arttırımı algoritmaları için ise max_depth, min_samples_leaf gibi parametrelerin en ideali kullanılmıştır.

Her iki veri seti de %70 eğitim verisi ve %30 test verisi olmak üzere ikiye bölünmüştür. Öncelikle deprem verileri ve fay bilgilerinden oluşan birinci veri seti, sonrasında ise deprem verileri, fay bilgileri ve gerinimlerden oluşan ikinci veri seti eğitim verisi ile eğitilmiş, sonrasında ise test verileri ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlama ve karşılaştırma kolaylığı açısından Tablo 4`de sunulmuştur.

Tablo 4. Algoritmalar ve hata değerleri.
Table 4. Algorithms and error value.

Algoritmalar	1. veri seti (Deprem verileri ve fay bilgileri)			2. veri seti (Gerinimler ve fay bilgileri eklenmiş)		
	MSE	RMSE	Accuracy	MSE	RMSE	Accuracy
	K en yakın komşu	0.11	0.33	0.92	0.11	0.33
Karar ağacı	0.19	0.43	0.90	0.16	0.40	0.92
Rastgele orman	0.14	0.37	0.92	0.09	0.30	0.94
XGBoost	0.14	0.37	0.91	0.09	0.30	0.92

Tablo 4 incelendiğinde deprem verileri ve fay bilgilerini içeren birinci veri seti için en iyi sonucu sırasıyla RMSE:0.33 ve MSE:0.11 değerlerine sahip olan K en yakın komşu algoritması vermiştir. Rastgele orman, XGBoost ve karar ağacı algoritmaları için bu değerler ise sırasıyla MSE: 0.14-0.14-0.19 ve RMSE: 0.37-0.37-0.43'dür. En yüksek accuracy (doğruluk) değeri ise 0.92 ile k-en yakın komşu ve rastgele orman algoritmalarında elde edilmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde günümüzde deprem tehlike analizinde aktif olarak kullanılan fay bilgileri ile gerinimlerin birlikte modele girdi olarak verildiği 2. veri setinde MSE değerlerinin 0.09-0.16, RMSE değerlerinin ise 0.30-0.40 arasında değiştiği görülmektedir. Buna göre en iyi sonucu Rastgele orman ve XGBoost algoritmaları vermiştir (RMSE:0.30 ve MSE:0.09). K en yakın komşu ve Karar ağacı algoritmaları ise sırasıyla MSE: 0.11 – RMSE: 0.33 ve MSE: 0.16 – RMSE: 0.40 değerlerine sahiptir. Bu veri setinde ise en iyi accuracy değeri rastgele orman algoritması ile elde edilmiştir.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde Rastgele orman ve XGBoost algoritmalarının ikinci veri setinde en iyi sonuçları verdiği, K en yakın komşu algoritmasının ise birinci veri setinde en iyi değeri verdiği görülmektedir. Ancak burada daha da önemli olan, depremi tanımlayan parametrelerden oluşan girdi sayısı arttıkça sistemin öğrenme becerisinin artmış, hata payının azalmış olmasıdır. Bu durum deprem tekrarlama periyodu, faylara ait tarihsel dönemdeki deprem kayıtları, yüzey kırıkları vb. bilgiler ile daha yüksek doğrulukta sonuç elde edilebileceğini göstermektedir.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada deprem kataloglarında yer alan veriler, faylara ait bilgiler ve güncel jeodezik gerinimler kullanılarak deprem kestirimi yapılması amaçlanmıştır. Bu nedenle KRDAE deprem katalogunun (1900-2021) kendisi ve bu katalogdan, artçı depremler çıkartılarak, depremler ile faylar ilişkilendirilerek ve fay bilgilerinin yanına gerinimler eklenerek elde edilen veri seti olmak üzere iki adet veri seti elde edilmiştir. Elde edilen bu iki veri seti üzerinde aynı algoritmalar kullanılmıştır. Dört farklı algoritma ile yapılan testlerde, model performansını belirlemek için MSE ve RMSE değerleri baz alınmıştır. Modelin eğitim ve test aşamalarında, veri setinin %30`u test verisi %70`i eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Sıfıra en yakın değerlerin en iyi

performansı verdiği göz önünde bulundurulursa, en başarılı algoritmaların ikinci veri setinde rastgele orman ve ekstrem gradyan arttırma (XGBoost) algoritmalarının, birinci veri setinde ise k en yakın komşu algoritmasının olduğu görülmektedir. En düşük performansı sergileyen algoritmanın ise her iki veri setinde karar ağacı algoritması olduğu görülmüştür. Depremler ve fay bilgilerinin yer aldığı veri seti ile yapılan çalışmada en düşük 0.11 bulunan karesel ortalama hata (MSE) değerinin, gerinimler ve fay bilgilerinin eklendiği veri seti ile 0.09 karesel ortalama hata değerine kadar düştüğü görülmüştür. Gerinim değerleri ve fay bilgilerinin eklenmesi ile rastgele orman ve XGBoost algoritmalarının sonuçlarında gözle görülür bir iyileşme görülmektedir.

Literatürde (Lubbers vd., 2018) tarafından tamamlanan çalışmada elde edilen akustik sinyaller veri setinin büyütülmesi ve (Moustra vd., 2011) tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan sismik elektrik sinyalleri verisindeki eksik kısımların tamamlanarak girdi sayısının artırılması gibi müdahaleler ile sonuç doğrulukları artırılmaktadır. Bunun yanında (Leduc vd., 2017) çalışmasında belirtildiği gibi jeodezik verilere ek olarak akustik sinyaller ile laboratuvar ortamında elde edilen veriler Dünya ölçeğinde genişletilerek çalışma doğruluğu artırılabilir. Son olarak (Gitis & Derendyaev, 2019) tarafından tamamlanan çalışmada da değinildiği gibi bu sonuçlar deprem tahmini problemi üzerine yapılan çalışmalara katkıda bulunabilir. Bu çalışmalardan yola çıkarak ileride yapılacak çalışmalarda paleosismolojik verilerin eklenmesi, gerinimlerin tüm ülke ölçeğinde çalışılarak veriye eklenmesi veya veri seti içerisine farklı parametrelerin eklenmesi ile başarı oranının yükseltilebileceği değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, 22.FEN.BİL.31 nolu Bilimsel Araştırma Projesi olarak Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı derginin editör ve hakemlerine teşekkür ediyorum.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışmanın bölümlerine tüm yazarlar tarafından katkı verilmiştir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

References

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), (2018). *Türkiye`de afet yönetimi ve doğa kaynaklı afet istatistikleri*. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye_de_afetler.pdf
- Akın, P., & Terzi, Y. (2020). Dengesiz veri setli sağkalım verilerinde cox regresyon ve rastgele orman yöntemlerin karşılaştırılması. *Veri Bilimi*, 3(1), 21-25.
- Akman, M., Genç, Y., & Ankaralı, H. (2011). Random forests yöntemi ve sağlık alanında bir uygulama/random forests methods and an application in health science. *Türkiye Klinikleri Biyoistatistik*, 3(1), 36-48.
- Akşehir, Z. D., & Kılıç, E. (2019). Makine öğrenmesi teknikleri ile banka hisse senetlerinin fiyat tahmini. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 12(2), 30-39.

- Aktuğ, B. (2017). Jeodezik deprem tehlike haritası. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Alptekin, M. U. Ö. (2012). Real-time (gerçek-zamanlı) sismolojisi, dünyadaki gelişimi ve Türkiye'de uygulanabilirliği. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 14(1-2).
- Altunkaynak, A., Başakın, E. E., & Kartal, E. (2020). Dalgacık k-en yakın komşuluk yöntemi ile hava kirliliği tahmini. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1547-1556. <https://doi.org/10.17482/uumfd.809938>
- Araszkievicz, A., Figurski, M., & Jarosiński, M. (2016). Erroneous GNSS strain rate patterns and their application to investigate the tectonic credibility of GNSS velocities. *Acta Geophysica*, 64, 1412-1429. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0057>
- Başer, B. Ö., Yangın, M., & Sarıdaş, E. S. (2021). Makine öğrenmesi teknikleriyle diyabet hastalığının sınıflandırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 112-120. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.842460>
- Bingol, K., Akan, A. E., Örmecioğlu, H. T., & Er, A. (2020). Artificial intelligence applications in earthquake resistant architectural design: Determination of irregular structural systems with deep learning and ImageAI method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35:4, 2197-2209. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.647981>
- Brownlee, J. (2016, August 17). *A gentle introduction to xgboost for applied machine learning*. Machine Learning Mastery. <https://machinelearningmastery.com/gentle-introduction-xgboost-applied-machine-learning/>
- Buitinck, L., Louppe, G., Blondel, M., Pedregosa, F., Mueller, A., Grisel, O., ... & Varoquaux, G. (2013). API design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project. *arXiv preprint arXiv:1309.0238*.
- Çınaroğlu, S. (2017). Sağlık harcamasının tahmininde makine öğrenmesi regresyon yöntemlerinin karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(2), 179-200. <https://doi.org/10.17482/uumfd.338805>
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş., Elmacı, H., & Çan, T. (2018). Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229-3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Genç, F. N., (2007). Türkiye'de doğal afetler ve doğal afetlerde risk yönetimi. *Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 5(9), 201-226.
- Gitis, V. G., & Derendyaev, A. B. (2019). Machine learning methods for seismic hazards forecast. *Geosciences*, 9(7), 308. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070308>
- Gündoğdu, O. (1986). *Türkiye depremlerinin kaynak parametreleri ve aralarındaki ilişkiler*. [Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi]
- Gündoğdu, O., Işık, Ö., & Koç, S. (2012). Marmara ve çevresinde deprem tehlikesi. *Okmeydanı Tıp Dergisi*, 28(2), 71-81. <https://doi.org/10.5222/otd.sup2.2012.071>
- Işık, Ö., Aydınlioğlu, H. M., Koç, S., Gündoğdu, O., Korkmaz, G., & Ay, A. (2012). Afet yönetimi ve afet odaklı sağlık hizmetleri. *Okmeydanı Tıp Dergisi*, 28(2), 82-123. <https://doi.org/10.5222/otd.sup2.2012.082>
- Kavzoğlu, T., Şahin, E. K., & Çölkesen, İ. (2012). Heyelan duyarlılığının incelenmesinde regresyon ağaçlarının kullanımı: Trabzon örneği. *Harita Dergisi*, 147(3), 21-33.
- Kaya, Ç., & Yıldız, O. (2014). Makine öğrenmesi teknikleriyle saldırı tespiti: Karşılaştırmalı analiz. *Marmara University Journal of Science*, 26(3). <https://doi.org/10.7240/mufbed.24684>
- Korkmaz, D., Çelik, H. E., & Kapar, M. (2018). Sınıflandırma ve regresyon ağaçları ile rastgele orman algoritması kullanarak botnet tespiti: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi örneği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 297-307.

- Kurt, A., Buldu, B., & Cedimoğlu, İ. H. (2020). Xgboost ve rastgele orman algoritmalarının ağ tabanlı saldırı tespitine yönelik performanslarının karşılaştırılması. *International Marmara Sciences Congress* (pp. 730-736), Kocaeli.
- Lubbers, N., Bolton, D. C., Mohd-Yusof, J., Marone, C., Barros, K., & Johnson, P. A. (2018). Earthquake catalog-based machine learning identification of laboratory fault states and the effects of magnitude of completeness. *Geophysical Research Letters*, 45(24), 13-269. <https://doi.org/10.1029/2018GL079712>
- Morde, V. (2019, Apr 8). *Xgboost algorithm: long may she reign!* Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/https-medium-com-vishalmorde-xgboost-algorithm-long-she-may-rein-edd9f99be63d>
- Moustra, M., Avraamides, M., & Christodoulou, C. (2011). Artificial neural networks for earthquake prediction using time series magnitude data or seismic electric signals. *Expert systems with applications*, 38(12), 15032-15039. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.043>
- Oğuzlar, A. (2003). Veri ön işleme. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (21), 67-76.
- Özkan, Y., Yürekli, B. S., & Suner, A. (2022). Diyabet tanısının tahminlenmesinde denetimli makine öğrenme algoritmalarının performans karşılaştırması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 211-226.
- Rodriguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M., Chica-Olmo, M., & Chica-Rivas, M. J. O. G. R. (2015). Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines. *Ore Geology Reviews*, 71, 804-818. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>
- Rouet-Leduc, B., Hulbert, C., Lubbers, N., Barros, K., Humphreys, C. J., & Johnson, P. A. (2017). Machine learning predicts laboratory earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9276-9282. <https://doi.org/10.1002/2017GL074677>
- Shen, Z. K., Wang, M., Zeng, Y., & Wang, F. (2015). Optimal interpolation of spatially discretized geodetic data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4), 2117-2127. <https://doi.org/10.1785/0120140247>
- Solak, H. İ. (2015). *GNSS hızları ile güneybatı anadolu'daki gerinim alanlarının zamansal değişimi*. [Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Solak, H. İ. (2020). *İzmir-Balıkesir transfer zonu ve çevresindeki güncel deformasyonların GNSS yöntemi ile incelenmesi*. [Doktora tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Dijital sistemler ve nesnelerin interneti tabanlı yeni bir akıllı otopark sistemi: bir kavramsal tasarım

A new intelligent parking system based on digital systems and the internet of things (IoT): A conceptual design

Başak BIYIK^{1,a}, Metin Mutlu AYDIN^{2,b}

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55270, Samsun

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55270, Samsun

• Geliş tarihi / Received: 18.02.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

Öz

Araç sayısındaki artış kent merkezlerinde otopark ihtiyacını daha da ön plana çıkarmaktadır. Sorunun çözümüne yönelik çok sayıda çalışma yürütülmekte ve birçok yeni otopark inşa edilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte akıllı sistemlerde mevcut otoparkların kapasitesinin artırılmasında etkin şekilde kullanılmaktadır. Gerek yeni otoparkların hizmete alınması gerekse mevcut otoparkların teknolojik imkanlarla donatılması ne yazık ki sorunu tamamen çözememektedir. Bu durum toplu taşımamın bireysel araçlar yerine etkin şekilde kullanılması gerçeğini ön plana çıkarmaktadır. Diğer yandan, kısmi bir çözüm olarak insanların otopark kullanım sürelerini azaltmalarını sağlamak düşüncesi de yadsınamaz bir gerçek olarak görülmektedir. Bu amaçla çalışmada bu düşüncüyü hayata geçirebilecek yeni bir akıllı otopark sistemi ve bu sistem ile entegre çalışan "Tek Araç Parkını Paylaşalım-TAPP" isimli yeni bir mobil uygulama kavramsal olarak geliştirilmiştir. Bu yeni akıllı otopark işletim ve yönetim sisteminde kullanım süresi kullanıcı tarafından belirtmek zorundadır. Kullanım süresini belirten kullanıcılar süreye riayet ettiklerinde ücret olarak ödüllendirilirken, süreye uymadıklarında fazla ücret ödeme ve otopark kullanım kısıtlaması ile karşı karşıya bırakılmaktadır. Sistem ile otopark kapasitesi anlık olarak planlanarak etkin bir işletim performansı sağlanabilecektir. Önerilen sistem üzerinde etkili faktörler SWOT (Güçlü yönler-Zayıf yönler-Fırsatlar-Tehditler) analizi ile belirlenerek her bir faktörün AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) metodu kullanılarak ağırlıklandırılması ikili karşılaştırmalar ile elde edilmiştir. Uygulanan A'WOT analizi ile araç sayısının artmasıyla birlikte park yeri ihtiyacının artmasının önerilen sistem için önemli bir fırsat olduğu belirlenmiştir. Genel faktör ağırlıklarına göre tüm faktörler birlikte değerlendirildiğinde, artan araç sayısına bağlı oluşan otopark ihtiyacının en önemli faktör olarak öne çıkması bu tür yenilikçi sistemlere ihtiyaç olduğunu net şekilde göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Akıllı otopark sistemi, Mobil uygulama, Nesnelerin interneti, Park işletim sistemleri, Trafik sıkışıklığı.

Abstract

The increase in the number of vehicles brings parking needs in city centers. Many studies are being carried out to solve the problem and new parking lots are constructed. With the developing technology, smart systems are effectively used to increase the capacity of existing car parks. Unfortunately, both putting new car parks into service and equipping existing car parks with technological facilities cannot solve the problem. This highlights that public transportation is used effectively instead of vehicles. On the other hand, the idea of enabling people to reduce parking time is a partial solution. Thus, new smart parking mobile application called "Let's Share a Single Vehicle Park-TAPP was developed conceptually. In the system, utilization period must be specified by the user. Users who specify the duration of utilization are rewarded as a fee when they comply. If they do not, they are faced with overpayment and parking utilization restriction. The parking capacity will be planned instantly and an effective operating performance will be achieved. The factors affecting the proposed system were determined by SWOT analysis and the weighting of each factor using the AHP method was obtained by pairwise comparisons. With the A'WOT analysis, it has been determined that the increase in the need for parking spaces with the increase in the number of vehicles. The need for parking, which is the most important factor due to the increasing number of vehicles, shows the need for such innovative systems when all general factor weights of factors are evaluated together.

Keywords: Smart parking system, Mobil application, Internet of things, Park operation systems, Traffic congestion.

*b Metin Mutlu Aydın; metinmutluaydin@gmail.com

1. Giriş

1.1. Introduction

Günümüzde birçok ülkede otopark yer tasarımı, kapasite tasarımı ve işletimi ne yazık ki etkin şekilde yapılmayabilmektedir. Özellikle, mevcut otopark yönetimi ile ilgili araştırmaların birçoğu, çok yakın bir zamana kadar çıkış ve varış noktaları arasında gerçekleşen yolculukları incelemektedir (Wilson & Shoup, 1990; Hess, 2001; Golias vd., 2002; Chaniotakis & Pel, 2015). Bu çalışmalarda araçların park etme hareketi ne yazık ki bir yolculuk bileşeni olarak görülemeyebilmektedir. Ancak, planlamacıların ve karar vericilerin park yeri planlamasına önem vermeleri sonucunda, 1990'ların ortalarına kadar araç sayısının artmasıyla park yeri arzının da orantılı olarak artması gerektiği görüşü ön plana çıkmaya başlamıştır (Levy & Benenson, 2015). Böylece, zaman içerisinde otopark yönetiminin verimli bir hale getirilmesi karayolu trafik sıklığının yönetimi kadar önem kazanmıştır (Shao vd., 2016).

Araçlar için otopark kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan politika olarak tanımlanan otopark yönetimi; tüketici seçimi, kullanıcı bilgisi, paylaşma, nitelik ve nicelik, verimli kullanım, esneklik, önceliklendirme, fiyatlandırma, pik-saat yönetimi ve kapsamlı analiz olmak üzere on temel stratejiye ayrılmıştır (Litman, 2016). Otopark yönetimi çerçevesinde yanlış ve standart dışı kararlar alınması kentsel trafik sistemi üzerinde istenmeyen etkilere, trafik sirkülasyonunda bozulmalara ve bunun sonucunda trafik problemlerine neden olabilmektedir (Hosseinlou vd., 2012). Çeşitli araştırmalar, karayolu ulaşımındaki yoğunluğun; gecikme, uzun yolculuk süreleri, bekleme gibi trafik problemlerine neden olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin Shoup (2006) çalışmasında, şehirlerdeki mevcut trafik hacminin %8 ile %74 arasında değişen oranlarda park yeri arayan araçlar tarafından oluşturulduğunu belirlemiştir. Bu kapsamda, bu sorunların giderilmesi amacıyla mevcut park alanlarının optimum bir şekilde yönetilmesi için dünya çapında çeşitli akıllı otopark sistemlerinden yararlanılmakta ve otopark yönetimini iyileştirmek için çeşitli öneriler öne sürülmektedir (Gallo vd., 2011). Akıllı otopark sistemleri hem teknoloji tabanlı olması hem de maliyet ve performans etkin olması nedeniyle bu konuda oldukça ön plana çıkmaktadır (Vera-Gomez vd., 2016). Bu nedenle, teknoloji tabanlı akıllı otopark sistemlerinin kullanımı gün geçtikçe daha da yaygınlaşmaktadır (Gallo vd., 2011).

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler ve artan otopark ihtiyacı ile birlikte ulaştırma plancıları ve karar vericiler efektif otopark tasarımı için çalışmalar yürütmeye başlamışlardır. Her ne kadar dijital ve akıllı sistemler otopark işletmesinde etkin olarak kullanılmaya başlansa da özellikle arz-talep dengesinin yönetilmesi için çalışmaların yürütülmesi gerekliliği ne yazık ki yadsınamaz bir gerçek olmaktadır. Mevcut durumda özellikle şehir merkezine araç girişinin yüksek olduğu ya da toplu taşıma ağının zayıf olduğu kent merkezlerinde görülen yoğun park ihtiyacı, trafikte çok büyük bir karmaşaya neden olabilmektedir. Bu nedenle birçok şehir bilinçsiz şekilde otopark kapasitesini artırma yoluna gidebilmekte ve bu otoparklarda işlevsiz kullanım nedeniyle çok kısa sürede doluluk görülebilmektedir. Mevcut araştırma sonuçlarının gösterdiği şekilde tüm otopark problemlerinin çözümünün en doğru yolu, toplu taşıma kullanımının yaygınlaştırılması ve özendirilmesi olsa da ne yazık ki toplu taşımanın etkin kullanımı birçok şehirde başılamamaktadır. Bu durumda yetkililer, her ne kadar yeni otoparklar inşa edip bunları mikrobilite çözümleri (park et-devam et) ile iyileştirmeye çalışsa da bu yeni uygulamalarda dahi bazı sorunlar gözlemlenebilmektedir. Özellikle, kullanıcıların hangi otoparkların boş olduğunu bilmesi ve boş otoparklara yönelmek istemesi önemli bir ihtiyaç olarak ön plana çıkmıştır. Birçok şehirde bu soruna yönelik otopark boş yer sayısını gösteren mobil uygulamalar geliştirilmiş olsa da bunlar henüz tam anlamıyla yaygınlaşmamıştır. Diğer yandan kullanıcılar boş otoparkların yerini önceden görüp ödemelerini mobil uygulamalar ile yapsa dahi bu durum onların otoparkları kullanım süresini kısaltıcı bir katkı sağlayamayabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada sürücülerin bir şehirdeki herhangi bir otoparkta boş yer olup olmadığını önceden görebileceği ve belirli bir süre öncesinde (kısıtlı bir süre) o yeri kendine rezerve edebildiği böylece otoparkta hiç beklemeden kendisine ayrılan yere gidebileceği bir otopark sisteminin çalışma yapısı tüm detayları ile birlikte tasarlanmış ve önerilmiştir. Bu sistemde diğer mevcut uygulamalardan farklı olarak otopark kullanıcıları otoparkta kalacağı süreyi önceden belirtecek ve bu süreye riayet etmek zorunda olacaktır. Riayet ederse daha az ücret ödeyecek, riayet etmezse daha fazla bir ücret ödeyecek ve o otoparkı tekrar kullanması sınırlandırılacaktır. Bu caydırıcılık sayesinde sürücülerin daha kısa süre otopark kullanması ve belirteceği süreye göre otoparkın daha etkin bir performans ile çalışması hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında önerilen akıllı otopark sistemi ile otopark kullanıcılarının kullanım süresini kısaltan ve işletim performansını daha da arttıran yeni bir uygulama altyapısı geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde literatürde park sorununa çözüm arayan çalışmalardan bazıları incelenmiş ve çalışmanın mevcut çalışmalardan farkı ortaya koyulmuştur. Üçüncü bölümde kullanılması planlanan ara yüzün tasarımı ve pencereler hakkında bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde tasarlanan akıllı otopark sistemi ile ilgili tüm özellikler detaylandırılmış ve görsel tasarımlar ile desteklenmiştir. Beşinci bölümde tasarlanan sistemde meydana gelebilecek muhtemel sorunlar senaryolar halinde incelenmiş ve çözüm önerileri sunulmuştur. Altıncı bölümde önerilen otopark tasarımı için A'WOT analizi yapılarak sistemin öncelikleri belirlenmiştir. Son olarak yedinci bölümde önerilen otopark tasarımının ve analiz sonuçlarının değerlendirildiği sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. Literatür taraması

2. Literature review

Son yıllarda Dünya genelinde birçok şehirde yaygın şekilde görülen trafik artışı ile birlikte park yeri bulmak sürücüler için oldukça güç bir hale gelmiştir. Özellikle, nüfus yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde oluşan trafik yoğunluğu, park yeri arama esnasında düşük hızda seyreden araçların trafiğin akışını etkilemesi nedeniyle daha da artmaktadır. Sürücülerin uygun park alanı arayışı, zaman ve enerji kaybına neden olmanın yanı sıra hem sürücülerde stres, agresif davranışlar vb. problemlere hem de gereksiz yakıt tüketimi nedeniyle ekonomik kayba ve çevresel kirliliğin artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, literatürde sürücülerin park esnasında harcadıkları zaman ve yakıt kaybı ile çevresel olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır (Runge & Cole, 2002; Loukaitou-Sideris vd., 2007; Inci, 2015; Klappenecker vd., 2015). Teknolojik gelişmeler ile birlikte bu amaç doğrultusunda son yıllarda teknoloji tabanlı akıllı otopark sistemleri oldukça tercih edilen bir yaklaşım olmaktadır. Geliştirilen bu akıllı otopark sistemleri; kızılötesi, ultrasonik, manyetometre ve radar gibi çeşitli sensörler, makine öğrenimi, yapay zekâ, görüntü işleme gibi teknolojilerden yararlanarak sürücülerin park sürecini daha verimli bir hale getirmektedir. (Saharan vd., 2023). Literatürde, araçların park sürecinin dijital sistemler ile daha da iyileştirilmesi amacıyla yapılmış çalışmalardan bazıları Tablo 1'de verilen şekilde özetlenebilmektedir.

Tablo 1. Literatürde akıllı otopark sistemlerini konu alan bazı çalışmalar
Table 1. Some studies on smart parking systems in the literature

Referans	Kullanılan yöntem	Çalışma içeriği
(Hilmani vd., 2012)	Kablosuz sensör ağları, nesnelerin interneti, RFID	Doğrusal ve toplu açık otopark alanı olmak üzere iki tip açık otopark için park yeri bulmaya izin veren hibrit bir algoritma önerisi
(Shaikh vd., 2016)	Kablosuz sensör ağları, gömülü sistem, nesnelerin interneti	Boş otopark alanlarını etkili bir şekilde tespit edilmesine izin veren rezervasyon tabanlı akıllı park sisteminin tasarımı ve uygulanması
(Kanteti vd., 2017)	Optik karakter tanıma, döner park, arduino, CMOS sensörler, MySQL	Nesnelerin interneti ve sensör teknolojileri ile donatılmış akıllı park sistemlerinin tartışılması
(Vakula & Kolli, 2017)	Nesnelerin interneti, NodeMCU, Raspberry Pi3	Mevcut park alanlarını yönetmek için nesnelerin interneti tabanlı bir otopark sisteminin sunulması
(Safi vd., 2018)	VANET, Bulut bilişim	Boş park yeri bilgisi sağlayan ve rezerve olanağı sunan bir akıllı park sistemi önerisi
(Ruili vd., 2018)	Nesnelerin interneti, Görüntü işleme, ultrasonik sensörler	Sistem tarafından sürücüye en uygun park yerinin önerildiği bir akıllı park sisteminin geliştirilmesi
(Thomas & Kovoov, 2018)	Genetik algoritma, kuyruk teorisi, ultrasonik sensörler	AVM'lerin otoparklarında yaşanan park sorunu için bir algoritmanın önerilmesi
(Alam vd., 2018)	Baskı devre kartı, kablosuz manyetik sensör, bulut bilişim	Boş park yerlerinin tespiti için manyetik ve görüş sensörü tabanlı iki tür park sisteminin önerilmesi ve web uygulamasının geliştirilmesi
(Ahmed vd., 2019)	Blok zinciri, Nesnelerin interneti, P2P	Kullanıcıları en yakın park alanına yönlendiren telefon uygulaması veya web sitesi olabilecek bir uygulama önerisi
(Sakurada vd., 2019)	ICT, CPS Çoklu etmen sistemleri, nesnelerin interneti	Tasarlanan etmen tabanlı CPS'nin bisiklet ve arabalara özel iki prototip park sisteminde uygulanması
(Pandit vd., 2019)	Thing-speak bulut, Arduino, Kızılötesi sensör	Gerçek zamanlı uygun park alanlarını gösteren ve rezerve edilebilen bir mobil uygulamanın geliştirilmesi

Tablo 1. Devamı
Table 1. Continue

Referans	Kullanılan yöntem	Çalışma içeriği
(Canlı & Toklu, 2021)	Derin öğrenme, Bulut bilişim	Park yeri arama problemini azaltmak için bulut tabanlı bir mobil akıllı park uygulama önerisi
(Badhouthiya & Saxena, 2022)	Nesnelerin interneti, ultrasonik sensör	Otomatik park ücreti tahsilatı, uygun park alanlarının tespiti ve rezervasyonuna imkan veren bir sistemin geliştirilmesi
(Jambhulkar & Thaware, 2022)	Bulut depolama, Firebase	Bulut tabanlı akıllı park uygulaması geliştirilerek kolay park yeri bulunması ve rezerve edilmesi
(Turki vd., 2022)	Nesnelerin interneti, Blok zinciri	Güvenli bir şekilde park yeri kiralayıp rezervasyon yapılabilecek platform geliştirilmesi
(Neha vd., 2022)	Görüntü işleme	Açık otoparklarda kamera görüntüleri kullanılarak boş park alanlarının tespit edilmesi
(Saharan vd., 2023)	Makine öğrenimi, oyun teorisi	Cadde üzeri park etme senaryolarında dinamik fiyatlandırma ve park yeri tahsis edilmesi

Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde, akıllı otopark sistemleri ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların birçoğu boş park alanlarının tespit edilmesi ve bu park alanlarının rezerve edilebilmesi için sürücülere sunulan telefon uygulamalarının veya web sitelerinin tasarımını kapsadığı görülmektedir. Ancak, literatürde dolu bir park alanını rezerve edilebilen ve park alanı olarak sunan bir akıllı park sistemi önerisine rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında ise önerilen rezervasyon tabanlı akıllı otopark sistemi ile sürücüler otoparktaki boş alanların yanı sıra anlık olarak dolu olan ancak kullanıcı tarafından belirtilen saatten itibaren boş olacağı temin edilen alanları da görebilecek, rezerve edebilecek, çıkış saatini belirtecek ve süreye uyarısa indirimli park etmiş olacaktır. Böylece, otoparkta rezerve edilebilecek boş park alanı olmadığı durumlarda dolu park alanlarının rezerve edilmesine olanak sağlamasıyla birlikte kapasitenin efektif kullanımını sağlayacak yeni bir akıllı otopark sistemi geliştirmeye çalışılmıştır. Böylece yenilikçi bir akıllı otopark sistemi tasarımıyla yetkililer bu konuda daha fazla özendirilmeye ve literatürde bu konudaki boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

3. Rezervasyon tabanlı yeni bir akıllı otopark sistemi ve uygulama ara yüzünün tasarımı

3. Design of a new reservation-based smart parking system and application interface

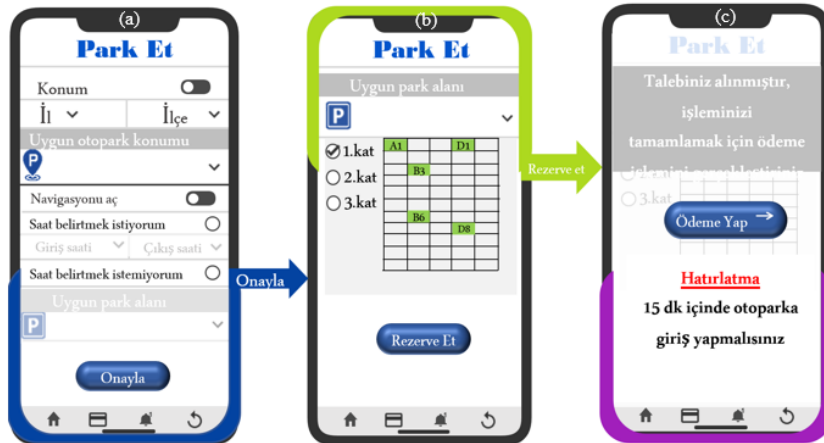
Çalışma kapsamında önerilen yeni akıllı otopark sisteminin kullanımı için “Tek Araç Parkını Paylaşalım-TAPP” isimli bir mobil uygulama geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bunun için ilk aşamada kullanıcı ara yüzü tasarımı için popüler bir yazılım olan Adobe XD kullanılarak mobil uygulamanın tasarlanması önerilmiştir. Ardından oluşturulan tasarımın, tek bir kod tabanı ile hem Android hem de IOS için uygulama geliştirmeye olanak sağlaması nedeniyle tercih edilen JavaScript programlama diline entegre edilerek uygulamanın işlevsel hale getirileceği düşünülmüştür. Bu amaçla, pilot uygulamanın ara yüzü Şekil 1’de verilen şekilde tasarlanmıştır. Uygulamada, kullanıcıların programı yüklemesinin ardından karşısına çıkan ilk pencerede Şekil 1a’da gösterildiği gibi uygulamanın içinde barındırdığı pencereler sunulmaktadır. Pencerelere erişimin sağlanması için ilk olarak Şekil 1b’de gösterilen “Kaydol” sekmesi kullanarak kullanıcının adını, telefon numarasını, e-posta adresini, araç plakasını ve araç rengi bilgilerini ilgili alanlara kaydetmesi gerekmektedir. Kayıt bilgileri değiştirilmek istendiğinde ise bu pencere üzerinden bilgiler güncellenebilmektedir. Sonraki adımda ise otoparkı sürekli kullanacaklar için Şekil 1c’de gösterilen ekranda görülen kriterleri sağlayacağını taahhüt ederek aylık üyelik satın alabilmektedirler. Bu yeni otoparklarda abonman üyeler için ayrılan kontenjanın sınırlı olması nedeniyle uygun kontenjana sahip otoparklar kullanıcının konumuna göre listelenecektir. Üyelğin satın alınmasından sonra üyelik kriterlerine riayet etmediği tespit edilen kullanıcıların üyeliği iptal edilmekte ve bu alan rezervasyon tabanlı otopark sistemine tahsis edilmektedir.



Şekil 1. Uygulamanın; ana giriş, kaydol ve abonman üyelik için tasarlanan kullanıcı ekranları

Figure 1. The application; user screens designed for main login, sign up and subscription membership

Şekil 1a'da görülen "Park et" kısmında sürücüdün ilk olarak konum bilgisini girmesi istenmektedir. Bunun için uygulamanın konum bilgisi erişimine izin vererek veya kullanıcı tarafından manuel olarak bilgi girişi sağlanabilmektedir. Uygun otopark alanının bulunduğu akıllı otoparkların konumu, mesafe kriteri göz önüne alınarak listelenmektedir. Kullanıcıların, otopark seçimini gerçekleştirdikten sonra "saat belirtmek istiyorum" veya "saat belirtmek istemiyorum" seçeneklerinden birini seçmesi gerekmektedir (Şekil 2a). Saat belirtmeden rezervasyon yapmak isteyen kullanıcıların ilgili kutucuğu işaretlemesi ile birlikte seçilen otoparkta bulunan uygun park yeri sayısının gösterildiği bölüm aktif hale gelmektedir (Şekil 2b). Kullanıcı bu bölümden rezervasyonunu onaylayarak Şekil 2c'de gösterilen pencereye yönlendirilmektedir. Saat belirtmek isteyen kullanıcılar ise park alanına giriş ve çıkış saatlerinin belirterek onay butonuna tıklanmasıyla ilk olarak Şekil 2b'de gösterilen pencereye yönlendirilmektedir. Bu pencerede, seçilen otoparkta bulunan uygun park alanları sunulmaktadır. Kullanıcı uygun park alanlarından birini seçerek rezerve et butonunu seçecektir. Park alanının rezerve edilmesi ile birlikte Şekil 2c'de gösterildiği gibi kullanıcıya ödeme işlemini gerçekleştirmesini ve rezervasyon işleminin sonrasında 15 dk. içinde (ihtiyaca ve analizlere göre değiştirilebilir) otoparka giriş yapması gerektiğini hatırlatan bir bildirim gönderilmektedir.



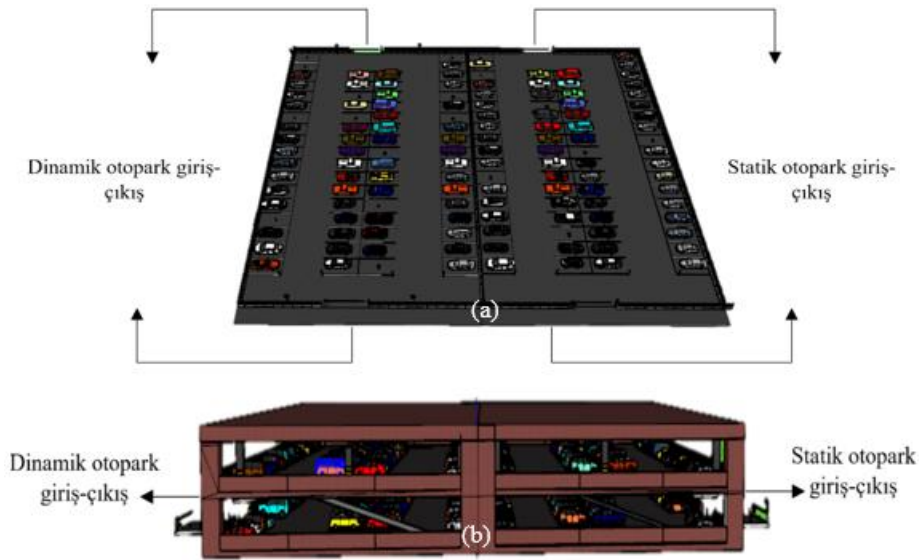
Şekil 2. Uygulama kapsamında tasarlanan ve park etmek için kullanılacak kullanıcı ekranları

Figure 2. User screens designed within the scope of the application and used for parking

4. Uygulama ile entegre çalışan akıllı otopark tasarımı

4. Smart parking design integrated with the application

Çalışma kapsamında her iki otopark türü için de (açık otopark ve kapalı otopark) planlama gerçekleştirilmiştir (Şekil 4a-b). Bu kapsamda otopark kapasitesinin bir kısmının aylık üyeliğe sahip olan veya saat belirtmek istemeyen kullanıcıların, diğer kısmının ise saat belirterek park yeri rezerve eden kullanıcıların hizmetine sunulması planlanmıştır. Çalışma da ayrıca her iki otopark türü (açık/kapalı) mevcut (klasik) sistemi ve yeni önerilen (akıllı) sistemi içerisinde barındıracaktır. Bu iki tip otopark çalışma içerisinde statik (klasik) otopark ve dinamik (akıllı) otopark olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4. (a) Açık ve (b) kapalı otoparkların 3B genel görünümleri
Figure 4. 3D general views of (a) open and (b) closed car parks

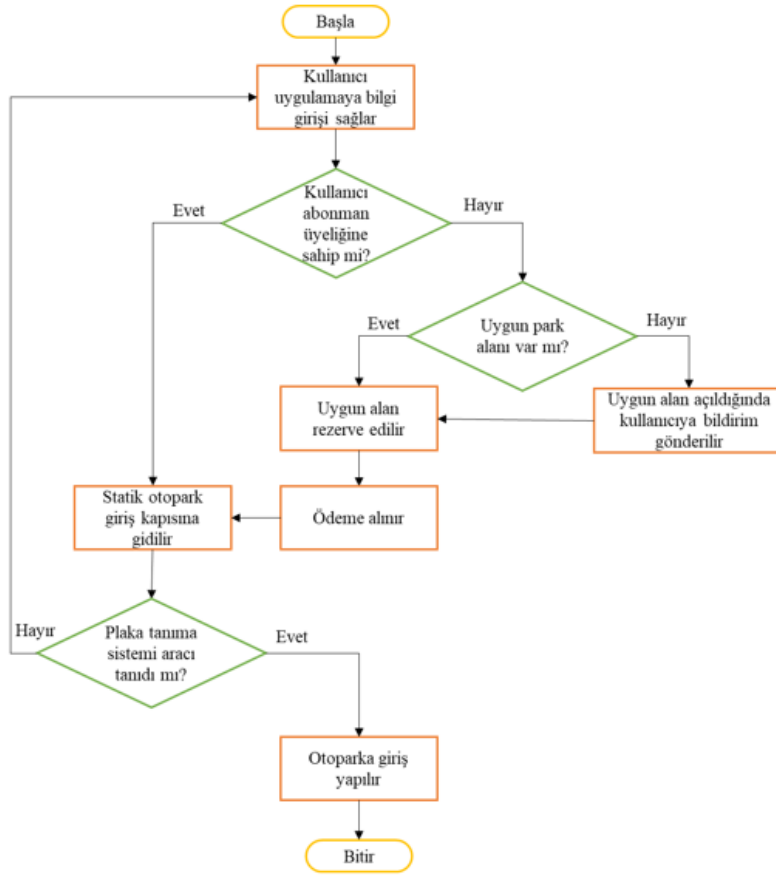
4.1. Statik otopark tasarım özellikleri

4.1. Static parking design features

Önerilen yeni otopark tasarımı içerisinde statik otopark, açık ve kapalı otoparkların üyelik sahibi olan veya giriş-çıkış saatini belirtmek istemeyen kullanıcılar için ayrılmış bölümünü ifade etmektedir. Modellenen otoparklarda açık ve kapalı otopark kapasitelerinin yarısı (%50) statik otopark olarak kurgulanmıştır. Statik otoparklar, dinamik otoparklardan farklı olarak, uygun park alanlarını belirtmek yerine uygun park alanının olup olmadığı ile ilgilenmektedir. Bu nedenle plaka tanıma sistemi harici, dinamik otoparklarda kullanılan kameralar ve sensörler statik otoparklarda mevcut değildir. Bunun yerine otoparka giren ve çıkan araç sayısından yararlanarak otoparkta bulunan uygun park alanı sayısı kullanıcıya sunulmaktadır. Saat belirtmek istemeyen kullanıcıların otoparka giriş yapabilmeleri için uygulama üzerinden uygun park alanını rezerve etmeleri yeterli olmaktadır. Kullanıcıların üyelik sahibi olabilmesi için telefon uygulaması aracılığıyla aylık abonman üyeliği satın alması gerekmektedir. Kullanıcıların üyelik satın alabilmesi için de temel iki kriter belirlenmiştir. Bunlar;

- Ayın en az yirmi günü park alanını kullanıyor olmak,
- Aracın otoparkta günlük en az altı saat park halinde durmasıdır.

Yukarıda belirlenen iki kriter sağlanmadığı takdirde kullanıcının abonman üyeliği iptal edilmektedir. Bu sayede statik otopark kapasitesinin verimli bir şekilde kullanılması ve dinamik otoparklarda uzun süreli parklar nedeniyle oluşabilecek yoğunluğun azaltılması amaçlanmaktadır. Statik otoparklara giriş için otopark işletim senaryosu önerisine ait akış şeması Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Statik otoparka giriş önerilen için işletim modeli akış şeması
Figure 5. Operating model flowchart for proposed static parking area entrance

4.2. Dinamik otopark tasarım özellikleri

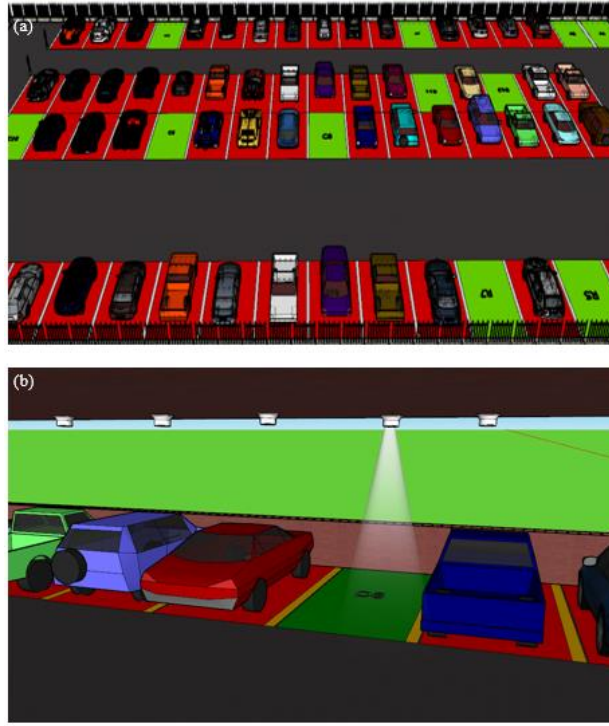
4.2. Dynamic parking design features

Çalışmada dinamik otopark, park alanını rezerve ederken giriş ve çıkış saatini belirten kullanıcılara ayrılan bölüm olarak tanımlanmaktadır. Dinamik otopark sisteminde kullanıcılar, ilk olarak park halinde aracın bulunmadığı boş park alanlarına yönlendirilmektedir. Otopark kapasitesinin dolması durumunda park halinde olan araçların yerleri, belirtilen çıkış saatleri dikkate alınarak uygun park alanı olarak gösterilmektedir.

Açık dinamik otoparklar ve kapalı dinamik otoparklarda uygun park alanlarının tespit edilmesi için kullanılan dijital sistemler farklılık göstermektedir. Açık dinamik otoparklarda, uygun park alanlarının saptanması için otopark genelini görüntüleyebilecek kameralardan yararlanılırken, kapalı dinamik otoparklarda her park alanının üzerine araç algılayıcı sensörler yerleştirilecek araçlar tespit edilecektir. Tespit edilen boş ve dolu otopark alanları kullanıcılara sunularak uygun park alanlarına erişimleri sağlanacaktır (Şekil 6a-b).

Her iki tip otoparkın giriş ve çıkışlarında ise ortak nokta olarak plaka tanıma sistemi kullanılmaktadır. Bu sayede uygulama üzerinden park yeri rezerve eden araçlar otoparka giriş esnasında tespit edilerek; giriş-çıkış hareketleri belirlenebilecektir.

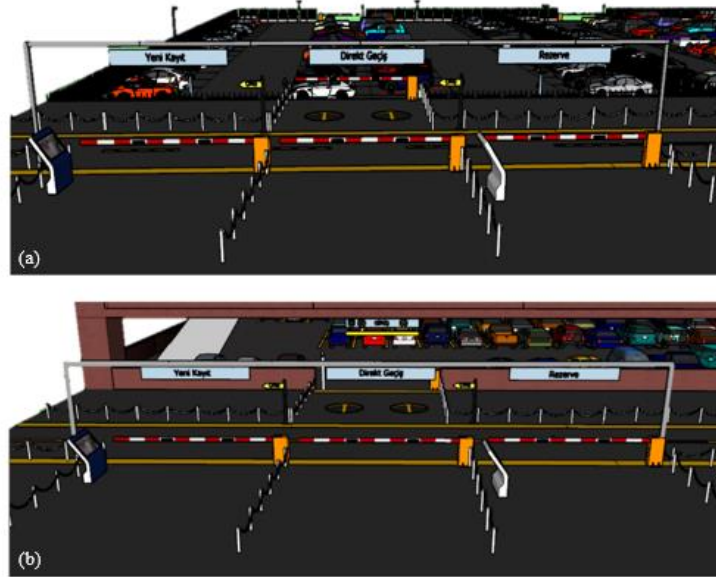
Dinamik otopark girişlerine, önerilen mobil uygulamayı kullanamayacaklar için kiosklar yerleştirilecektir. Otoparka giriş esnasında, kiosk kullanarak yeni kayıt oluşturan veya kaydı bulunup kapıda rezervasyon yaptırmak isteyen kullanıcıların, uygulama üzerinden rezervasyonunu oluşturan kullanıcıları bekletme olasılığını ortadan kaldırmak amacıyla üç farklı giriş kapısı önerilmiştir. Bu kapsamda dinamik otoparklara giriş esnasında iki kademeli bariyer sistemi kullanılması planlanmaktadır.



Şekil 6. (a) Açık otoparklarda kamera ile (b) kapalı otoparklarda ise sensörler ile boş/dolu otopark alanlarının belirlenmesi

Figure 6. (a) Determination of empty/full parking areas with cameras in open parking lots (b) with sensors in indoor parking lots

Böylece kapıda yeni kayıt veya rezervasyon yaptıran kullanıcıların, o an için park yeri bulamaması durumunda ikinci bariyere ulaşmadan çıkışa yönlendirilmesi ile giriş kapısında olası bir yığılmanın önüne geçilmesi öngörülmektedir (Şekil 7a-b).



Şekil 7. (a) Açık ve (b) kapalı otoparklar için önerilen iki kademeli otopark giriş sistemi

Figure 7. The proposed two-stage car park entrance system for (a) open and (b) closed car parks

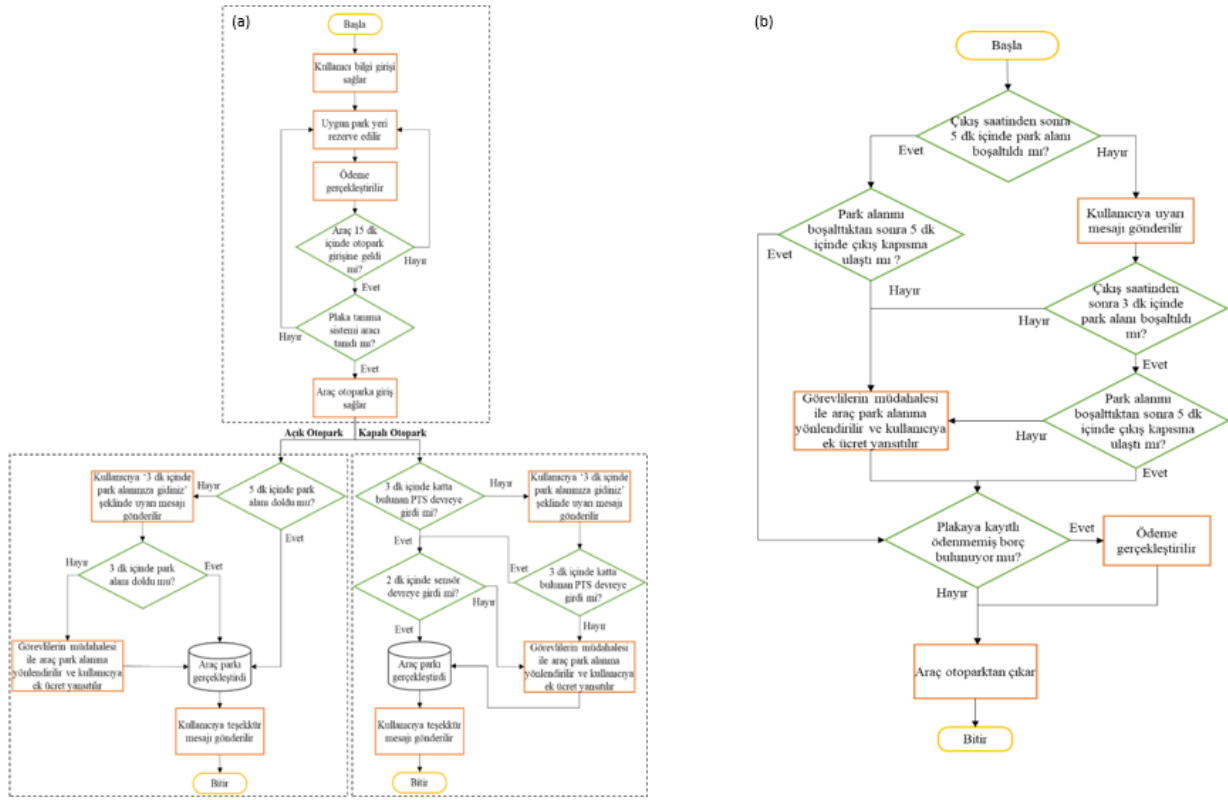
Otoparktan çıkış aşamasında ise otoparkı kullanan araçlar bariyerlerin önüne geldiğinde plakası okunan araç adına ödenmesi gereken bir tutar olup olmadığı kontrol edilecek ve bu duruma göre aracın çıkışına izin verilecektir. Aynı zamanda otoparklardaki her bir koridorun başına ve sonuna plaka tanıma sisteminin entegre edildiği kameralar konumlandırılacak ve bu sayede araçların otoparka giriş yaptığı andan itibaren doğru park alanına giden rotanın takibi yapılacaktır. Otoparkı kullanan araçların yanlış park alanlarına yönelmeleri durumunda, bu durum kolaylıkla tespit edilebilecek ve araç sürücüleri mobil uygulama üzerinden kendilerine tanımlanmış park alanlarına yönlendirilecektir (Şekil 8a-b).



Şekil 8. Açık ve kapalı otopark alanları giriş-çıkışlarında kullanılacak plaka tanıma sistemleri

Figure 8. License plate recognition systems to be used in the entrances and exits of open and closed parking areas

Dinamik otoparklar için önerilen giriş ve çıkış işletim ve yönetim planına ait akış şeması ise Şekil 9 (a-b)'de gösterilmektedir.



Şekil 9. Dinamik otoparklar için (a) giriş ve (b) çıkış kapıları yönetim planına ait akış şeması
Figure 9. Flow chart of (a) entrance and (b) exit gates management plan for dynamic car parks

5. Öngörülen sorunlar ve çözüm önerileri

5.1. Projected problems and solutions

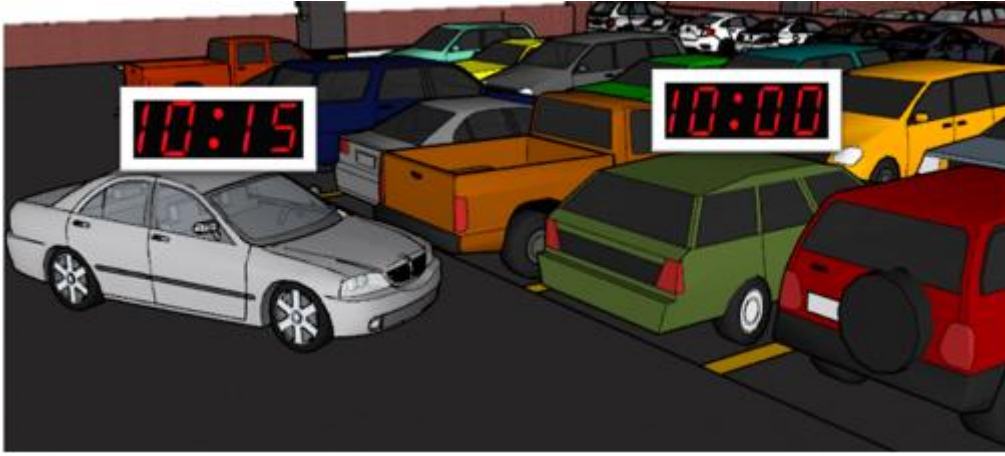
Önerilen yeni akıllı otopark sistemi içerisinde barındırdığı birçok özellik nedeniyle her ne kadar birçok yönden etkin olsa da sürücü ya da sistem kaynaklı aksaklıkların yaşanması nedeniyle beklenmeyen sorunlarla karşılaşılması da beklenmektedir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında otopark işletimi esnasında yaşanması muhtemel sorunlar farklı başlıklar altında toplanmış ve bu sorunlara yönelik çözüm önerileri geliştirilmeye çalışılmıştır.

5.1. Dinamik otoparkı tercih eden kullanıcıların belirttikleri saatte otoparktan çıkış sağlamamaları (Problem-1)

5.1.1. Users who prefer dynamic parking and do not exit the parking area at the specified time (Problem-1)

Kullanıcıların kendileri tarafından belirtilen saatte otopark alanından çıkış yapmamaları durumu, kendisinden sonra park alanını rezerve eden kullanıcının giriş saatinde gecikmelere neden olabilecektir. Bu durumda önerilen yeni akıllı otopark sisteminin işleyişinde aksaklığa yol açabilecektir (Şekil 10). Söz konusu bu durumun önüne geçebilmek için;

- Kullanıcılar, park alanından belirttikleri saatte çıkamayacaklarını öngörüyorlarsa uygulama üzerinden süre uzatabilmektedirler (bir defaya mahsus).
- İlk aşamada belirlenen çıkış saatinde uyulmuyorsa kendisinden sonra park alanını kullanacak olan kullanıcı, otopark kapasitesinin %10'unu oluşturan yedek park alanına yönlendirilecektir.
- Belirlenen süreye uyulmaması nedeniyle kullanıcıya daha fazla otopark ücreti ödeme cezası yansıtılacak ve kullanıcı üç gün süreyle bu otoparkı tekrar kullanamayacaktır.
- Dolu otopark alanları uygulamada, belirtilen çıkış saatinden 15 dakika sonra rezerve edilebilir alan olarak görülebilecek; böylece o otopark alanının başka bir kullanıcı tarafından rezerve edilmesinin önüne geçilebilecektir.



Şekil 10. Sürücülerin kendi belirledikleri çıkış saatinde otopark alanından ayrılmamaları durumu

Figure 10. The case of drivers who do not leave from the parking area at the declared time

5.2. Yedek otopark alanlarının dolması (Problem-2)

5.2. Filling the spare parking areas (Problem-2)

Dinamik otoparklarda park alanı rezerve ederken kullanıcılar ilk olarak boş alanlara yönlendirilecektir. Boş alanlar tükendikten sonra ise dolu park alanları rezerve edilebilecektir. Kullanıcıların otoparktan çıkış saatinde uymamaları durumunda ise Problem 1’de belirtildiği gibi yedek park alanlarından yararlanılacaktır. Bu alanların dolması durumunda araçların yönlendirilebileceği bir alan olmayacak ve aksilikler meydana gelebilecektir. Bu nedenle yedek park alanlarının dolması durumunda park alanı rezerve etmek isteyen kullanıcılara “Şu anda uygun park alanı bulunmamaktadır!” uyarısı gönderilerek park yeri kiralama sistemine erişimleri ve dolayısıyla otoparklara girişleri engellenecektir. Kullanıcılar tercihe bağlı olarak bildirimlerini açarak uygun park alanı oluştuğunda otoparkta boş yer olduğuna dair bildirim alabilecektir (Şekil 11).



Şekil 11. Otoparkın dolu/boş olması durumuna göre kullanıcıların göreceği otopark kiralama ekranları

Figure 11. Parking lot rental screens that users will see depending on whether the parking lot is full/empty

5.3. Abonman üyelik şartlarının sağlanmaması (Problem-3)

5.3. Subscription membership conditions are not met (Problem-3)

Statik otoparklarda abonman üyeliği olan kullanıcılar için belirli sayıda park alanı ayrılmaktadır. Bu nedenle abonman üyelik satın alabilecek kullanıcı sayısı da sınırlı olacaktır. Belirlenen üyelik şartlarını sağlamayan kullanıcının abonman üyeliği iptal edilerek ek ücret yansıtılacaktır (Şekil 12).



Şekil 12. Abonman üyelik şartlarının sağlanmaması durumu

Figure 12. Failure to meet the subscription conditions

5.4. Kullanıcının park alanını rezerve edip gelmemesi (Problem-4)

5.4. Whether the user has reserved the parking space or not (Problem-4)

Kullanıcılar park yerini rezerve ettikten sonra 15 dakika (süre yapılacak analizler ile değişiklik gösterebilir) içinde otoparka giriş yapmaları gerekmektedir. Kullanıcının belirlenen süre içinde otoparka giriş yapmaması durumunda kullanıcıya bildirim gönderilecek ve ilave 10 dakika içinde park alanına giriş yapmazsa rezerve işlemi iptal edilecektir. Park alanı rezerve edip gelmeyen kullanıcı aynı gün ve sonraki üç gün içerisinde tekrar rezerve işlemi gerçekleştiremeyecektir (Şekil 13).



Şekil 13. Kullanıcıların rezervasyon yapıp gelmemesi durumu

Figure 13. Whether users make a reservation or not

5.5. Kullanıcıların araçlarını yanlış park alanlarına park etmesi (Problem-5)

5.5. Users parking their vehicles in wrong parking areas (Problem-5)

Otoparka giriş yapan araçların yanlış alanlarına park etmesine engel olabilmek için otoparklarda bazı doğrulama noktaları mevcut olacaktır. Araçlar otoparka ilk girdikleri anda plakaları plaka tanıma sistemi tarafından doğrulanacak ve park alanına gidene kadar katlarda bulunan kameralar sayesinde hareketleri kontrol edilecektir. Araçlar kendilerine tanımlanan park alanlarına park etme işlemini tamamladıklarında, uygulamaya kaydolurken belirttikleri plakalar ile park alanına giren araçların eşleşip eşleşmediğine bakılacaktır. Plaka tanıma sistemi tarafından tespit edilen plaka bilgileri ile park eden araç bilgilerinin eşleşmemesi durumunda bir yanlışlık bulunuyorsa, kullanıcıya hatalı parkın düzeltilmesi gerektiği ile ilgili bildirim gönderilecek ve kendisine ayrılan yer bir bilgilendirme mesajı ile tekrar hatırlatılacaktır (Şekil 14).



Şekil 14. Kullanıcıların kendilerine ayrılan park alanı dışında başka bir yere park etmesi

Figure 14. Users parking in a place other than the parking area allocated to them

6. A'WOT Analizi ile otopark genel önceliklerinin elde edilmesi

6. Obtaining general parking priorities with A'WOT Analysis

A'WOT, stratejik karar desteğinde yaygın bir şekilde kullanılan bir yöntem olan SWOT analizi ile AHP birleştiren hibrit bir yöntemdir (Kajanus vd., 2004). Bu sayede SWOT analizi ile güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler için belirlenen faktörlere, AHP metodu ile sayısal ağırlıklar verilerek analiz daha etkili bir hale getirilebilmektedir (Kangas vd., 2001). Çalışmanın bu bölümünde, önerilen akıllı otopark sistemi için bir A'WOT analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak A'WOT yönteminin ilk aşaması olan SWOT analizi uygulanmıştır (Şekil 15).

SWOT analizi ile faktörlerin belirlenmesinin ardından her bir faktörün AHP metodu kullanılarak ağırlıklandırılması için ulaşım alanında 5-10 yıl aralığında değişen tecrübeye sahip iki belediye personeli, iki akademik personel ve bir karayolları personeli olmak üzere 5 kişilik bir uzman ekip oluşturularak ikili karşılaştırma matrisleri elde edilmiştir. İkili karşılaştırmalar yapılırken Saaty (1977) tarafından önerilen ve Tablo 2'de gösterilen ölçeklendirmeden yararlanılmıştır.

<u>GÜÇLÜ YÖNLER</u>	<u>ZAYIF YÖNLER</u>
<p>G1-Otoparkta park yeri bulmak için kolaylık sağlaması G2-Daha uygun otopark ücreti seçeneği sunması G3-Otopark kapasitesinin daha etkili bir şekilde kullanımının sağlanması G4-Zaman kaybını azaltması G5-Park yeri ararken harcanan yakıt miktarında azalma sağlanması G6-Otoparklarda görülebilecek kuyruk oluşunda azalma sağlanması</p>	<p>Z1-Kullanıcıların belirttiği çıkış saatine riayet etmeme olasılığı Z2-Bazı ihlal durumlarında yaptırım uygulanacak olması Z3-Yedek park alanlarının dolu olma olasılığı Z4-Kullanıcıların abonman üyelik şartlarının sağlayamama olasılığı Z5-Kullanıcının park alanı rezerve edip gelmemesi Z6-Kullanıcının aracını yanlış park alanına park etmesi</p>
<u>FIRSATLAR</u>	<u>TEHDİTLER</u>
<p>F1-Artan araç sayısına bağlı olarak gelişen otopark ihtiyacı F2-Mevcut otopark işletme altyapısının yetersizliği F3- Yüksek otopark ücretleri F4-Park problemlerini çözmek amacıyla belediyelerin otoparklara yatırım yapma arzusu</p>	<p>T1-Kullanıcıların kurallara riayet edemeyeceklerini düşünerek tercih etmemeleri T2-Yenilikçi yaklaşımları kabul etme eğilimi zayıf olan sürücü profili T3-Sistemin işletme yöntemini veya performansını beğenmeme durumu</p>

Şekil 15. Önerilen akıllı otopark sistemi için SWOT analizine ait sorular

Figure 15. SWOT analysis questions for the proposed smart parking system

Tablo 2. Önem skala değerleri ve tanımları (Saaty, 1977)

Table 2. Significance scale values and definitions (Saaty, 1977)

Değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki seçenekte eşit derecede öneme sahip
3	Orta derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı biraz üstün kılmakta
5	Kuvvetli derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir kriteri diğerine karşı oldukça üstün kılmakta
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir kriter diğerine göre üstün sayılmıştır
9	Kesin önemli	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanır çok büyük güvenilirliğe sahiptir
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere iki ardışık yargı arasındaki değerler

Beş farklı karar vericinin değerlendirmeleriyle elde edilen karşılaştırma matrisleri, geometrik ortalama metoduyla irdelenerek ortak karar matrisleri oluşturulmuştur. Ardından ortak karar matrisi, Denklem (1) kullanılarak normalize edilmiştir.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

Ardından Denklem (2) ile satır elemanlarının ortalamaları bulunarak her bir faktörün yerel faktör ağırlığı hesaplanmıştır.

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (2)$$

Elde edilen sonuçların geçerli sayılabilmesi için matris tutarlılıklarının kontrol edilmiştir. Bu amaçla Denklem (3)'te gösterildiği gibi sütun vektörü (D), karşılaştırma matrisine (W_i) bölünerek temel değer (E) elde edilmiştir. Elde edilen değerler Denklem (4)'te gösterildiği gibi kullanılarak λ değeri elde edilmiştir.

$$E_i = \frac{d_i}{w_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (4)$$

Bulunan λ değeri denklem (5)' de gösterildiği gibi kullanılarak tutarlılık indeksi (CI) hesaplanmıştır. Ardından denklem (6) ile nihai tutarlılık oranı (CR) elde edilmiştir. Denklem (6)' da kullanılan RI değerleri kriter sayısına göre değişmekte olup Tablo 3'e göre belirlenmiştir. Bulunan CR değerinin 0,1' den küçük olması halinde matrisin tutarlı olduğu kabulü ile yapılan hesaplamalar sonucunda oluşturulan tüm matrislerin CR değerlerinin 0,1' den küçük olduğu görülmüştür.

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Tablo 3. RI değerleri (Lee vd., 2021)

Table 3. RI values (Lee et al., 2021)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmektedir. Burada yerel faktör ağırlıkları grup içindeki faktörlerin birbiri ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen ağırlığı gösterirken, genel faktör ağırlıkları SWOT faktörlerinin toplam ağırlık içindeki payını ifade etmektedir. Genel faktör ağırlıkları, her bir SWOT grubu için belirlenen grup önceliği değerleri ile yerel faktör ağırlıklarının çarpılması ile elde edilmiştir.

Tablo 4. A'WOT tekniği sonucunda elde edilen faktör ağırlıkları

Table 4. Factor weights obtained as a result of the A'WOT technique

SWOT grubu	Grup önceliği	SWOT faktörleri	Yerel faktör ağırlığı	Genel faktör ağırlığı	Önem sırası
1- Güçlü yönler	0,25	Otoparkta park yeri bulmak için kolaylık sağlanması	0,188	0,047	2
		Daha uygun otopark ücreti seçeneği sunması	0,095	0,024	5
		Otopark kapasitesinin daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlanması	0,348	0,087	1
		Zaman kaybını azaltması	0,142	0,035	4
		Park yeri ararken harcanan yakıt miktarında azalma sağlanması	0,041	0,010	6
		Otoparklarda görülebilecek kuyrukta azalma sağlanması	0,185	0,046	3
2- Zayıf yönler	0,25	Kullanıcının belirttiği çıkış saatine riayet etmeme olasılığı	0,243	0,061	2
		Bazı ihlal durumlarında yaptırım uygulanacak olması	0,131	0,033	4
		Yedek park alanlarının dolu olma olasılığı	0,186	0,047	3
		Kullanıcıların abonman üyelik şartlarını sağlayamama olasılığı	0,061	0,015	6
		Kullanıcının park alanını rezerve edip gelmemesi	0,274	0,069	1
Kullanıcının aracını yanlış park alanına park etmesi	0,106	0,027	5		

Tablo 4. Devamı
Table 4. Continue

SWOT grubu	Grup önceliği	SWOT faktörleri	Yerel faktör ağırlığı	Genel faktör ağırlığı	Önem sırası
3- Fırsatlar	0,25	Artan araç sayısına bağlı olarak gelişen otopark ihtiyacı	0,484	0,121	1
		Mevcut otopark işletme altyapısının yetersizliği	0,192	0,048	2
		Yüksek otopark ücretleri	0,183	0,046	3
		Park problemlerini çözmek amacıyla belediyelerin otoparklara yatırım yapma arzusu	0,142	0,036	4
4- Tehditler	0,25	Kullanıcıların kurallara riayet edemeyeceklerini düşünerek tercih etmemeleri	0,389	0,097	1
		Yenilikçi yaklaşımları kabul etme eğilimi zayıf olan sürücü profili	0,247	0,062	3
		Sistemin işletme yöntemini ya da performansını beğenmeme durumu	0,364	0,091	2

Güçlü yönler grubu faktörleri için yerel faktör ağırlıkları incelendiğinde %34,8 ile en büyük öneme sahip faktörün “otopark kapasitesinin daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlaması” olurken, en düşük öneme sahip faktörünün %4,1 ile “park yeri ararken harcanan yakıt miktarında azalma sağlaması” olduğu görülmüştür. Zayıf yönler grubu incelendiğinde %27,4 ile “kullanıcıların park alanını rezerve edip gelmemesi” faktörü en yüksek öneme sahip zayıf yön olarak görülürken, %6,1 ile “kullanıcıların abonman üyelik şartlarını sağlayamama olasılığı” en düşük öneme sahip faktör olarak belirlenmiştir. Fırsatlar grubu faktörlerinden “artan araç sayısına bağlı olarak gelişen otopark ihtiyacı” faktörü %48,4 ile en yüksek öneme sahip faktör iken %14,2 ile “park problemlerini çözmek amacıyla belediyelerin otoparklara yatırım yapma arzusu” faktörünün en düşük öneme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak tehditler grubu için sonuçlar incelendiğinde ise “kullanıcıların kurallara riayet edemeyeceklerini düşünerek tercih etmemeleri” faktörü %38,9 ile en önemli faktör olurken, “yenilikçi yaklaşımları kabul etme eğilimi zayıf olan sürücü profili” %24,7 ile en düşük faktör olarak belirlenmiştir. Bir bütün olarak değerlendirildiğinde ise genel faktör ağırlıklarına göre %12,1 ile tüm faktörler arasında en yüksek öneme sahip faktörün “artan araç sayısına bağlı olarak gelişen otopark ihtiyacı” olduğu sonucuna ulaşılmış ve otopark ihtiyacı ön plana çıkmıştır.

7. Sonuç ve öneriler

7. Conclusion and recommendations

Artan araç sayısı ve hızlı kentleşme ne yazık ki birçok problemi de beraberinde getirmektedir. Bu problemlerden özellikle trafik sıkışıklığı, uzun yolculuk süreleri, trafik karmaşası ve park problemleri ön plana çıkarlar arasında yer almaktadır. Özellikle, artan kentleşme ve araç sayısı kent merkezlerinde park yeri ihtiyacını oldukça ön plana çıkarmaktadır. Bu sorunu çözebilmek amacıyla toplu taşımanın özendirilmesi, kentsel mobilitate, bir servis olarak mobilitate, yeni otopark alanlarının inşası gibi çözüm yollarına gidilse de bu sorun ne yazık ki tam anlamıyla bir çözüme kavuşturulamamaktadır. Birçok şehirde mevcut otoparkların eski klasik işletme yöntemiyle işletilmesi mevcut kapasitelerinin çok altında hizmet vermelerine neden olan ana etkenlerden birisi olarak gösterilebilmektedir. Bu durumda, planlı ve karar vericiler yeni otoparklar inşa ederek mevcut bu sorunu çözme yoluna gitmektedirler. Yine bu otoparklarda klasik işletme prensiplerinin kullanılmaya devam edilmesi nedeniyle çok kısa sürede otopark kapasitesine ulaşılmakta ve bu durum doğal olarak sürekli ek maliyet getirebilmektedir.

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte otoparkların işletim performanslarını arttırarak mevcut kapasitelerini daha etkin kullanmak amacıyla akıllı otopark sistemleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu otoparklar, içerisinde nesnelere interneti, görüntü işleme, otomatik ödeme, mobil ödeme vb. birçok teknolojik altyapıyı kullanarak etkin işletim ile mevcut otopark kapasitelerinde önemli artışlar sağlamıştır. Bu otoparklar, her ne kadar dijital sistemleri kullansa da süre konusunda açık uçlu olduğu için yine de kapasite maksimum oranda kullanılamamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada otopark kullanım süresinin kullanıcı tarafından belirtilmek zorunda olduğu yeni bir akıllı otopark sistemi önerilmiştir. Bu sistemde otopark kullanım süresini belirten kullanıcılar süreye riayet ettiklerinde ücret olarak ödüllendirilirken, süreye

uymamaları durumunda daha fazla ücret ödeme ve otopark kullanım kısıtlaması ile karşı karşıya bırakılmaktadır. Böylece kullanıcılar otopark kullanım süresini önceden belirtmek zorunda kalarak süre kullanımında daha planlı ve titiz bir davranış sergileyebileceklerdir. Bu durum otopark kapasitesini anlık olarak planlayarak etkin bir işletim performansı sağlayabilecektir.

Çalışma kapsamında “Tek Araç Parkını Paylaşalım-TAPP” isimli bir uygulama ile tüm sürecin hem kullanıcı hem de operatör tarafından efektif şekilde yürütülmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda çalışma içerisinde tüm süreçler detaylı olarak anlatılarak hem açık hem de kapalı otoparklar için yeni bir otopark işletim sistemi tüm detayları ile birlikte önerilmiştir. Yine çalışma içerisinde önerilen yeni akıllı otopark sistemi beş kişilik bir uzman bir ekip tarafından değerlendirilmiştir. SWOT analizi ile ilgili faktörlerin belirlenmesinin ardından her bir faktörün AHP metodu kullanılarak ağırlıklandırılması bu uzman ekip tarafından yapılan ikili karşılaştırmalar ile elde edilmiştir. Uygulanan A’WOT analizi ile elde edilen sonuç, araç sayısının artmasıyla birlikte gelişen park yeri ihtiyacının önerilen akıllı otopark sistemi için yüksek oranda bir fırsat oluşturduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra, önerilen akıllı otopark sisteminin en yüksek öneme sahip zayıf yönü olarak belirlenen “kullanıcıların park alanını rezerve edip gelmemesi” faktörü ve sistemin yürütülmesinde en önemli tehdit olarak görülen “kullanıcıların kurallara riayet edemeyeceklerini düşünerek tercih etmemeleri” faktörü önerilen sistemin daha etkili bir şekilde işleyebilmesi adına öncelikli olarak ele alınması gereken konular olarak belirlenmiştir. Genel faktör ağırlıklarına göre tüm faktörler birlikte değerlendirildiğinde, artan araç sayısına bağlı oluşan otopark ihtiyacının en önemli faktör (maks. %12,1) olarak ön plana çıkması çalışmanın amacını desteklemektedir.

Önerilen yeni akıllı otopark sistemi ile birlikte mevcut otoparkların işletim performanslarının ve dolayısıyla mevcut kapasite kullanımlarının daha da artacağı öngörülmektedir. Böylece kullanıcılar önerilen uygulama ve işletim sistemi ile park yeri bulurken stres yaşamayacak, süre belirterek hem ücret konusunda ödüllendirilecekler hem de park sürelerini daha sınırlı tutma alışkanlığı edinebileceklerdir. Önerilen bu yeni sistemin ilgili yetkililer tarafından hayata geçirilmesi ile birlikte sürekli yeni otopark yapmak yerine ilk etapta mevcut olanların iyileştirilmesi yoluna gidilerek önemli bir maliyetten kurtulabileceklerdir. Diğer yandan önerilen bu yeni sistem ile kent merkezindeki otoparklar bir bütün olarak ve birbirleriyle entegre olarak çalışabileceklerdir. Bu durum sürücülerin park yeri aramak için kaybettiği zamanı azaltabilecek ve bunun yanı sıra harcanan yakıt miktarını, hava kirliliğini, park nedenli trafiğin akımın yavaşlatılarak yoğunluk oluşması gibi olumsuz sonuçları azaltabilecektir. Uygulama, öngörülen tüm bu katkıları nedeniyle şehirlerin akıllı ve yeşil şehir hedeflerine önemli katkılar sağlayabilecek ve böylece sürdürülebilir ulaşım planlamalarına önemli katkılar sunabilecektir.

Yazar katkısı

Author contribution

Ömer Öztürk: Makale formatının belirlenmesi, literatür taraması, simülasyon çalışmalarının yürütülmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi.

Ömür Akyazı: Makale formatının belirlenmesi, simülasyon çalışmalarına yön verilmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazımı,

Bora Çavdar: Makale formatının belirlenmesi, simülasyon çalışmalarına yön verilmesi, sonuçların yorumlanması, makalenin yazımı ve düzenlenmesi,

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.





Kaynaklar*References*

- Ahmed, S., Rahman, M. S., & Rahaman, M. S. (2019). *A blockchain-based architecture for integrated smart parking systems*. In 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom workshops) (pp. 177-182). <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2019.8730772>
- Alam, M., Moroni, D., Pieri, G., Tampucci, M., Gomes, M., Fonseca, J., & Leone, G. R. (2018). Real-time smart parking systems integration in distributed ITS for smart cities. *Journal of Advanced Transportation*, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2018/1485652>
- Badhouthiya, A., & Saxena, A. (2022). *SPS: A framework of smart parking system using IoT technology*. In 2022 6th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA) (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/ICCUBEA54992.2022.10011086>
- Canli, H., & Toklu, S. (2021). Deep learning-based mobile application design for smart parking. *IEEE Access*, 9, 61171-61183. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074887>
- Chaniotakis, E., & Pel, A. J. (2015). Drivers' parking location choice under uncertain parking availability and search times: A stated preference experiment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 82, 228-239. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.10.004>
- Gallo, M., Montella, B., & D'Acierno, L. (2011). The transit network design problem with elastic demand and internalisation of external costs: An application to rail frequency optimisation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1276-1305. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.008>
- Golias, J., Yannis, G., & Harvatis, M. (2002). Off-street parking choice sensitivity. *Transportation Planning and Technology*, 25(4), 333-348. <https://doi.org/10.1080/0308106022000019620>
- Hess, D. B. (2001). Effect of free parking on commuter mode choice: Evidence from travel diary data. *Transportation Research Record*, 1753(1), 35-42. <https://doi.org/10.3141/1753-05>
- Hilmani, A., Maizate, A., & Hassouni, L. (2018). Designing and managing a smart parking system using wireless sensor networks. *Journal of sensor and actuator networks*, 7(2), 1-20. <https://doi.org/10.3390/jsan7020024>
- Hosseini, M. H., Balal, E., Massahi, A., & Ghiasi, I. (2012). Developing optimal zones for urban parking spaces by Arc GIS and AHP. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(11), 3618-3622.
- Inci, E. (2015). A review of the economics of parking. *Economics of Transportation*, 4(1-2), 50-63. <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2014.11.001>
- Jambhulkar, P. D., & Thaware, S. R. (2022). Android application for smart parking system. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 4(4), 2638-2644.
- Kajanus, M., Kangas, J., & Kurttila, M. (2004). The use of value focused thinking and the A'WOT hybrid method in tourism management. *Tourism management*, 25(4), 499-506. [https://doi.org/10.1016/S0261-5177\(03\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0261-5177(03)00120-1)
- Kangas, J., Pesonen, M., Kurttila, M., & Kajanus, M. (2001). *A'WOT: integrating the AHP with SWOT analysis*. In Proceedings of the sixth International Symposium on the Analytic Hierarchy Process (ISAHP) (pp. 2-4).
- Kanteti, D., Srikar, D. V. S., & Ramesh, T. K. (2017). *Intelligent smart parking algorithm*. In 2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon) (pp. 1018-1022). <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon.2017.8358524>
- Klappenecker, A., Lee, H., & Welch, J. L. (2010). *Finding available parking spaces made easy*. In Proceedings of the 6th International Workshop on Foundations of Mobile Computing, (pp. 49-52). <https://doi.org/10.1145/1860684.1860696>
- Lee, S., Kim, D., Park, S., & Lee, W. (2021). A study on the strategic decision making used in the revitalization of fishing village tourism: using A'WOT analysis. *Sustainability*, 13(13), 7472. <https://doi.org/10.3390/su13137472>
- Levy, N., & Benenson, I. (2015). GIS-based method for assessing city parking patterns. *Journal of Transport Geography*, 46, 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.06.015>

- Litman, T. (2016). *Parking management: strategies, evaluation and planning* (2nd ed.). Canada: Victoria Transport Policy Institute.
- Loukaitou-Sideris, A., Liggett, R., & Sung, H. G. (2007). Death on the crosswalk: A study of pedestrian-automobile collisions in Los Angeles. *Journal of Planning Education and Research*, 26(3), 338-351. <https://doi.org/10.1177/0739456X06297008>
- Neha, Y., Saritha, V., Samyuktha, N., Gayathri, B., & Charith, A. (2022). *Smart parking system using object detection*. Proceedings of the 2nd Indian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, (pp.148-154).
- Pandit, S. N., Akash, R., & Moharir, M. (2019). *Cloud based smart parking system for smart cities*. In 2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT) (pp. 354-359). <https://doi.org/10.1109/ICSSIT46314.2019.8987592>
- Ruili, J., Haocong, W., Han, W., O'Connell, E., & McGrath, S. (2018). *Smart parking system using image processing and artificial intelligence*. In 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST) (pp. 232-235). <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2018.8603590>
- Runge, J. W., & Cole, T. B. (2002). Crosswalk markings and motor vehicle collisions involving older pedestrians. *JAMA*, 288(17), 2172-2174. <https://doi.org/10.1001/jama.288.17.2172>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Safi, Q. G. K., Luo, S., Pan, L., Liu, W., Hussain, R., & Bouk, S. H. (2018). SVPS: Cloud-based smart vehicle parking system over ubiquitous VANETs. *Computer Networks*, 138, 18-30.
- Saharan, S., Kumar, N., & Bawa, S. (2023). DyPARK: A dynamic pricing and allocation scheme for smart on-street parking system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3230851>.
- Sakurada, L., Barbosa, J., Leitão, P., Alves, G., Borges, A. P., & Botelho, P. (2019). *Development of agent-based cps for smart parking systems*. In 2019 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (IECON) (pp. 2964-2969). <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926653>
- Shaikh, F. I., Jadhav, P. N., Bandarkar, S. P., Kulkarni, O. P., & Shardoor, N. B. (2016). Smart parking system based on embedded system and sensor network. *International Journal of Computer Applications*, 140(12), 45-51.
- Shao, C., Yang, H., Zhang, Y., & Ke, J. (2016). A simple reservation and allocation model of shared parking lots. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.08.010>
- Shoup, D. C. (2006). Cruising for parking. *Transport policy*, 13(6), 479-486. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.05.005>
- Thomas, D., & Kovoov, B. C. (2018). A genetic algorithm approach to autonomous smart vehicle parking system. *Procedia Computer Science*, 125, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.011>
- Turki, M., Dammak, B., & Mars, R. (2022). *A Private Smart parking solution based on Blockchain and AI*. In 2022 15th International Conference on Security of Information and Networks (SIN) (pp. 1-7). <https://doi.org/10.1109/SIN56466.2022.9970548>
- Vakula, D., & Kolli, Y. K. (2017). *Low-cost smart parking system for smart cities*. In 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS) (pp. 280-284). <https://doi.org/10.1109/ISS1.2017.8389415>
- Vera-Gómez, J. A., Quesada-Arencibia, A., García, C. R., Suárez Moreno, R., & Guerra Hernández, F. (2016). An intelligent parking management system for urban areas. *Sensors*, 16(6), 931. <https://doi.org/10.3390/s16060931>
- Willson, R. W., & Shoup, D. C. (1990). Parking subsidies and travel choices: Assessing the evidence. *Transportation*, 17, 141-157. <https://doi.org/10.1007/BF02125333>

Lif takviyeli beton yol kaplamalarının dinamik yük altındaki yorulma davranışının incelenmesi

Investigation of fatigue behavior of fiber reinforced concrete pavements under dynamic load

Cumhur KANBAK*^{1,a} , Sedat ÖZCANAN^{2,b}  Muhammet Vefa AKPINAR^{3,c}  Ali Osman ATAHAN^{1,d} 

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34485, Maslak/İstanbul*

²*Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 73000, Şırnak*

³*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon*

• Geliş tarihi / Received: 07.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

Öz

Tam derzli beton yollarda derzlerden süzülen yağmur suları veya drenaj sularından kaynaklı kaplama altındaki hydropumping sonucu temel tabakasında yumuşama ve sonrasında ince tanelerin yüzeye çıkması sonrası boşluklar oluşmaktadır. Temel tabakasında meydana gelen boşalmalar sonucunda, araçların tekrarlı geçişleri esnasında derz bölgelerinde kısa zamanda oluşan çatlaklar beton kaplamanın hizmet ömrünü kısaltabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, beton yollarda meydana gelen bu bozulmalara çözüm olarak piyasada son yıllarda beton sektöründe rağbet gören lif katkılı betonun performansı araştırılmıştır. Bu amaçla lif katkılı ve yalın beton ile hazırlanan plakalar, kaplama altında meydana gelen boşalma baz alınarak tekrarlı yüklemeler altındaki davranışı dinamik yüklemeler ile deneysel olarak incelenmiştir. Liflerin betonda oluşan çatlamlara etkisi, göçme bölgesinde taşıdığı yük miktarı, deplasman performansı gibi parametreler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında lif katkılı betonun yalın betona göre derz bölgesindeki çatlaklara karşı daha mukavemetli olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Beton yol, Dinamik analiz, Lif katkı, Yorulma davranışı

Abstract

In full-joint concrete roads, as a result of hydropumping under the pavement caused by rain water or drainage water filtered from the joints, cavities are formed after softening in the foundation layer and then the emergence of fine grains to the surface. As a result of the discharges in the foundation layer, cracks that occur in the joint areas during the repeated passage of vehicles can shorten the service life of the concrete pavement. Within the scope of this study, the performance of fiber-added concrete, which has been in demand in the concrete sector in recent years, has been investigated as a solution to these deteriorations in concrete roads. For this purpose, the behavior of plates prepared with fiber-reinforced and plain concrete under cyclic loading was investigated experimentally with dynamic loading, based on the discharge occurring under the pavement. Parameters such as the effect of fibers on cracking in concrete, the amount of load carried in the collapse zone, and displacement performance were investigated. In the light of the results obtained, it has been determined that fiber reinforced concrete is more resistant to cracks in the joint area than plain concrete.

Keywords: Concrete pavement, Dynamic analysis, Fiber additive, Fatigue behavior

*a Cumhur KANBAK; ckanbak28@gmail.com

1. Giriş

1.1. Introduction

Lif takviyeli beton (LTB), performansını artırmak için beton karışımına eklenen çelik veya sentetik lifler gibi ayrı lifler içeren bir beton türüdür. Kaplama söz konusu olduğunda, betonun çatlamaya karşı direncini artırmak ve daha iyi dayanıklılık sağlamak için LTB kullanılır. LTB kaplamanın, gelişmiş yorulma direnci, gelişmiş çatlak direnci ve artan dayanıklılık gibi geleneksel beton kaplamaya göre birçok avantajı olduğu gösterilmiştir. Beton karışımında liflerin kullanılması, betonun işlenebilirliğini de geliştirerek yerleştirmeyi ve sonlandırmayı kolaylaştırır. Çelik lifler, sentetik lifler ve doğal lifler dâhil olmak üzere LTB kaplamada kullanılacak bir dizi farklı lif türü vardır. Her tür lifin kendine özgü özellikleri vardır ve betona farklı faydalar sağlayabilir.

Beton yollarda liflerin/fiber kullanımıyla ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. [Karakurt ve Arslan'ın \(2017\)](#) çeşitli fiberlerle takviye edilmiş betonun geleneksel betona karşı performansını araştırdıkları çalışmalarında, rijit kaplamaların servis ömrü boyunca oluşabilecek dış etkilere karşı fiberlerin dayanımı arttırdığı, polimer elyaf lifler ile betonun aşınma direnci ve mekanik davranışı üzerinde önemli iyileştirmeler tespit edildiğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte fiber kullanımının betonda topaklaşmaya neden olduğu, bu tip problemlerin çözümü ve fiberlerin betonun mekanik-durabilite özelliklerine olumlu katkısı için yeni nesil akışkanlaştırıcıların kullanılmasının zorunlu olduğu belirtilmiştir ([Alterra vd., 2021](#)). [Khan vd., \(2020\)](#) fiber takviyeli beton yol performansı için yaptığı çalışmada, fiber takviyenin beton yol mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve beton yol kalınlığını düşürdüğünü belirtmiştir. Yapılan bir diğer çalışmada, fiber takviyeli betonun daha yüksek çatlak performansı ve aşınma direnci gösterdiği vurgulanmıştır. Bununla birlikte üstyapı maliyetlerinde düşüş ve daha düşük karbon salınımı avantajları sağlamaktadır ([Öztürk & Özyurt, 2022](#)). Özellikle betonun çevresel etkilerini ve kaplama kalınlığını azaltmak, eğilme kapasitesi, çatlak ve yorulma direncini artırmak için ayrı liflerin kullanımı önerilmiştir ([Altoubat vd., 2008](#); [LaHucik vd., 2017](#); [Crick, 2020](#)). Kullanılan fiber malzemesinin türü ve miktarı beton performansını etkileyen faktörlerdir ([Ferrara vd., 2007](#); [Rooholamini vd., 2018](#)). Betonda farklı lif/fiber kullanımı betondaki bozulmalara karşı dayanımı arttırarak, bozulmaları geciktirmektedir ([Shakir vd., 2021](#)).

Derz kesilmiş donatılı ya da donatısız beton yollarda derzlerden süzülen yağmur suları veya drenaj suları kaplamanın altına geçmektedir. Kaplama altına geçen su temelde zemin boşalmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda, araçların tekrarlı geçişleri esnasında derz bölgelerinden 20-30-50 cm mesafede zamanla çatlaklar oluşmaktadır. Bu problemin çözümü için bu çalışmada, yalın, lif katkılı ve çelik hasırlı beton ve zeminin boşalma mesafelerindeki değişikliklere göre, tekrarlı yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. Liflerin bu çatlamalara etkisi, katkısı ve göçme bölgesinde taşıdığı yük miktarı gibi parametreler incelenmiş, deneysel olarak tatbik edilmiştir. Bu çalışmanın beton üreticileri, lif üreten fabrikalar, belediyeler ve karayollarına katkı sunması beklenmektedir.

2. Materyal ve metod

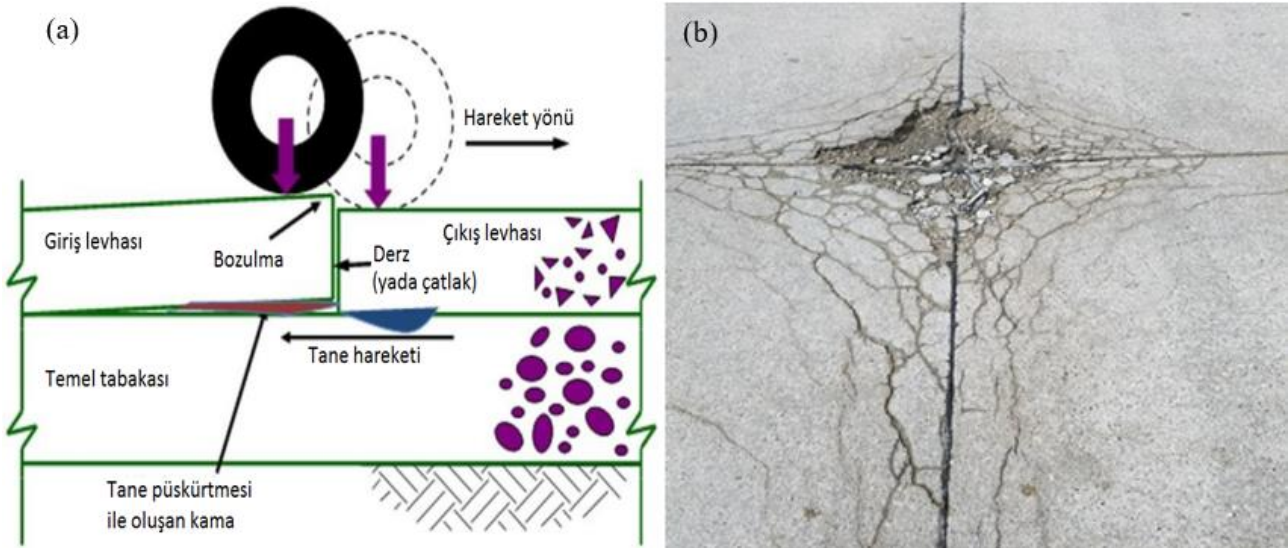
2.1. Material and method

2.1.1. Problemin tanımı

2.1.1.1. Description of the problem

Derzli beton yollarda, zamanla yağmur sularının, derzlerden girip derzin alt zeminine nüfuz edip, araç geçişleri ile yola gelen yükün, araç geçişinden sonra boşalması sonucu bir pompalama işlemi başlatır, bu pompalama işlemi ile birlikte alt zeminde bulunan düzensiz malzemeleri su ile dışarı atmaya başlar ve zamanla alt zemin boşalmaya başlar. Alt zeminin boşalması sonrasında araçların geçişi esnasında beton yolda deformasyonlar meydana gelir buna suyla pompalama (hydropomping) denir. Şekil 1'de suyla pompalama (hydropomping) mekanizması görülebilir.

Bu çalışmada yukarıda tanımlanan problemin çözümü araştırılmıştır. Araştırmada, derz altında bulunan alt zeminde meydana gelen zemin boşalması sonucunda, araçların tekrarlı geçişleri esnasında derz bölgelerinden 20-30-50 cm mesafelerde zamanla oluşan çatlakların, lif katkılı betonlarda, çelik hasırlı betonlarda, yalın betonlarda ve zeminin boşalma mesafelerindeki değişikliklere göre, tekrarlı yükler altındaki davranış dinamik yüklemeler ile incelenmiştir.



Şekil 1. (a) Suyla pompalama (hydropomping) mekanizması (Harrington vd., 2018) (b) Suyla pompalama sonucu derz bölgelerinde temel destek kaybı ve oluşan çatlaklar.

Figure 1. (a) Hydropomping mechanism (Harrington et al. 2018) (b) Loss of foundation support and cracks in joint areas as a result of hydropomping.

2.2. Deney düzeneği

2.2. The experimental setup

İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı deprem laboratuvarında bulunan yorulma çerçevesinde plaklar yorulmaya maruz bırakılacaktır. Şekil 2’de deneyde kullanılacak yorulma mekanizması verilmiştir.



Şekil 2. Yorulma çerçevesi.

Figure 2. Fatigue framework

Yorulma çerçevesi özellikleri;

- 2 adet hidrolik yük veren kolları olan
- 500 KN yükleme yapılabilen
- +-125 mm yerdeğiştirme imkanı veren
- Saniyede 8-10 devir yükleme yapılabilen özelliklerde olan bir çerçevedir.

Şekil 3’te yorulma çerçevesi boyutları görülmektedir.



Şekil 3. Yorulma çerçevesi boyutları.
Figure 3. Fatigue frame dimensions.

2.3. Beton içinde kullanılacak lif çeşitleri

2.3. Types of fibers to be used in concrete

Lif çeşidi olarak Kordsa A.Ş. tarafından üretilen kratos marka makro lif çeşidi seçilmiştir. Kullanılan malzeme ile ilgili olarak; KraTos Yapısal Makro Sentetik Fiber Donatıları (Kordsa, t.y.); yüksek performanslı polipropilen hammaddeden üretilerek EN 14889-2 Sınıf 2 ve ASTM C 1116 standartlarına uygun hale getirilmiştir. Betonun yüzeydeki çatlama ve yük altında meydana gelen strüktürel çatlaklara karşı etkili bir çözüm sunan KraTos Makro, beton içinde 3 boyutlu(3D) homojen dağılımlı fiber tasarımı, servis ve tasarım yükleri altında betonun taşıma kapasitesini artırarak, her noktada etkin çatlak kontrolü sağlamaktadır. Çok geniş bir uygulama alanı olan malzeme, şap betonları, endüstriyel saha betonları, liman ve pist betonları, özellikli ray altı betonları, püskürtme ve tünel kaplama betonları ile prekast yapı elemanlarında kullanılabilir. Ayrıca malzeme CE belgeli ve yerli bir firma tarafından %100 yerli üretim teknolojisi üretilmektedir. Kolay karıştırılabilme ve hızlı uygulanabilme avantajlarıyla birlikte yüksek dayanım özellikleri, inşaat sektöründe birçok alanda kullanılabilen KraTos Makro'nun yukarıda bahsedilen avantajlarıyla birlikte bu çalışmada tercih edilmesindeki önemli faktördür. KraTos lif karakteristik özellikleri ve çalışma prensibi Şekil 4'te verilmiştir.

KraTos Makro	Karakteristik özellikler
Fiber sınıfı	EN 14889-2 Sınıf II
Ham madde	Polipropilen
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	0,91
Uzunluk (mm)	54
Çap (mm)	0,70
Çekme gerilmesi (MPa)	550
Erime sıcaklığı oC	160
Alkali direnci	Çok iyi
Korozyon direnci	Çok iyi
Fiber adedi/kg	50.000

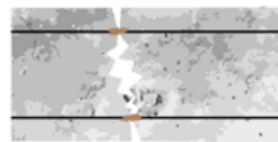
KraTos Makro'nun çalışma prensibi



KraTos Makro

*3D homojen dağılım özelliği ile betonda her noktada etkin çatlak köprüleme performansı

*Elektrik iletkenliği yoktur ve korozyona uğramaz. Uzun dönem durabilite sağlar.



Çelik Hasır

Şekil 4. KraTos lif karakteristik özellikleri ve çalışma prensibi (Kordsa, t.y.).
Figure 4. KraTos fiber characteristics and working principle (Kordsa, t.y.).

Lif katkılı beton karışım oranı; proje gereksinimlerine göre değişen optimum KraTos Makro dozajı genellikle 2 - 10 kg/m³ aralığındadır. Bu çalışmada deneyler için tek dozaj uygulanmıştır. Bu dozaj KraTos makro fiberlerin daha önceki uygulamalarından elde ettiği en optimum değerlerden biri olan 4.5 kg/m³ kullanım değeridir.

2.4. Deneyde kullanılacak plakların hazırlanması

2.4. Preparation of the plates to be used in the experiment

Deneylerde kullanılan beton, Betonsa tarafından İstanbul Kâğıthane şantiyesinde C25 sınıfı olarak üretilmiş olup, deneylerde kullanılacak plaklar, şantiye sahasında dökülmüştür. Yol betonu modellemek amacıyla, derz mesafeni belli edebilmek adına 2m*2m*0,20 cm boyutlarında 15 adet plak numune hazırlanmıştır. Deneyde kullanmayı planladığımız 15 adet plaklarımız, arazi şartlarını yansıtmaması sebebiyle Betonsa santrali arazisinde hazırlanmıştır. Deney plakalarının beton dökümleri ve kütleme işlemleri ile ilgili resimler Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Deney plaklarının beton dökümleri ve kütleme işlemleri. (a) Beton dökümü (b)-(c) Kalıplar ve plakalar (d) Kütleme işlemi (e) Küp numuneler (f) Kiriş numuneler.

Figure 5. Concrete casting and curing processes of test plates. (a) Concrete casting (b)-(c) Concrete forms and slabs (d) Curing process (e) Cube samples (f) Beam samples.

Aşağıda kullanılan farklı takviye malzemeleri ve birleşimler için plakalar hazırlanmıştır. Farklı birleşimler aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir.

- P1 Plakası yalın beton dökülmüş olup içinde hiçbir katkı malzemesi kullanılmamıştır.
- P2 Plakası m³ ünde 4.5 kg makro fiber kullanılarak dökülmüştür.
- Her plak numunesi için 3 er adet küp numunesi dökülmüştür.
- Her fiber katkılı plak numunesi için 3 er adet kiriş numunesi dökülmüştür.
- Plaklar kür işlemi için naylon ile kapatılıp, numunelerle birlikte şantiye ortamında bekletilmektedir.
- Deneyde kullanılan beton değeri olarak C25 seçilmiştir. Beton agregasında kullanılan agrega kalınlığı 2 cm mertebesinde.
- Deneyde kullanılacak temel malzemesi yerine Winkler yöntemiyle zemin katsayısı hesaplanıp, aynı değere tekabül edecek kalınlıkta kauçuk kullanılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Bu çalışmamızda, fiber lif katkılı beton ve yalın betonun dinamik yükler altında yorulma davranışının incelenmiştir. Beton yollarda sıklıkla derz kesimi sonucunda, çevresel ve yağmur sularının derzlerden içeri girip, alt zemini boşaltması sonucu meydana gelen hydropomping mekanizması deneyimizde modellenmiştir. Alt zemin boşluğu sahada yayın olarak karşılaşılan 20 cm değeri alınmıştır. Malzeme olarak yalın beton ve 4,5 kg lif değişkenleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzeme ve numune matrisi Tablo 1’de verilmiştir. Araç geçişini temsilen, yapılacak dinamik yükleme ile fiber lif katkılı betonun yalın betona karşı avantajı araştırılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan malzeme ve numune matrisi

Table 1. Material and sample matrix used in the study

Malzeme tipi	Alt zemin boşluğu(cm)	Numune tipi
Yalın beton numune	20	P1
4,5 kg lif katkılı numune	20	P2

Deney düzeneği ve ölçüm mekanizması Şekil 6’da verilmiştir. Deneyde kullanılan plaklar derzli beton yolların bir parçası olarak ele alındığı için, beton plaklar kenarlardan serbest bırakılarak herhangi bir mesnetleme işlemi yapılmamıştır. Temel zemini temsil için FLOORMATE 200 SL-T 120 (60 + 60) tipi 2 kat 6 cm kalınlığında strafor kullanılmıştır. Deney sonrası numunelerde meydana gelecek yer değiştirmeler, çatlaklar ve kırılmaların tespiti amacıyla plakalar beyaza boyanıp karolajlanması yapılmıştır. Beton yola gelecek tekerlek yüklerini temsilen plağın derz kısmına yakın ve boşluk bırakılan bölümün üzerinde hidrolik yükleme kolu ile kamyon dingil yükü olan 2,5 ton yükleme saniyede 5 Hz yükleme ile 1 milyon kez yüklenecek şekilde sistem ayarlanarak deneylere başlanılmıştır.



Şekil 6. Deney düzeneği ve ölçüm mekanizması

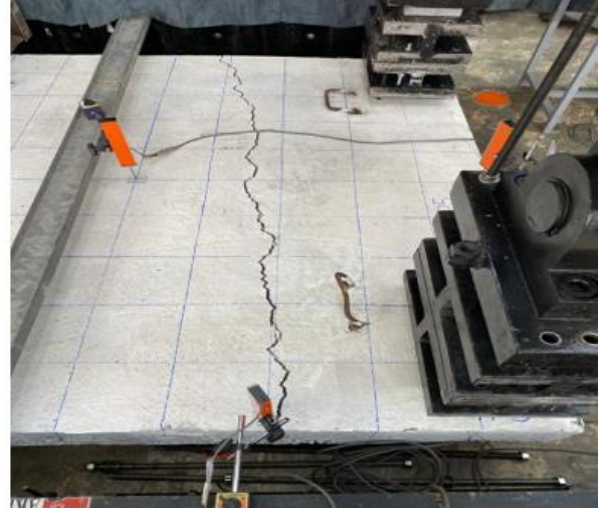
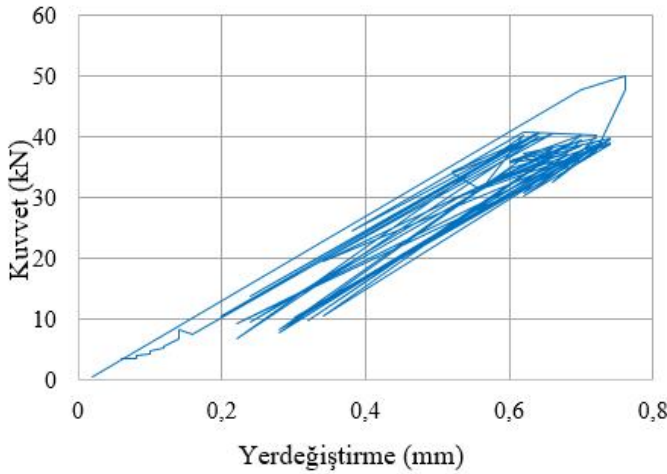
Figure 6. Experimental setup and measuring mechanism.

Yapılan deneylerde, dinamik ve statik yükleme sonucunda meydana gelen kırılma ve deplasman değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilmiş örnek bir kuvvet-yer değiştirme grafiği ile çatlaklı beton numunesi Şekil 7’de verilmiştir.

Tablo 2. Deney sonuçları

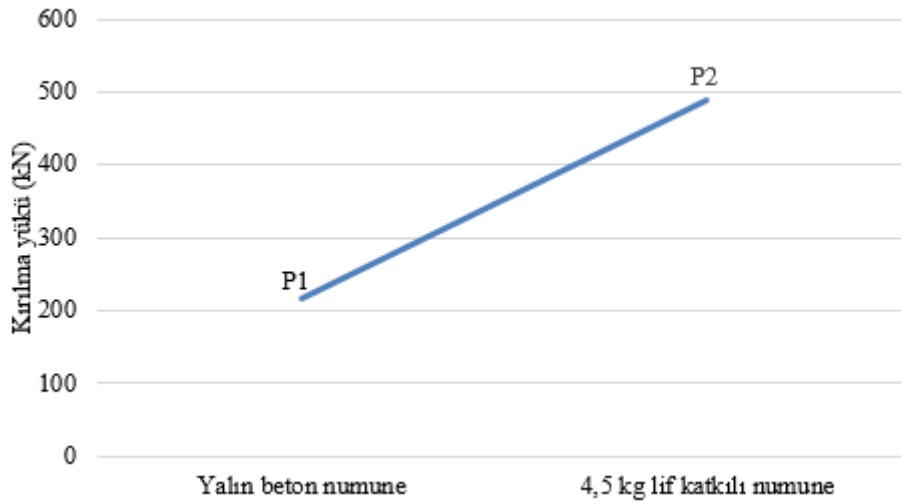
Table 2. Experiment results

Alt zemin boşluğu(cm)	Numune tipi	Numune	Kırılma yükü (kN)	Max. Yer değiştirme (mm)
20	Yalın beton numune	P1	216,65	2,38
	4,5 kg lif katkılı numur	P2	489,96	3,22



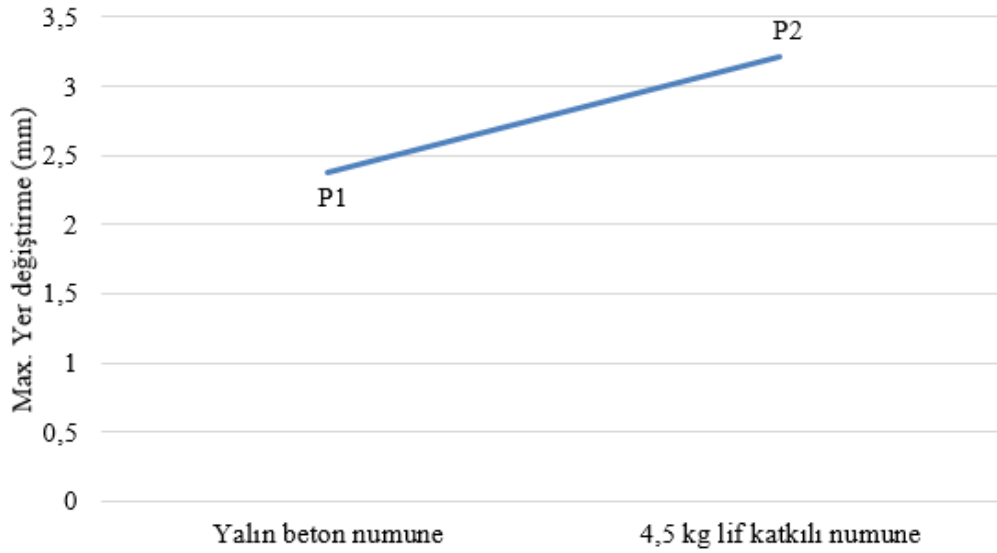
Şekil 7. Deney sonucunda elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme grafiği ve çatlamış beton numunesi.
Figure 7. Force-displacement graph and cracked concrete sample obtained as a result of the experiment.

Tablo 2’den görüldüğü üzere 20 cm boşluk durumunda, en yüksek kırılma yükü 4,5 kg lif katkılı beton (P2) numunesinde olduğu görülmüştür. Yine en büyük deplasman (sünme performansı) P2 numunesinde meydana gelmiştir. 4,5 kg lif katkılı beton numunelerin performansına bakıldığında yalın beton numunelere göre hem kırılma direnci hemde süneklik anlamında daha iyi performans göstermiştir. Şekil 8’de görüldüğü üzere lifli betonun (P2) kırılma direnci yalın betonun kırılma direncinin 2 katından fazladır. Şekil 9’de ise P2 numunesinin lif takviyesi ile deplasman kabiliyetinin arttığı görülmüştür. Plakalarda meydana gelen deplasmanlar sonucunda yalın beton numunelerinde çatlaklar ve deformasyonlar oluşurken, lif katkılı beton daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 8. Numunelere göre kırılma yükü grafiği.
Figure 8. Fracture load graph according to samples.

Genel olarak elde edilen sonuçlardan, yalın betona nazaran lif takviye ile betonun çatlama karşı direnci önemli derecede artmaktadır. Bununla birlikte lif katkılı betonun, yalın betona göre taşıma/kırılma ve eğilme kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca betonda kullanılan fiber liflerin daha yüksek süneklikleri normal betonlara kıyasla en belirgin avantajlarıdır.



şekil 9. Numunelere göre en büyük yer değiştirme grafiği.

Figure 9. Maximum displacement graph according to samples

Genel olarak elde edilen sonuçlardan, yalın betona nazaran lif takviye ile betonun çatlamaya karşı direnci önemli derecede artmaktadır. Bununla birlikte lif katkılı betonun, yalın betona göre taşıma/kırılma ve eğilme kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca betonda kullanılan fiber liflerin daha yüksek süneklikleri normal betonlara kıyasla en belirgin avantajlarıdır.

4. Tartışma

4. Discussion

Bu çalışmada elde edilen genel sonuçların literatür ile karşılaştırılması Tablo 3'te verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere genel olarak yapılan karşılaştırmada, elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar literatürdeki çalışmalardan da elde edildiği görülmektedir. Fiber kullanımının oluşturduğu dezavantajlar, zararlar veya farklı fiber tiplerinin avantaj dezavantajları bu çalışmada araştırılmadığından literatürdeki bu detaylar burada tartışılmamıştır.

Tablo 3. Genel sonuçların literatür ile karşılaştırması

Table 3. Comparison of overall results with literature

Performans tipi	Elde edilen genel sonuçlar	Karşılaştırmalı analiz
Lif takviyeli beton	<ul style="list-style-type: none"> Lifli betonun çatlamaya karşı direnci önemli derecede artmaktadır. Lif katkılı betonun, yalın betona göre taşıma/kırılma ve eğilme kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca betonda kullanılan fiber liflerin en belirgin avantajı normal betonlara kıyasla daha yüksek sünekliğe sahip olmalarıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> Betona lif eklenmesinin temel amacı çatlak oluşumunu engellemektir. Yapılan çalışmalarda çatlak mekanizmasında iyileşmelerin yanında betonun dinamik-statik yükleme özelliklerinde ve çeşitli yük uygulamalarında performansının geliştiği görülmüştür (Patel & Kulkarni, 2013). Beton yollarda daha çok eğilmeden ve çekme gerilmelerinden kaynaklı kırılmaları oluşmaktadır (Yuvaraj & Irshad, 2015). Bu anlamda fiber kullanımı çatlaklara karşı beton performansını arttırmaktadır. Fiber takviyeli beton taşıma kabiliyetinin artmasından kaynaklı kaplama kalınlığında ve bakım maliyetlerinde önemli ölçüde azalmalar olmaktadır (Achilleos vd., 2011; Jamwal & Singh, 2018). Fiber takviyeli betonun yalın betona karşı sünekliğinin arttığı tespit edilmiştir (Eswari vd., 2008).

5. Sonuçlar

5. Conclusions

Derzli donatılı ve donatısız beton yollarda derz aralıklarından süzülen yağmur suları ile drenaj suları kaplama altına geçmektedir. Kaplama altına geçen sular trafiğin oluşturduğu tekrarlı yükler ve basınçtan dolayı zamanla boşluklara neden olmaktadır. Kaplama altında oluşan boşluklar, kaplamada destek kaybına neden olmakta ve buda zamanla derz bölgelerinde çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Bu çalışmada, çatlaklara çözüm olarak lif katkılı betonun performansı araştırılmıştır. Bu amaçla lif katkılı beton ve yalın beton karşılaştırılmıştır. Malzeme ve boşluk değişkenlerine göre hazırlanan plakların, deneysel olarak tekrarlı dinamik yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. Deneylelerden elde edilen, beton içindeki liflerin çatlamlara etkisi, boşluk bölgesinde taşıdığı yük miktarı ve deplasman değerleri gibi veriler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Fiber lif katkılı betonlar, yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollar için büyük önem taşırlar çünkü kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı yüksek bir beton elde etmeyi sağlarlar. Ayrıca, daha uzun bağlantı mesafelerinin yol yapımında uygulanmasına olanak tanırırlar.
- Lif oranı ve tipi beton performansını etkileyen parametrelerdendir.
- Derzli beton yollarda donatılarda zamanla korozyon oluşumu taşıma kapasitesini düşürecektir. Bu anlamda lif katkılı betonların kullanımının daha uyum olacağı sonucuna varılmıştır.
- Elde edilen bu sonuçlardan özellikle hydropomping mekanizması sonrasında, beton yollarda meydana gelen derz boşalmasından kaynaklı beton yolun bozulmalarının engellenmesi ve sürüş konforunun devamı için, beton yollarda muhakkak donatı yada lif katkılarının kullanılması gerekmektedir.
- Yaptığımız deneylerdeki modeller göstermiştir ki, hydropomping mekanizmasında beton yolun alt zemini ne kadar çok bozulur ve boşalırsa, yolun bozulması buna bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla buda sürüş konforunun bozulmasına hatta sürüş güvenliği açısından tehlike oluşmasına neden olmaktadır. Lifli beton kullanılması yalın betona göre kırılma dayanımı ve deplasman kapasiteni arttırmak suretiyle üstyapı ömrünü uzatır. Buda hem sürüş konforu, hem yol güvenliği, hemde maliyet açısından avantaj sağlayacaktır.
- Lifli beton kullanılması üstyapı ömrünü uzatacağından bakım-onarım maliyetlerini düşürecektir.

Teşekkür

Acknowledgement

Verdiği destek ve katkılarından dolayı KORDSA'ya (<https://www.kordsa.com/tr/>) teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Cumhur Kanbak: Araştırma, deneysel çalışma, saha çalışması, verilerin elde edilmesi.

Sedat Özcanan: Araştırma, doğrulama, orijinal taslak yazımı, inceleme ve düzenleme.

Muhammet Vefa Akpınar: İnceleme ve düzenleme, denetim/gözlem/tavsiye.

Ali Osman Atahan: İnceleme ve düzenleme, denetim/gözlem/tavsiye.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Achilleos, C., Hadjimitsis, D., Neocleous, K., Pilakoutas, K., Neophytou, P.O. & Kallis, S. (2011). Proportioning of steel fibre reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact environment and cost. *Sustainability* 3(7) 965-983. <https://doi.org/10.3390/su3070965>
- Alter, A.Z., Bayraktar, O.Y., Bodur, B. & Kaplan, G. (2021). Investigation of the usage areas of different fiber reinforced concrete. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 7(1), 7-18. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/kastamonujes/issue/63105/910273>
- Altoubat, S.A., Roesler, J.R., Lange, D.A. & Rieder, K.A. (2008). Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. *Construction and Building Materials*, 22(3), 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.008>
- Crick, C. (2020). Crack creep and joint performance behavior of fiber reinforced concrete. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, <https://hdl.handle.net/11299/213074>.
- Eswari S., Raghunath, P.N. & Suguna K. (2008). Ductility performance of hybrid fibre reinforced concrete. *American Journal of Applied Sciences* 5(9),1257–1262. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.1257.1262>
- Ferrara, L., Park, Y.D. & Shah, S.P. (2007). A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 957–971. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.014>
- Harrington vd. (2018). Guide for concrete pavement distress assessments and solutions: Identification, causes, prevention, and repair. National Concrete Pavement Technology Center Iowa State University. 2711 South Loop Drive, Suite 4700 Ames, IA 50010-8664, USA.
- Jamwal, V. & Singh, P. (2018). Use of glass fiber in pavement quality concrete slab. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 4(2), 1949–54.
- Karakurt, C. & Arslan, A. T. (2017). Properties of concrete pavements produced with different type of fibers. *Journal of the Turkish Chemical Society Section B: Chemical Engineering*, Özel Sayı 2, 17-24. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/jotcsb/issue/32201/369583>
- Khan, M., Rehman, A. & Ali, M. (2020). Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road. *Construction and Building Materials* 244(2020), 118382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118382>
- Kordsa. (t.y.). <https://www.kordsa.com/tr/urunler/detay/insaat-guclendirme/287/367/0>
- LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J. & Amirhanian, A.N. (2017). Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 135, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212>.
- Öztürk, O. & Özyurt, N. (2022). Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 363(2022), 132582. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132582>
- Patel, M.J. & Kulkarni, S.M. (2013). Effect of polypropylene fibre on the high strength concrete. *Journal of Information, Knowledge and Research in Civil Engineering*, 2(2), 125-129.
- Rooholamini, H., Hassani, A. & Aliha, M.R.M. (2018). Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 159, 517–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002>
- Shakir, H. M., Al-Tameemi, A. F. & Al-Azzawi, A. A. (2021). A review on hybrid fiber reinforced concrete pavements technology. *Journal of Physics: Conference Series* 1895(2021), 012053. doi:10.1088/1742-6596/1895/1/012053
- Yuvaraj, B. & Irshad, M. (2015). Effect of dynamic load on rigid pavement. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(03), 287–90. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS030387>

Farklı geometrik boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile serbest titreşim analizi

Free vibration analysis of curved castellated beams with different geometric web openings by the finite element method

Duygu ERTÜRKMEN *¹ , Ahmad Reshad NOORI² 

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 33343, Mersin

²İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34310, İstanbul

• Geliş tarihi / Received: 08.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 11.09.2023

Öz

Gövdesinde boşluk bulunan eğri eksenli petek kirişler, daha az çelik malzeme ile daha yüksek mukavemet sağlamaları, dolayısı ile tasarımcıya daha ekonomik bir çözüm yolu sunmaları bakımından tercih edilmektedir. Günümüzde havaalanları, stadyumlar vb. yapı türlerinde sıklıkla rastlayabileceğimiz eğri eksenli petek kirişlerde, farklı geometrik şekillerde boşluk tipleri kullanılabilir. Yapılan çalışmada, gövdesinde farklı geometrik boşluklar bulunan eğri eksenli petek kirişlerin düzlem içi serbest titreşimi üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Gövde boşluk geometrisinin petek kirişlerin serbest titreşim analizi yardımı ile genlik ve frekans değerlerine etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan modal analizlerde, daire, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere 4 farklı türde gövde boşluk tipi dikkate alınmıştır. Modellemelerde IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri tercih edilmiş olup 10 düğümlü tetrahedral tipi sonlu eleman modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan malzeme, lineer homojen izotropik bir malzeme olup, çeliğin mekaniksel özellikleri dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan profillerin uç mesnetlenme koşulları, ankastre - ankastre, ankastre - sabit ve ankastre - serbest olarak planlanmış ve söz konusu profillerin her biri bu üç sınır koşulu dikkate alınarak serbest titreşim analizine tabi tutulmuştur. Analizlerden elde edilen sonuçlar IPE220, IPE240 ve IPE300 profillerinden oluşan daire, kare, beşgen ve altıgen boşluklu eğri eksenli petek kirişler için detaylı bir şekilde sunulmuştur. Yapılan tahkikler gövde boşluk tipinin, boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin serbest titreşim davranışı üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Doğal titreşim frekansları, Eğri eksenli kirişler, Petek kiriş, Serbest titreşim analizi, Sonlu elemanlar yöntemi

Abstract

Curved castellated beams with web openings are preferred because they provide higher strength with less steel material, and therefore offer a more economical solution to the designer. Different geometric shapes of the web opening types can be used in the curved castellated beams which can often be seen in airports, stadiums, etc nowadays. This study investigates the in-plane free vibration behavior of curved castellated beams with different geometric web openings using the three-dimensional finite element method. The effect of the web-opening geometrical shapes on the amplitude and natural frequency values of the curved castellated beams is investigated in detail via free vibration analysis. In the modal analysis done for this purpose, 4 different types of web opening types circle, square, pentagon and hexagon are taken into consideration. IPE 220, IPE 240, and IPE300 profiles are preferred in the modeling, and analysis are carried out using a 10-node tetrahedral finite element model. The material used in this study is a linear homogeneous isotropic material, and the mechanical properties of the steel are considered. The end support conditions of the profiles considered within the scope of the study are planned as fixed - fixed, fixed - pinned, and fixed - free supported. Each of the aforementioned profiles is subjected to free vibration analysis considering these three boundary conditions. The results obtained from the analysis are presented in detail for curved castellated beams with circular, square, pentagonal, and hexagonal web openings consisting of IPE 220, IPE 240, and IPE300 profiles. The investigations show that the web opening type has a significant effect on the free vibration behavior of curved castellated beams.

Keywords: Natural frequency, Curved beams, Castellated beams, Free vibration analysis, Finite element method

* Duygu ERTÜRKMEN; derturkmen@mersin.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Gelişmiş pek çok ülkede geniş açıklığa ve büyük yüksekliğe sahip binaların taşıyıcı sistemlerinde çelik elemanların, özellikle de gövdesi boşluklu olarak tasarlanan petek kirişler olarak adlandırılan I veya H profillerinden üretilmiş olan çelik elemanların kullanımı, maliyeti düşürmeleri bakımından sıklıkla tercih edilmektedir. Petek kiriş kullanımı ile, profil tablolarında tüm özellikleri mevcut halde bulunan I veya H şeklindeki çelik profillerin dolu gövdeli halleri kullanıldığında elde edilen mukavemet değerinden çok daha yüksek mukavemet veren kirişler elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Genel olarak, I kesitli (I, IP, IPE profilleri) veya H kesitli hadde profillerinin gövdeleri boyunca testere dişine benzer şekilde kesildikten sonra özel bir sistemle kesilen uçlardan birbirlerine zikzak görünümü oluşacak şekilde kaynaklanmalarıyla elde edilen çelik petek kirişler, gövdesinde altı köşeli boşluklar bulunan daha yüksek bir profilin elde edilmesine ve bu sayede de elemandan, daha yüksek mukavemet sağlanmasına katkı sağlamaktadır. Petek kirişler, gövde boşluklarının genelde altı köşeli olması dolayısı ile de petek görünümüne sahip olmaları nedeniyle, bu şekilde adlandırılmıştır. Teknolojideki yeni gelişmelerin de etkisiyle, zaman içinde farklı tipte geometrik boşluk şekilleri de söz konusu kirişlerin tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Petek kirişlerin gövde boşlukları, kullanım amacına ve bir takım estetik nedenlere bağlı olarak daire, kare, altıgen ve sekizgen şeklinde olabilmektedir. Günümüzde geliştirilen özel lazer uçlu kesiciler yardımıyla I profillerin gövdeleri istenilen şekillerde kesilip birleştirilerek daire, kare, altıgen ve sekizgen boşluklu petek kirişler kolaylıkla elde edilebilmektedir.

Bilindiği üzere eğilmeye çalışan kirişlerin, eğilme momentleri, yani taşıma kapasiteleri, kiriş kesit yüksekliğinin karesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla çelik kirişler ile tasarım yapılırken, kirişlerin yüksekliklerini arttırmak gerekmektedir. Ancak artan kesit yüksekliği ile birlikte maliyetin de büyük ölçüde artacağına da hesaba alınması gereklidir. Bu sebeple bu işlemi yaparken çelik malzeme giderini en alt düzeyde tutacak çözümün uygulamaya konulması ekonomi bakımından önem kazanmaktadır. Daha az çelik malzeme ile daha yüksek mukavemet sağlamaları, dolayısı ile de daha ekonomik olmaları bakımından boşluklu petek kirişlerin geniş açıklıklı yapılarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Boşluklu petek kirişler aynı zamanda yapıya hafiflikte sağlamaktadır. Buna ek olarak petek kirişlerin gövdesinde oluşan boşluklardan yapının tesisat donanımları geçebilmekte ve bu sayede yapı yüksekliğinin gereğinden fazla olması engellenebilmektedir. Bununla birlikte mimari açıdan da şık ve dekoratif bir görüntü sağlanmaktadır. Havaalanı, stadyum, otopark ve fabrika gibi yapıların tasarımında petek kirişlerin kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır.

Petek kirişler, genellikle düzgün yayılı yüklerin taşınmasında ve aktarılmasında kullanılmaktadır. Sabit mesnetli eğri eksenli altıgen boşluklu petek kirişlerin yayılı yükler etkisi altında test edildiği bir çalışmada, kirişlere gelen burkulma yükü değerinin, kiriş açıklıklarının dairesel yarıçap değerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış olup kirişlerin burkulma yükünün kiriş açıklığında dikkate alınan gövde boşluk sayısına bağlı olarak azalma gösterdiği sonucuna varılmıştır (Jiang vd., 2012). Petek kirişlerin gövde boşluklu olarak teşkil edilmesinin, kirişlerin enine şekil değiştirme değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, farklı başlık genişliğine sahip çeşitli boylarda olan iki açıklıklı sürekli kirişler yayılı yük etkisi altında test edilmiştir. Özellikle kiriş gövdesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin incelendiği çalışmada, ele alınan sürekli petek kirişlerin sehim değerlerinin söz konusu kirişlerin uzunlukları arttıkça azaldığı sonucuna varılmıştır (Elaiwi vd., 2017). Dairesel gövde boşluklu eğri eksenli sabit veya ankastre uç mesnetli olarak planlanan petek kirişlerin Sonlu Eleman Yöntemi ile analizini ele alan bir çalışmada gövde boşluklarının çap değerlerinin ve kiriş yüksekliklerinin değişiminin kiriş davranışı üzerindeki ve sehim üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı sıcaklık dereceleri ve çeşitli derinlik/açıklık değerleri dikkate alınarak kirişlerin sehim değerlerinin değişiminin incelendiği çalışmada, açıklık boyutunun artması ile kiriş orta bölgesinde meydana gelen sehimin arttığı sonucuna varılmıştır (Pandya & Dhankot, 2017). Eğri eksenli I kesitli dairesel gövde boşluklu sabit mesnetli dört adet petek kirişin ortalarında tekil yük etkisinde test edildiği deneysel bir çalışmada, yay uzunluğu-yüksekliği ve eğrilik yarıçapı değerlerinin değişiminin numunelerin maksimum yük ve sehim değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kirişlerin davranışı için geliştirilen sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir (Zaher vd., 2018). Dairesel ve altıgen gövde boşluk geometri petek kirişlerin dört nokta yükleme etkisindeki davranışlarının karşılaştırılması olarak ele alındığı çalışmada, altıgen boşlukların köşelerinde oluşan kayma gerilmelerinin yoğunluğundan kirişlerin kesme etkisi nedeniyle

göçmelerinin önlenmesi ve yük taşıma kapasitelerinin artırılması amacıyla dairesel gövde boşluklu kirişlerin kullanımı önerilmiştir (Mehetre & Talikoti, 2020). Farklı geometrik şekillerde gövde boşlukları kullanılarak oluşturulan 15 adet petek kirişin deneysel ve doğrusal olmayan analizinin gerçekleştirildiği bir çalışmada boşlukların farklı çap ve yükseklik değerleri için kirişlerin maksimum moment değerleri ve oluşan gerilmelerin değişimleri araştırılmıştır (Morkhade vd., 2020). Eksenel eğilme etkisindeki boşluklu petek kirişlerin elastik ve elastik olmayan burkulma davranışına yönelik gerçekleştirilen parametrik bir çalışmada gövde kalınlığının ve profilin başlık geometrisinin burkulma yükünün kritik değeri üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Rajana vd., 2020). Benzer uzunlukta değişken kesit yüksekliğinde yanal takviyeli veya takviyesiz, altıgen gövde boşluk kesitli olarak planlanan dört adet petek kirişin, açıklık ortasında tekil bir yük etkisi altında deneysel olarak test edilmesi sonucunda yanal takviyelerin kirişlerin yük taşıma kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir (Al-Mawashee & Al-Kannoon, 2021).

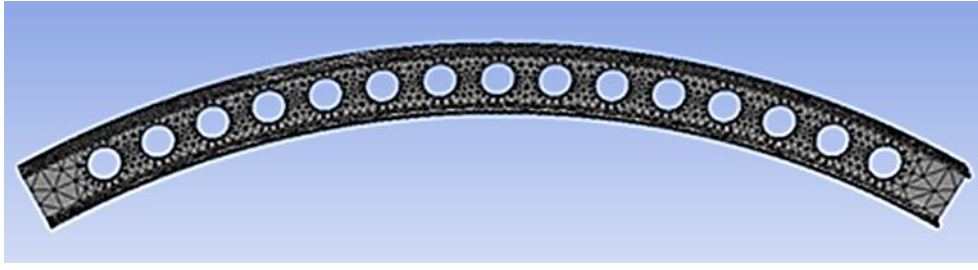
Genel olarak yapılan çalışmalar düz eksenli ve değişken boşluk türüne sahip petek kirişlerle alakalı olup eğri eksenli ve değişken boşluklu petek kirişler için çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Düz eksenli petek kirişlerde kesit gövdesinde oluşturulan altıgen geometri boşluğun boşluksuz dolu gövdeli kirişlere nazaran kirişlerin eğilme dayanımlarını ne şekilde etkilediğinin araştırılması amacıyla ANSYS programı yardımıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiştir (Barkiah & Darmawan, 2021). Yanal takviyeli kompozit olmayan Litzka tipi petek kirişlerin göçme modları sonlu eleman yöntemi kullanılarak araştırılmış, kirişi oluşturan parçaların ve yanal takviyelerin davranışa etkisi ve elemanların burkulma davranışları incelenmiştir (Braga vd., 2021). ABAQUS analiz programı yardımıyla farklı gövde boşluk geometri petek kirişlerin aynı üniform yayılı yük ve uç mesnetlenme koşullarındaki davranışları sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir (Doori & Noori, 2021). Değişken gövde yüksekliğine ve başlık genişliğine sahip olan I profilinden teşkil edilen çelik kirişlerin sonlu eleman analizleri sonucunda, en çok zorlanan bölgelerin gövde ortaları olduğu ve bu orta kısımda kesit yüksekliklerinin artırılmasının, yani petek kiriş kullanımının, kirişlerde oluşacak olan sehim değerlerini azaltacağı sonucuna varılmıştır (Pandey & Rathour, 2021). Gövdesinde dairesel boşluk bulunan 20 petek kirişi üzerinde üniform yayılı yük etkisinde sonlu eleman yöntemi ile ABAQUS programında değişken sınır şartları dikkate alınarak test edilmiş ve oluşan gerilme deformasyon değerlerinin değişimi incelenmiştir (Singh, 2021). Altıgen gövde boşluklu petek kirişlerin boşluk kenarlarında oluşan kesme deformasyonlarını azaltmak ve kirişin kesme mukavemetini arttırmak için kayma gerilmelerinin yoğun olduğu kısımlarda kesit rijitliğini arttıracak çapraz ve düşey çelik çubuk takviye elemanlarının kullanımının kiriş kesme kapasitesine etkisi deneysel ve analitik çalışma ile sunulmuştur (Subramanian & Jagadeesan, 2021). Petek kirişlerin basınç ve yanal burkulma etkisindeki davranışlarını araştırmak için bir yöntem geliştirilmiş ve geliştirilen yöntem mevcut yöntemlerle karşılaştırılmış; önerdikleri denklemin kirişlerin davranışını gerçekçi bir şekilde yansıttığı sonucuna varılmıştır (Weidlich vd., 2021). Altıgen gövde boşluklu betonarme petek kirişlerin eğilme etkisindeki davranışları araştırılmıştır. Bu amaçla değişken kiriş yüksekliği ve açıklık boyutları için kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için parametrik bir çalışma yapılmıştır (Nabil vd., 2022).

Yapılan araştırma ve incelemelere göre, boşluk tipinin eğri eksenli petek kirişlerin serbest titreşim davranışını üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak analiz eden herhangi bir çalışmaya literatürde henüz rastlanmamıştır. Bu çalışmada, eğri eksenli petek kirişlerin serbest titreşim altındaki davranışının araştırılması amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS workbench programı yardımıyla farklı geometrik boşluklu petek kirişlere ait modal analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, farklı uç mesnetlenme biçimlerinin ve çalışma kapsamında ele alınan IPE profillerinden oluşturulan petek kirişlerin gövdesinde açılan değişken boşluk geometrisinin (kare, daire, beşgen ve altıgen) analiz sonucunda elde edilecek olan toplam deplasman (genlik) değerleri, frekans değerleri ve gerilmeler üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

Yapılan çalışmada daire eksenli olacak şekilde oluşturulmuş dolayısıyla da eğri eksenli olarak adlandırılmış olan IPE kesitli çelik petek kirişler, daire, kare, beşgen ve altıgen boşluklu olarak planlanmış ve Sonlu eleman yöntemini temel alan ANSYS Workbench yapı analizi programı kullanılarak serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir (ANSYS, Inc release ansys R1, 2022).



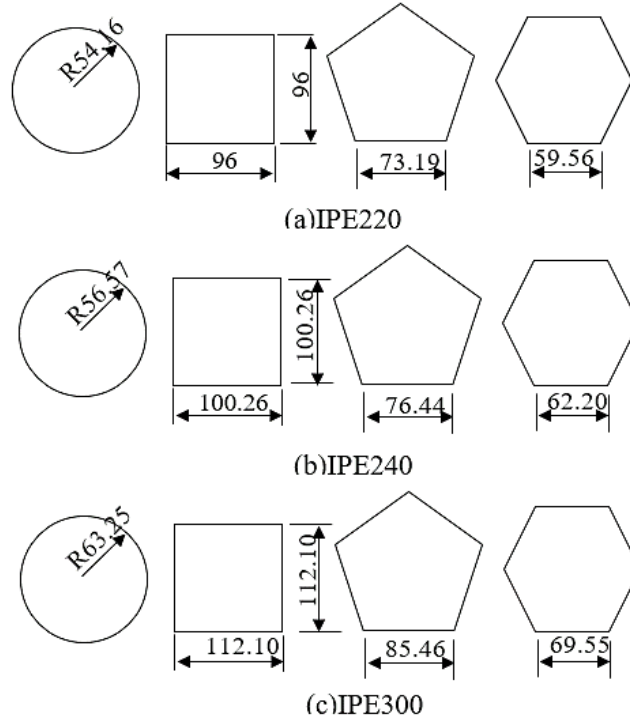
Şekil 1. Dairesel boşluklu eğri eksenli petek kiriş modeli
Figure 1. Curved castellated beams with circle web openings

Şekil 1’de serbest titreşim davranışı araştırılan iki ucu ankastre mesnetli dairesel boşluklu eğri eksenli bir petek kiriş örneği görülmektedir. Çalışmada Şekil 1’de verilen örnek modele benzer şekilde eğri eksenli olarak tasarlanan farklı geometrik boşluklu (daire, kare, beşgen, altıgen) tüm petek kirişler için ankastre – serbest, ankastre – sabit ve ankastre – ankastre mesnet koşulları ele alınmıştır. Kirişlere ait malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiş olup kirişlerin izotropik homojen malzemeden imal edildiği kabul edilmiştir.

Tablo 1. Eğri eksenli petek kirişlere ait malzeme özellikleri
Table 1. Material properties of curved castellated beams

Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kgm^{-3})	Hacim modülü (GPa)	Kayma modülü (GPa)
200	0.3	7850	166.7	76.92

Analizlerde ele alınan eğri eksenli çelik petek kirişler için IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri kullanılmıştır. Kullanılan kirişler için planlanan gövde boşluk şekilleri ve boşluk ölçüleri Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Gövde boşluk geometrisi ve boşluk boyutları (a-c)
Figure 2. Geometry and dimensions of web openings (a-c)

Şekil 2’de verilen boşlukların geometrik ölçüleri, her bir kiriş modeli için toplam boşluk alanları eşit olacak şekilde hesaplanarak modellemeye dikkate alınmıştır. Modellemeye eğri eksenli petek kirişin yay açısı 60° , uzunluğu 3 m, ve eğrilik yarıçapı 2.865 m olarak ele alınmıştır. Kirişlerde bırakılan gövde boşluk sayısı tasarlanan tüm model türleri için 15’er adet olup söz konusu boşluklar arasındaki mesafe (α) = 0.18 m

değerinde, kenar boşlukları ve mesnetler arasındaki mesafe ise $(\beta) = 0.24$ m olarak belirlenmiştir. Tüm bu özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Analizler için sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS Workbench yapısal analiz programı kullanılmış olup analizde elemanlar için göz önüne alınan sonlu eleman SOLID187’ dir. SOLID187, dörtüzlü (tetrahedral), her düğüm noktasında 3 adet serbestlik derecesi olan 10 düğümlü bir sonlu eleman tipidir. Düğüm noktasındaki serbestlik dereceleri x, y ve z yönlerinde ötelenmelerdir. Söz konusu elemanın teorisine, yapılan kabullere ve kısıtlamalara yönelik detaylı veriler ANSYS programının teorileri kaynağında mevcuttur ([Mechanical APDL element reference, 2013](#)). Çalışma kapsamında ele alınan eğri eksenli petek kiriş modelleri için analizlerde dikkate alınan uç mesnetlenme koşullarını tanımlamak için, ankastre mesnet için “Fixed” komutu, sabit mesnet için ise “Remote displacement” komutu kullanılmış ve sabit mesnet sınır koşulu için tanımlama yaparken dönme değerleri sıfır olarak düzeltilmiştir.

Tablo 2. Geometrik özellikler

Table 2. Geometric features

Profil	Model	Gövde boşluk geometrisi	Boşluk alanı (mm ²)	β (m)	α (m)	Boşluk sayısı
IPE 220	I	Daire	9216	0.24	0.18	15
	II	Kare				
	III	Beşgen				
	IV	Altıgen				
IPE 240	V	Daire	10052.07	0.24	0.18	15
	VI	Kare				
	VII	Beşgen				
	VIII	Altıgen				
IPE 300	IX	Daire	12566.41	0.24	0.18	15
	X	Kare				
	XI	Beşgen				
	XII	Altıgen				

Çalışmada analizler modal analiz olarak ele alınmış ve söz konusu elemanlar serbest titreşim etkisi dikkate alınarak dinamik olarak analiz edilmiştir. Ele alınan problemlerin sonlu eleman ağları oluştururken, programın “Mesh” ayarlarında iyileştirme yapılmış olup “Resolution” değeri programın kendisinde 2 iken 5 yapılmış “Span angle center” değeri ise “Fine” seçeneği işaretlenerek analiz için daha hassas bir mesh ayarı kullanımı düşünülmüştür. Her bir petek kiriş modeli için program tarafından hesaplanan eleman ve düğüm noktası sayısı ile elemanlara ait kütle bilgileri Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Sonlu eleman ağı özellikleri

Table 3. Finite element mesh properties

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı	Kütle (kg)
I	12982	28130	62.427
II	12140	25630	62.426
III	12527	26674	62.426
IV	12854	26886	62.426
V	13123	28507	68.480
VI	12274	25927	68.482
VII	12901	27495	68.481
VIII	12582	26559	68.482
IX	15346	32887	96.331
X	12502	26523	96.333
XI	13936	29622	96.334
XII	13105	27702	96.332

3. Bulgular ve tartışma

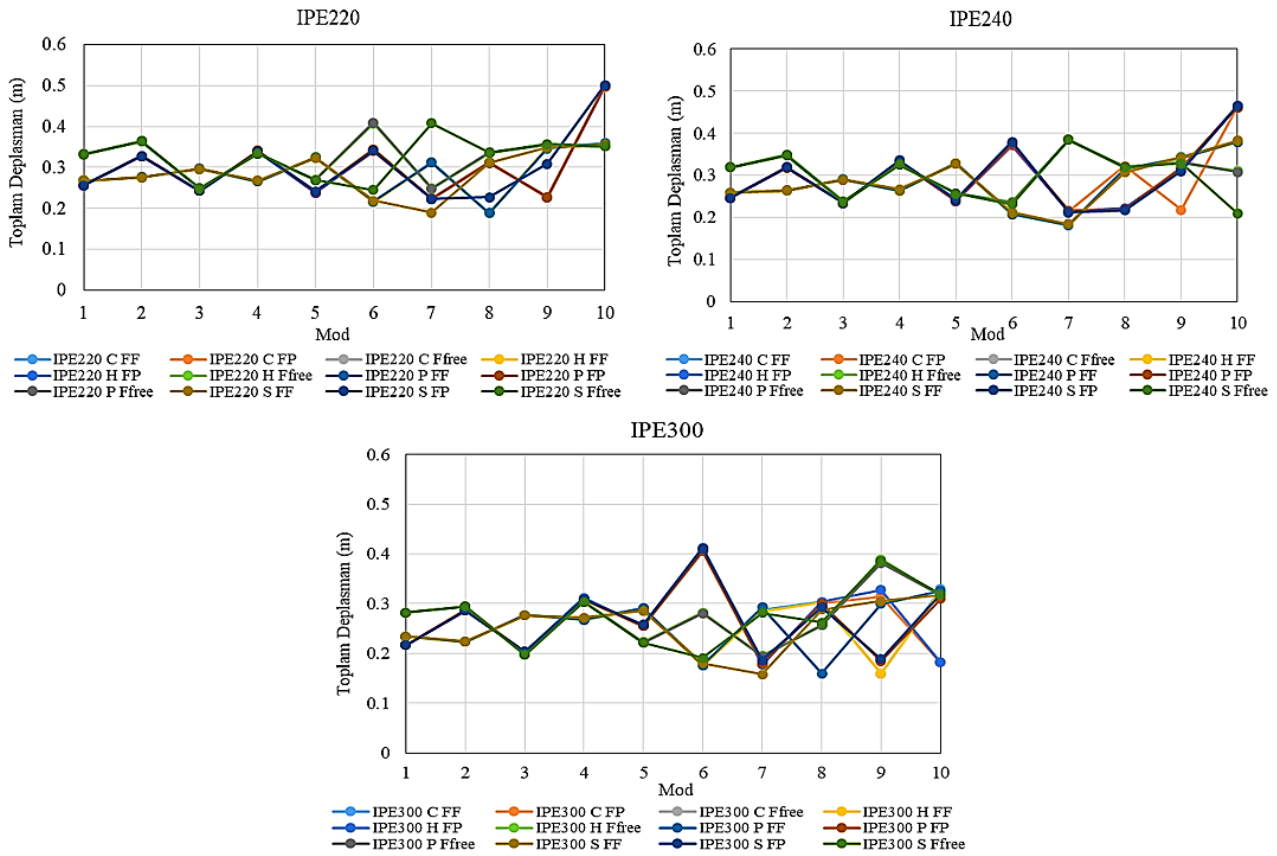
3. Results and discussion

Bu çalışmada, gövdesinde farklı geometrik şekillerde boşluklar bulunan daire eksenli çelik petek kirişlerin serbest titreşim analizi sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kirişlerin gövdesinde kullanılan boşluk tipi geometrisinin, ele alınan yapı elemanlarının genlik ve frekans değerlerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, her bir profil

için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda kirişlerin uzunluğu, eğrilik yarıçapı, boşluk alanı ve boşluklar arasındaki mesafe değerleri eşit tutulmuş yalnızca boşluk tipi geometrisi değiştirilmiştir. Analizler, elemanların serbest titreşim davranışı için yapılmış olup kirişlere şiddeti zamana bağlı değişen bir dinamik yük uygulanmamıştır. Yapılan modal analizlerde her bir eleman için 10 mod göz önüne alınmış ve her mod için modellerin serbest titreşim frekansı ve genlik değerlerinin değişimi incelenmiştir.

Tüm modeller için elde edilen genlik değerleri tüm sınır koşulları ve gövde boşluk tipleri için Tablo 4’te verilmiştir. Tüm sınır koşulları ve boşluk tipleri için göz önüne alınan IPE220, IPE240 ve IPE300 kesitli eğri eksenli petek kirişlere ait genlik değerlerinin profil türlerine bağlı değişimi Şekil 3’te verilen grafiklerde görülmektedir. Söz konusu profillerden en büyük genlik değerlerinin oluşumunun gözlemlendiği bazı profillere ait ilk 10 mod için elde edilen mod görselleri ise Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6’ da yer almaktadır. Frekans değerleri ise Şekil 7 ve Şekil 8’de verilen grafiklerle sırasıyla uç mesnetlenme ve profil türlerine göre karşılaştırılmıştır.

Şekil 3 ve Tablo 4 incelendiğinde tüm mesnet koşulları için, en büyük genlik değerlerinin 10. modda ve kare ile beşgen boşluk durumunda meydana geldiği, 6. veya 7. modda ise tüm durumlar için oluşan genlik değerlerinin bir anda düştüğü ve sonrasında tekrar artarak maksimum değere ulaştığı görülmektedir.



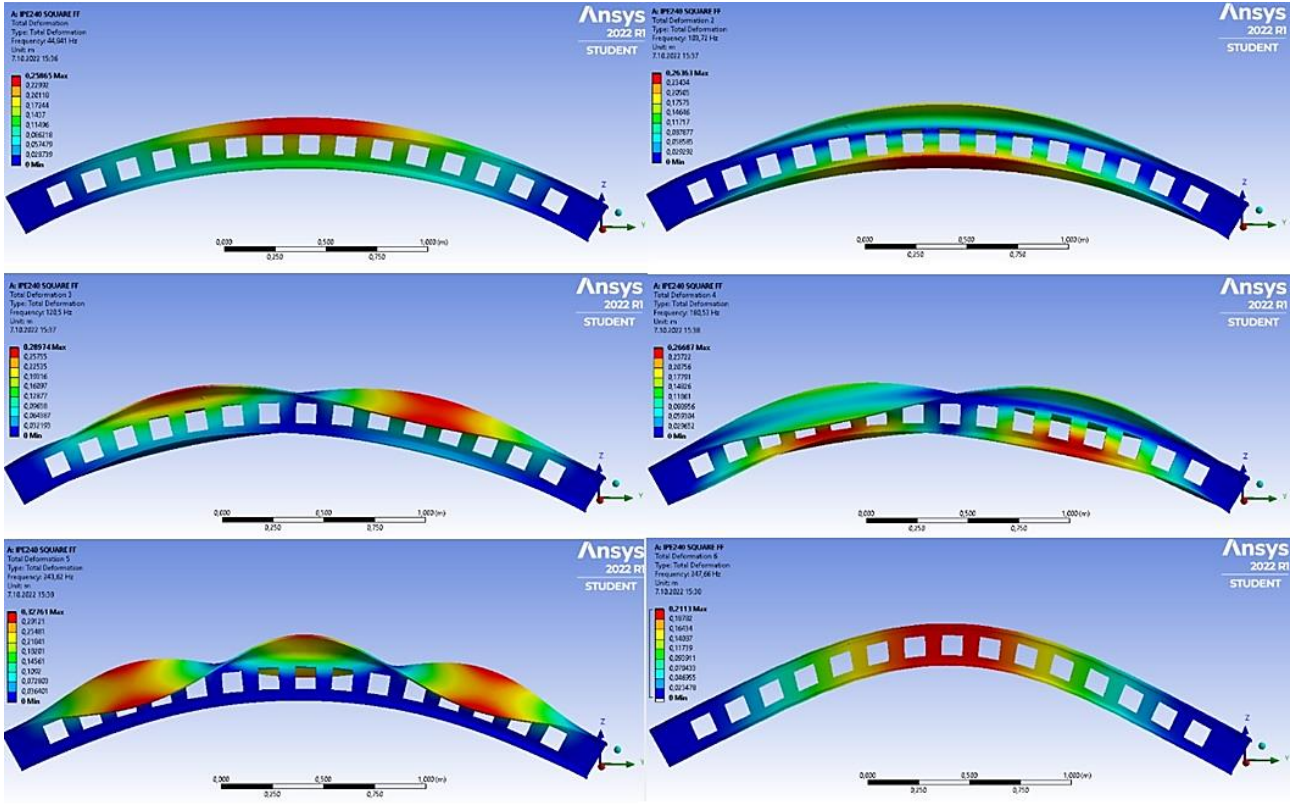
Şekil 3. IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri için genlik değerlerinin değişimi

Figure 3. Variation of amplitude values for IPE220, IPE240 and IPE300 profiles

Tablo 4. İlk 10 moda karşılık gelen genlik değerlerinin karşılaştırılması (m)
Table 4. Comparison of the amplitude values corresponding to the first 10 modes (m)

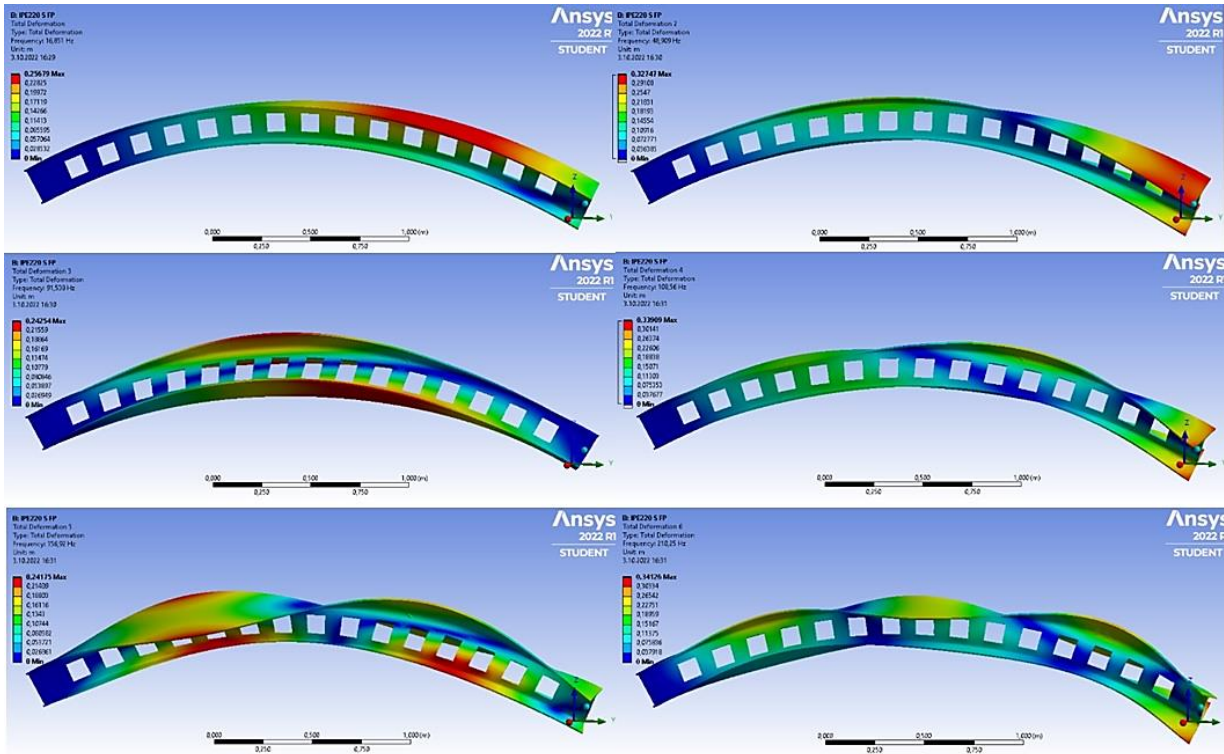
Mesnet koşulu	Mod	IPE220 Dairesel	IPE240 Dairesel	IPE300 Dairesel	IPE220 Kare	IPE240 Kare	IPE300 Kare
Ankastre – Ankastre (Fixed-Fixed) (FF)	1	0.26822	0.25850	0.23365	0.26823	0.25865	0.23360
	2	0.27605	0.26331	0.22342	0.27579	0.26363	0.22368
	3	0.29658	0.28979	0.27686	0.29654	0.28974	0.27648
	4	0.26554	0.26253	0.26857	0.26784	0.26687	0.27205
	5	0.32478	0.32839	0.29018	0.32346	0.32761	0.28517
	6	0.21586	0.20726	0.17570	0.21934	0.21130	0.18012
	7	0.31324	0.18125	0.28679	0.18972	0.18376	0.15821
	8	0.18856	0.31452	0.30328	0.31215	0.30717	0.28770
	9	0.34859	0.34331	0.15946	0.34885	0.34253	0.30516
	10	0.35995	0.37919	0.32918	0.35536	0.38209	0.31770
Ankastre – Sabit (Fixed-Pinned) (FP)	Mod	IPE220 Beşgen	IPE240 Beşgen	IPE300 Beşgen	IPE220 Altgen	IPE240 Altgen	IPE300 Altgen
	1	0.26840	0.25883	0.23375	0.26823	0.25858	0.23354
	2	0.27614	0.26341	0.22352	0.27618	0.26359	0.22341
	3	0.29678	0.28996	0.27672	0.29648	0.28970	0.27619
	4	0.26583	0.26378	0.26697	0.26565	0.26228	0.26757
	5	0.32454	0.32826	0.29087	0.32406	0.32760	0.28658
	6	0.21644	0.20766	0.17637	0.21603	0.20718	0.17550
	7	0.31181	0.18206	0.29295	0.31181	0.18221	0.28423
	8	0.18905	0.31387	0.15939	0.18896	0.31278	0.30172
	9	0.34637	0.34129	0.29896	0.34922	0.34274	0.15979
10	0.35806	0.37991	0.32590	0.35607	0.37809	0.32580	
Ankastre – Serbest (Fixed-Free) (FFixed)	Mod	IPE220 Beşgen	IPE240 Beşgen	IPE300 Beşgen	IPE220 Altgen	IPE240 Altgen	IPE300 Altgen
	1	0.25701	0.24657	0.21649	0.25687	0.24648	0.21645
	2	0.32791	0.31819	0.28655	0.32722	0.31887	0.28699
	3	0.24306	0.23444	0.20366	0.24321	0.23434	0.20374
	4	0.34147	0.33265	0.30819	0.33889	0.33218	0.31218
	5	0.24023	0.24010	0.25480	0.23809	0.23798	0.25447
	6	0.34485	0.37516	0.40566	0.34101	0.37180	0.41237
	7	0.22410	0.21553	0.17945	0.22334	0.21463	0.17691
	8	0.31057	0.21856	0.29937	0.31181	0.22218	0.30364
	9	0.22771	0.31793	0.18455	0.22716	0.31428	0.32739
10	0.49918	0.46087	0.30968	0.49773	0.46518	0.18159	
Mesnet koşulu	Mod	IPE220 Dairesel	IPE240 Dairesel	IPE300 Dairesel	IPE220 Kare	IPE240 Kare	IPE300 Kare
	1	0.33210	0.31896	0.28186	0.33225	0.31900	0.28194
	2	0.36354	0.34841	0.29377	0.36425	0.34809	0.29421
	3	0.24971	0.23780	0.19901	0.24820	0.23600	0.19637
	4	0.33333	0.32533	0.30377	0.33365	0.32517	0.30363
	5	0.26934	0.25623	0.22048	0.26907	0.25645	0.22197
	6	0.40863	0.23640	0.28136	0.24463	0.23136	0.19083
	7	0.24885	0.38404	0.19518	0.40758	0.38465	0.28089
	8	0.33565	0.31892	0.25747	0.33545	0.32006	0.26181
	9	0.35529	0.33042	0.38332	0.35652	0.32868	0.38657
10	0.35241	0.31034	0.31932	0.35114	0.20938	0.31806	
Ankastre – Serbest (Fixed-Free) (FFixed)	Mod	IPE220 Beşgen	IPE240 Beşgen	IPE300 Beşgen	IPE220 Altgen	IPE240 Altgen	IPE300 Altgen
	1	0.33234	0.31902	0.28200	0.33246	0.31914	0.28205
	2	0.36383	0.34806	0.29410	0.36416	0.34851	0.29324
	3	0.24945	0.23739	0.19845	0.24956	0.23768	0.19910
	4	0.33390	0.32566	0.30338	0.33358	0.32568	0.30400
	5	0.26935	0.25627	0.22143	0.26962	0.25653	0.22305
	6	0.40877	0.23498	0.28036	0.40701	0.23580	0.28217
	7	0.24823	0.38439	0.19418	0.24836	0.38424	0.19533
	8	0.33684	0.31902	0.25638	0.33446	0.31818	0.25646
	9	0.35432	0.33084	0.38129	0.35682	0.32833	0.38945
10	0.35139	0.30771	0.31783	0.35214	0.31004	0.31630	

IPE220 elemanına ait sonuçlar incelendiğinde sonuçların elemanın modelinden yani daire, kare, beşgen veya altıgen boşluklu olmasından bağımsız olduğu sadece uç mesnetlenme şekline bağlı olduğu görülmektedir. Aynı uç mesnetlenme şekline sahip olan farklı boşluk tipleri kullanılarak teşkil edilmiş IPE220 kesitli petek kirişleri için frekans değerleri boşluk türü farklı da olsa değişmemiştir (Şekil 4).

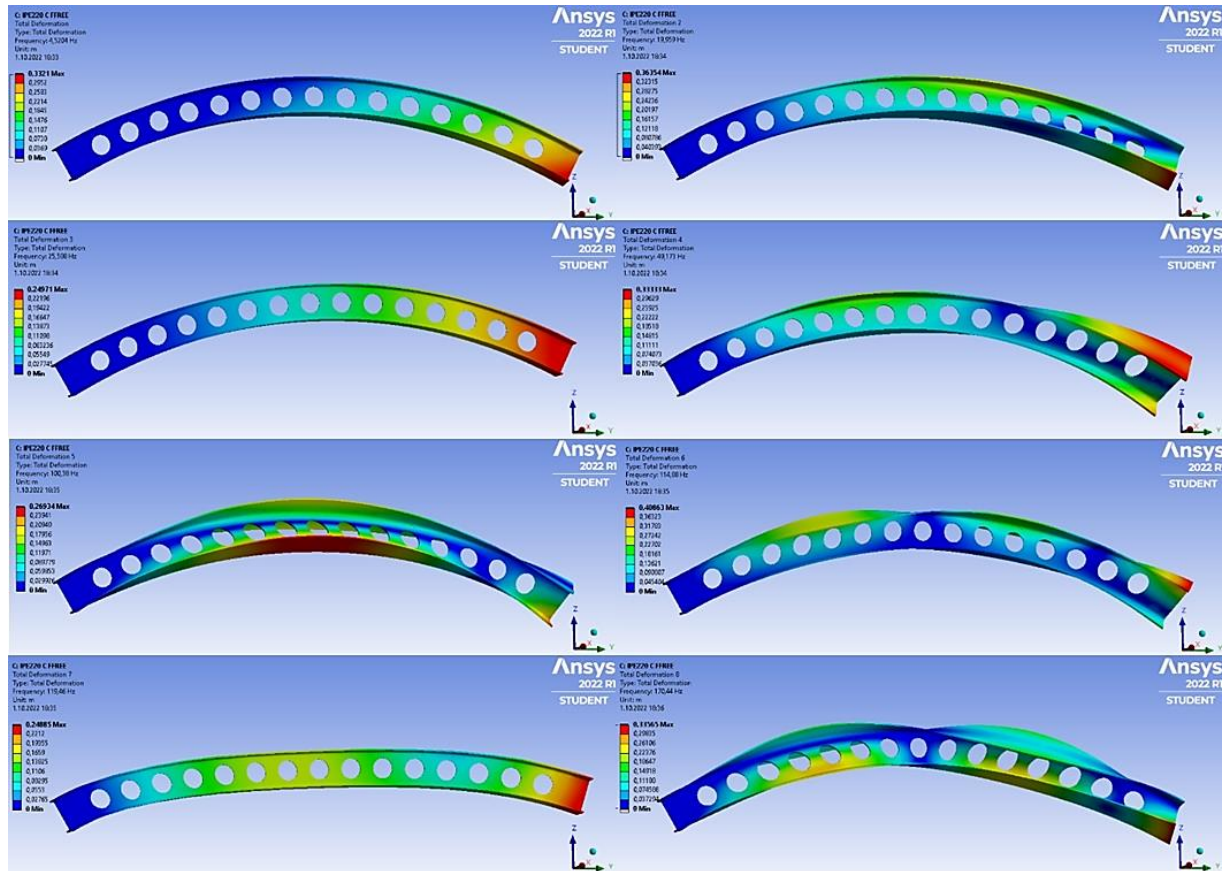


Şekil 4. Ankastre - ankastre uç mesnetli, eğri eksenli, kare boşluklu IPE240 profiline ait mod görselleri
Figure 4. Mode images of IPE240 profile curved castellated beam with fixed - fixed end support and square web opening

Serbest titreşim frekans değerleri, ankastre - ankastre mesnetli durumda her boşluk tipi için ve her petek kiriş profili için en büyük değerleri almıştır (Şekil 5). Elemanların uç serbestliklerinin artması ile yani ankastre - sabit ve ankastre - serbest mesnetli durumlar için ise oluşan frekans değerleri tüm modeller için azalmıştır. Bu durumda en yüksek frekanslar, ankastre - ankastre mesnetli, en düşük frekanslar ise ankastre - serbest uç sınır koşulunda meydana gelmiştir. En rijit durum, her iki ucun ankastre olduğu durum olduğu için bu durumda periyot azalacak ve frekans değerleri de artacaktır. Beklendiği şekilde bir ucun serbest olduğu durumda rijitlik azalacağından frekans değerleri periyodun artması ile azalacaktır. Yine Tablo 5'te verilen sonuçlara bakıldığında kesit boyutunun artırılması ile rijitlik arttığından petek kiriş kesitinin IPE220'den IPE240'a ve IPE300'e çıkarılması durumlarında da yine periyot değerleri düşeceğinden frekans değerlerinde her mesnetlenme türü için artış gözlenmiştir.



Şekil 5. Ankastre-basit mesnetli, eğri eksenli, kare boşluklu IPE220 profiline ait mod görselleri
 Figure 5. Mode images of IPE220 profile curved castellated beam with fixed-pinned end support and square web opening



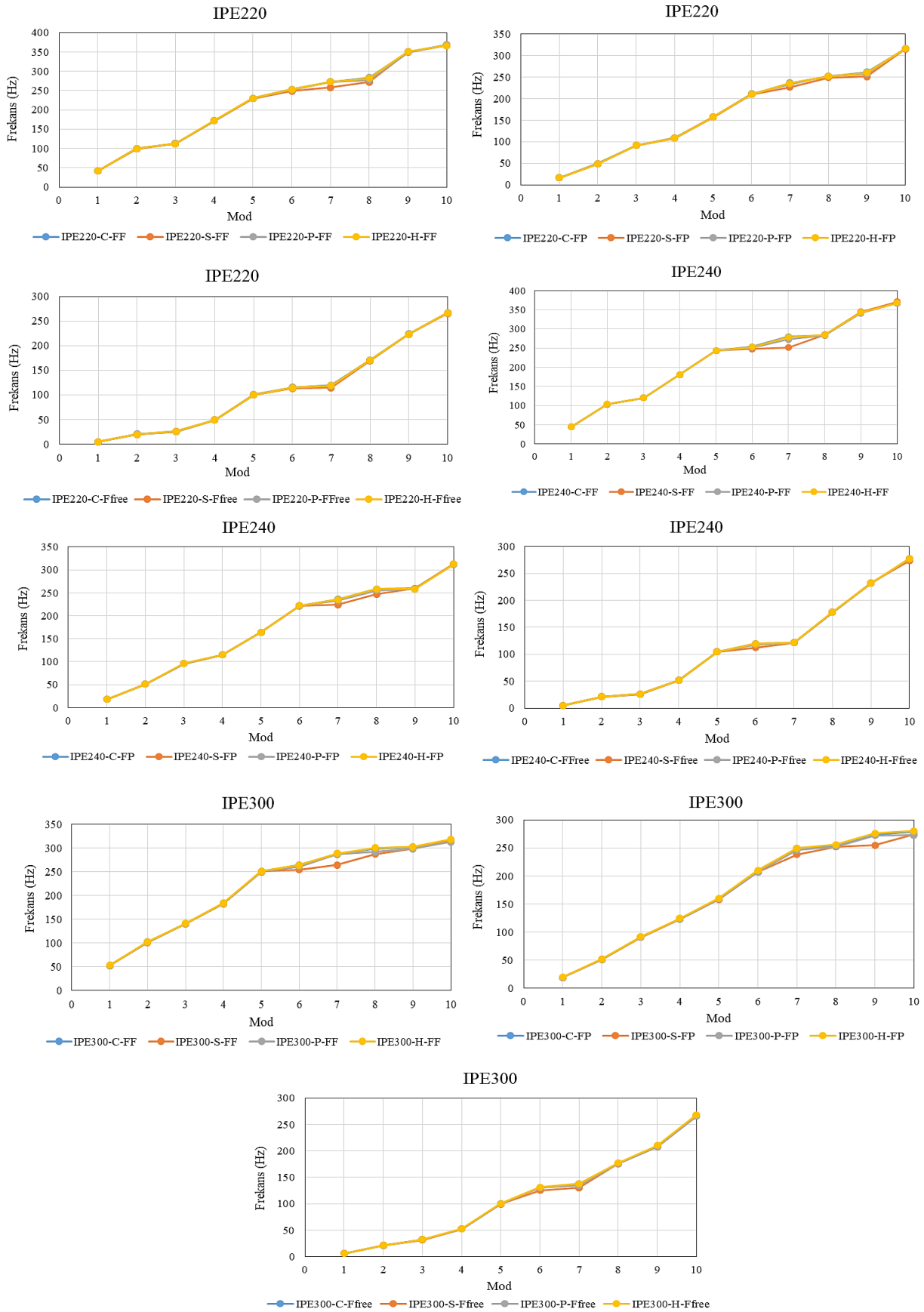
Şekil 6. Ankastre-serbest uç mesnetli, eğri eksenli, dairesel boşluklu IPE220 profiline ait mod görselleri
 Figure 6. Mode images of IPE220 profile curved castellated beam with fixed-free end support and circular web opening

Tablo 5. Frekans değerleri değişimi (Hz)**Table 5.** Variation of frequency values

Profil	Mod	Ankastre - Ankastre (FF)				Ankastre - Basit (FP)				Ankastre - Serbest (FFree)			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
IPE220	1	41.61	41.51	41.68	41.53	16.93	16.85	16.92	16.86	4.52	4.50	4.54	4.51
	2	99.42	98.93	99.48	99.44	49.05	48.91	49.15	48.87	19.96	19.90	19.98	19.90
	3	112.59	112.38	112.69	112.42	91.95	91.54	92.01	91.98	25.59	25.30	25.48	25.56
	4	172.22	171.52	172.18	172.28	108.74	108.56	109.18	108.62	49.17	48.95	49.19	48.91
	5	229.78	229.50	229.89	229.67	157.65	156.92	157.82	157.69	100.3	99.85	100.48	100.38
	6	253.63	248.54	251.55	253.03	210.37	210.25	211.24	210.26	114.88	113.1	114.95	114.51
	7	272.79	258.29	272.74	272.88	236.22	226.59	233.64	235.50	119.4	114.4	117.91	118.95
	8	283.90	272.06	277.59	281.68	251.72	249.23	252.14	251.84	170.4	169.5	170.38	170.45
	9	349.88	350.46	348.96	350.86	261.24	250.91	257.47	259.96	223.8	223.1	223.95	223.24
	10	367.92	366.30	368.48	366.69	315.61	315.28	316.75	315.68	266.6	265.5	266.51	266.68
Profil	Mod	Ankastre - Ankastre (FF)				Ankastre - Basit (FP)				Ankastre - Serbest (FFree)			
		V	VI	VII	VIII	V	VI	VII	VIII	V	VI	VII	VIII
IPE240	1	44.74	44.84	44.78	44.81	17.97	17.98	17.96	17.97	4.84	4.84	4.85	4.84
	2	103.78	103.72	103.90	104.00	51.30	51.44	51.35	51.29	21.02	21.03	21.00	21.01
	3	120.43	120.50	120.44	120.48	96.05	95.95	96.08	96.23	26.19	25.81	26.04	26.16
	4	180.68	180.53	180.60	181.04	114.83	115.23	115.09	114.98	51.44	51.54	51.45	51.39
	5	243.60	243.62	243.48	243.67	164.05	164.14	164.04	164.35	104.47	104.4	104.53	104.67
	6	253.67	247.66	251.31	253.18	221.64	222.40	222.20	222.06	120.00	112.5	118.03	119.50
	7	280.11	251.87	272.88	278.15	236.20	224.05	233.12	235.56	121.5	121.7	121.45	121.49
	8	283.71	284.83	283.10	284.19	258.13	247.24	255.51	258.68	177.73	177.6	177.64	178.10
	9	342.30	344.97	341.27	343.64	259.64	259.64	258.14	258.74	231.8	232.5	231.75	232.12
	10	367.53	370.73	367.60	368.30	312.04	313.48	311.75	312.76	277.0	273.6	276.89	277.66
Profil	Mod	Ankastre - Ankastre (FF)				Ankastre - Basit (FP)				Ankastre - Serbest (FFree)			
		IX	X	XI	XII	IX	X	XI	XII	IX	X	XI	XII
IPE300	1	52.84	52.86	52.74	53.16	19.46	19.50	19.43	19.59	5.96	6.00	5.97	6.04
	2	101.71	101.39	101.79	102.61	51.42	51.52	51.31	51.96	21.33	21.39	21.30	21.49
	3	140.86	141.01	140.79	141.44	91.23	90.80	91.19	92.08	32.61	31.73	32.37	32.65
	4	183.27	183.03	183.29	184.30	123.83	123.88	123.47	124.99	52.52	52.64	52.42	53.04
	5	250.15	250.88	249.96	251.43	159.02	158.47	158.89	160.53	99.89	99.43	99.89	100.84
	6	264.35	254.47	261.09	264.53	207.92	207.66	206.84	209.96	130.52	125.46	130.18	131.56
	7	287.09	264.51	286.46	288.75	249.41	238.09	246.50	249.49	137.66	130.64	134.59	138.01
	8	298.76	287.16	292.07	300.17	252.80	252.31	252.20	255.98	176.36	175.75	176.38	177.57
	9	301.82	298.90	298.41	302.57	273.45	255.04	272.35	276.01	208.49	208.29	207.47	210.53
	10	314.12	316.36	313.23	317.95	279.33	273.88	273.07	279.99	266.09	266.62	265.55	268.35

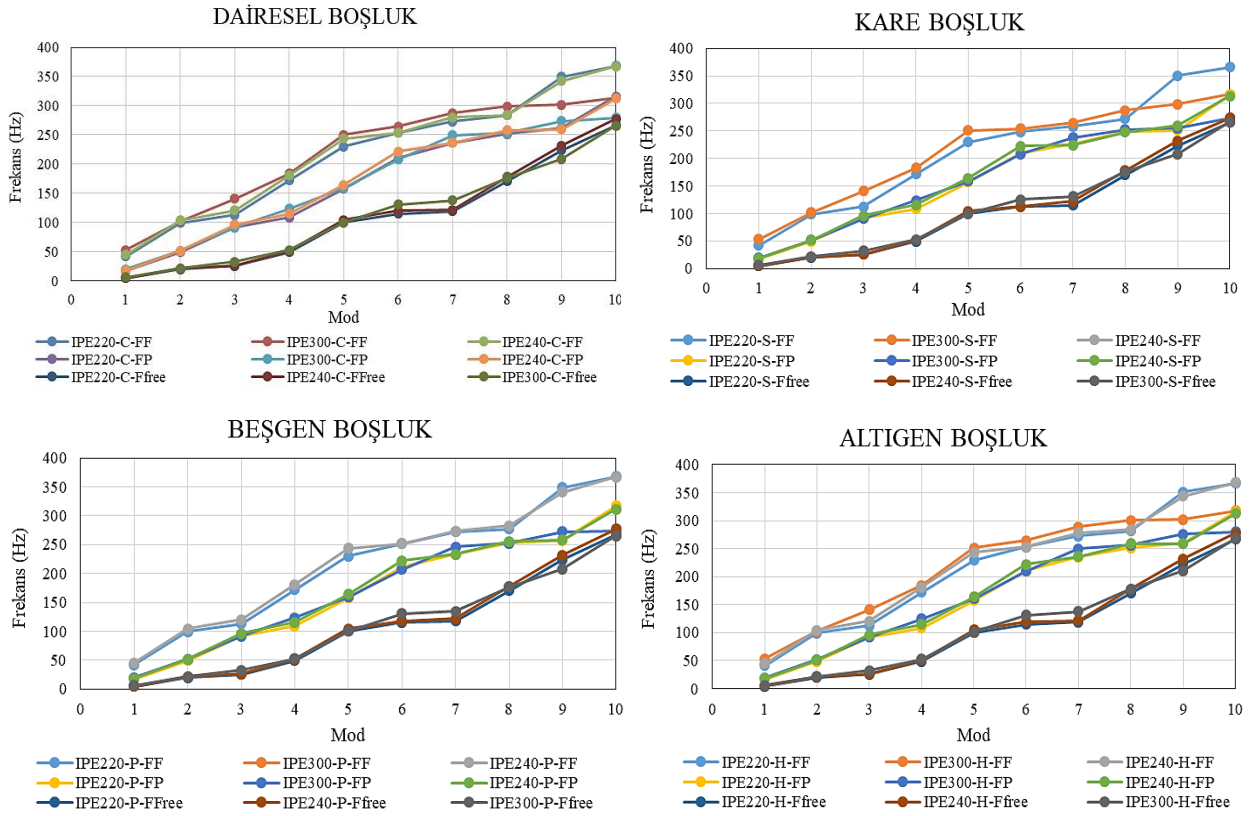
Modal analiz sonucunda modellere ait elde edilen frekans değerleri değişimi Tablo 5'te verilmiştir. Tüm modellere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde, frekans değerlerinin elemanın boşluk tipinden bağımsız olacak şekilde sadece uç mesnetlenme çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlenmiştir.

Gövdesinde aynı tür geometrik boşluk bulunan, kesitleri farklı profilden teşkil edilmiş olan eğri eksenli boşluklu petek kirişlere ait frekans değerleri değişimi incelendiğinde en düşük frekans değerlerinin tüm profil tipleri için en az rijit olan ankastre - serbest uç durumu için meydana geldiği görülmektedir. Profil kesiti arttığında yine rijitlik artışından dolayı frekans değerlerinin arttığı gözlenmektedir.



Şekil 7. Farklı geometrik boşluklu IPE220, IPE240 ve IPE300 kesitli eğri eksenli petek kirişler için uç mesnetlenme türlerine göre frekans değerleri değişimi

Figure 7. Variation of frequency values according to end support types for curved axis castellated beams with different geometric gaps for IPE220, IPE240 and IPE300 sections



Şekil 8. Farklı geometrik boşluklu eğri eksenli petek kirişler için uç mesnetlenme türlerine ve profil tipine bağlı frekans değerleri değişimi

Figure 8. Variation of frequency values depending on end support types and profile type for curved axis castellated beams with different geometric gaps

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada, IPE220, IPE240 ve IPE300 kesitli gövdesinde farklı geometrik şekillerde boşluk bulunan eğri eksenli petek kirişlerin sönümsüz serbest titreşim davranışı teorik olarak araştırılmıştır. Analizlerde hesaplamaları sonlu elemanlar yöntemine dayanan ANSYS workbench paket programı kullanılmıştır. Programda daire, kare, beşgen ve altıgen gövde boşluklarına sahip farklı profil boyutlarına sahip eğri eksenli I kesitli petek kirişler için üç boyutlu sonlu eleman modelleri kurulmuştur. IPE220, IPE240 ve IPE300 profillerinden teşkil edilen eğri eksenli petek kirişlerin dinamik analizleri için modellerin uçlarında ankastre - ankastre, ankastre - sabit ve ankastre - serbest mesnet olmak üzere 3 farklı uç mesnetlenme koşulu kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Tüm modellere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde, frekans değerlerinin elemanın boşluk tipinden bağımsız olacak şekilde sadece uç mesnetlenme çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlenmiştir. En yüksek frekanslar, ankastre - ankastre mesnetli, en düşük frekanslar ise ankastre - serbest uç sınır koşulunda meydana gelmiştir. Petek kiriş kesitinin boyutunun IPE220'den IPE240'a ve IPE300'e çıkarılması durumlarında artan rijitlik nedeni ile periyot değerleri düşmüş ve frekans değerlerinde her mesnetlenme türü için artış gözlenmiştir. Modlara ait genlik değerleri incelendiğinde tüm mesnet koşullarında, eğri eksenli petek kirişte en büyük genliklerin 10. modda ve elemanda kare ile beşgen boşluk kullanılması durumunda meydana geldiği, 6. veya 7. modda ise tüm durumlar için meydana gelen deplasman genlik değerlerinin bir anda düştüğü ve sonrasında tekrar artarak maksimum değere ulaştığı görülmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Al-Mawashee, H. S., & Al-Kannoon, M. A. A. (2021). Flexural strength of castellated beams with corrugated webs. *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 1973*(1), 012213.
- ANSYS, (2022). *Inc Release Ansys R2*, Canonsburg, PA.
- Barkiah, I., & Darmawan, A. R. (2021). Comparative analysis of the flexural capacity of conventional steel beams with castellated beams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 780*(1), 012013.
- Braga, J. J., Linhares, D. A., Cardoso, D. C., & Sotelino, E. D. (2021) Failure mode and strength prediction of laterally braced Litzka-type castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research, 184*, 106796. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106796>
- Doori, S., & Noori, A. R. (2021). Finite Element Approach for the bending analysis of castellated steel beams with various web openings. *ALKU Journal of Science, 3*(2), 38-49, ISSN: 2667-7814. <https://doi.org/10.46740/alku.88318>
- Elaiwi, S., Kim, B., & Li, L. Y. (2017). Bending analysis of continuous castellated beams. *The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)*, 28, IIsan (Seoul), Korea.
- Jiang, L. Y., Liu, M. X., & Kang, L. Q. (2012). Studies on in-plane stability behavior of arches with web openings. *Applied Mechanics and Materials, 193*, 1296-1299. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.193-194.1296>
- Mechanical APDL Element Reference, (2013). *Inc 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317*.
- Mehetre, A. J., & Talikoti, R. S. (2020). Effect of fillet radii on moment carrying capacity of sinusoidal web opening castellated steel beams in comparison with hexagonal web openings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 44*(1), 151-161. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00378-w>
- Morkhade, S. G., Lokhande, R. S., Gund, U. D., Divate, A. B., Deosarkar, S. S., & Chavan, M. U. (2020). Structural behaviour of castellated steel beams with reinforced web openings. *Asian Journal of Civil Engineering, 21*(6), 1067-1078. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00262-y>
- Nabil, A., Afefy, H. M., & Kassem, N. M. (2022). Ultimate capacity of reinforced concrete castellated beams subjected to external pre-stressing. *Engineering Structures, 250*, 113471. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113471>
- Pandey, D., & Rathour, T. S. (2021). Numerical analysis and validation with experimental method of castellated steel beams with hexagonal web opening. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management, 4*(3), 66-69.
- Pandya, S., & Dhankot, M. (2017). FE analysis of curved castellated girder for variable thermal condition. *International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering and Technology. Kalpa Publications in Civil Engineering, 1*, 192-197.

- Rajana, K., Tsavdaridis, K. D., & Koltsakis, E. (2020). Elastic and inelastic buckling of steel cellular beams under strong-axis bending. *Thin-Walled Structures*, 156, 106955. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106955>
- Singh, S. (2021). Static bending analysis of arbitrary supported steel beams with circular web opening using finite element method. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3700-3705. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.158>
- Subramanian, R., & Jagadeesan, K. (2021). Experimental analysis and study on shear performances of castellated beam chassis under three cases of stiffener. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.36909/jer.11907>
- Weidlich, C. M., Sotelino, E. D., & Cardoso, D. C. (2021). An application of the direct strength method to the design of castellated beams subject to flexure. *Engineering Structures*, 243, 112646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112646>
- Zaher, O. F., Yossef, N. M., El-Boghdadi, M. H., & Dabaon, M. A. (2018). Structural behaviour of arched steel beams with cellular openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 756-767. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.029>

Deneyap kart kullanarak pozisyonel uyku apnesi tespiti ve IoT uygulaması

Positional sleep apnea detection and IoT application by using Deneyap card

Harun SÜMBÜL*¹ 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Yeşilyurt Demir Çelik MYO, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Bölümü, 55330, Samsun

• Geliş tarihi / Received: 09.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 11.09.2023

Öz

Bu çalışmada, kalp-damar hastalıkları için risk oluşturabilen, hava yollarını tıkayan ve soluma ile ilgili en yaygın hastalıklardan olan Uyku Apnesi hastalığına tanı koymada kullanılacak non-invaziv bir tanı yöntemi geliştirilmiştir. Bu uygulama için yerli – milli imkanlar ile geliştirilen Deneyap Kart kullanılmıştır. Pozisyon ve apne tespitinde Deneyap kart üzerinde dahili olarak bulunan üç eksenli IMU ivmeölçer sensörü (LSM6DSM) kullanılmıştır. Uyku apnesi hastalığının test ölçümlerinin gerçekleştirileceği sembolik ama gerçeğe uygun bir ortam oluşturulmuştur. Bu kapsamda ölçümlerin yapılabilmesi için plastik bir bebek maket modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde hasta yatma pozisyonu, hangi yatma pozisyonunda kaç dakika kaldığı, gece boyunca ne kadar pozisyon değiştirdiği, hangi pozisyonunda apneye girdiği gibi hastaya ait birçok parametre başarılı bir şekilde ölçülmüş ve SD karta kaydedilmiştir. Ölçülen parametrelerin uzaktan izlenmesine imkân sağlayacak nesnelerin interneti (IoT) temelli bir sistem geliştirilerek veriler farklı ortamlara iletilerek başarılı bir şekilde izlenebilmiştir. Bu çalışma ile yerli-milli kartımız olan Deneyap Kart kullanarak bundan sonraki çalışmalara ışık tutabilecek öznel bir çalışma literatüre kazandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Deneyap kart, Nesnelerin interneti, Uyku apnesi, Yatış pozisyonu

Abstract

In this study, a non-invasive diagnosis that can be used to diagnose Sleep Apnea, which may pose a risk for cardiovascular diseases, obstruct airways and are the most common diseases related to breathing method has been developed. For this application, the Deneyap Card, which was developed with local and national facilities, was used. Three-axis IMU accelerometer sensor (LSM6DSM), which is built into the Deneyap card, is used as a detector. A symbolic but realistic environment has been created in which test measurements of sleep apnea disease will be carried out. In this context, a plastic doll model was used to make the measurements. As a result of the study, many parameters of the patient such as the patient's position, how long he lay in which position, how many times he changed positions during sleep, and in which position he entered apnea were successfully measured and recorded on the SD card. By developing an Internet of Things (IoT)-based system that will allow the remote monitoring of the measured parameters, the data can be successfully monitored by transmitting it to different environments. With this study, a subjective study that can shed light on future studies has been brought to the literature by using our local-national card, the Deneyap Card.

Keywords: Deneyap card, Internet of Things, Sleep apnea, Lying position

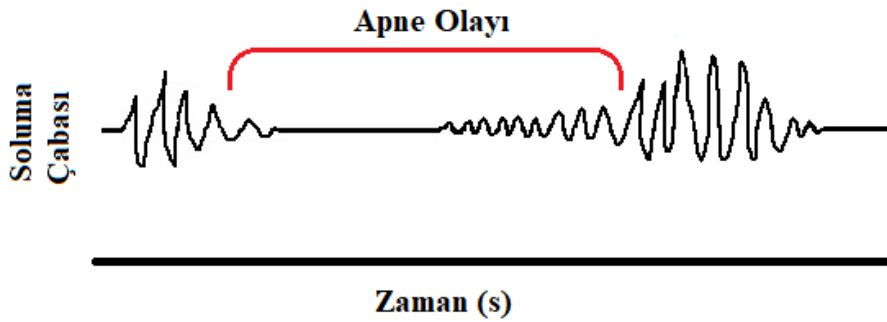
* Harun SÜMBÜL; harun.sumbul@omu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Uyku Apnesi, uyku esnasında tekrarlayan, üst solunum yolu tıkanmasıyla kendini gösteren ve bunun neticesinde de kandaki oksijen miktarının azalmasıyla kişiyi ölüme götürebilen önemli bir sağlık sorunudur. Uyku sırasında birden fazla apne atağı yaşanabilir ve her atak, kandaki satürasyon değerinde azalmaya sebep olur. Böylece kalp oksijen ihtiyacını karşılayabilmek için daha fazla çalışmak ve yorulmak durumunda kalacağından bu durum hastanın tansiyon değerlerini yükseltmek suretiyle vücut metabolizmasını bozmaktadır (Varady vd., 2003). Vücuttaki tüm sistemlerin oksijene ihtiyaç duyduğu bilindiğine göre oksijensiz kalmak hastayı ölümlü sonuçlandırmaya bile inme, hipertansiyon, kalp hastalığı, horlama, depresyon vb. hastalıkları tetikleyebilmektedir. Uyku apnesi yeni doğan bebeklerden oldukça ileri yaşlarda bulunan bireylere kadar herkeste görülebilen önemli bir halk sağlığı sorunu olup dünyada ve ülkemizde bu hatalıktan muzdarip milyonlarca hasta bulunmaktadır. Tanı konulan hasta sayısı kesin olarak bilinmemekle birlikte Türkiye’ de resmi verilere göre 1,6 milyona yakın Uyku Apnesi hastası bulunmaktadır (Uykuder, 2023).

Apne atakları, uyku sırasında solunum durması şeklinde kendisini gösterdiğinden gece hastalar nefessiz kaldıklarında aniden irkilerek uyanabilmektedir. Geçirilen apne atak sayısına bağlı olarak bu durum birçok kez tekrar ettiğinde ise kalitesiz bir uyku gündüz bireyi stresli ve agresif bir duruma da sokabilmektedir (Rasche vd., 1999). Bu hastalığın son dönemde kadın ve erkeklerde ciddi artış gösterdiği de bilinmektedir (Xie vd., 2012). Şekil 1’ de hastanın göğüs hareketinin devam ettiği ama uzunca bir süre hareketsiz (nefessiz) kaldıktan sonra tekrar tekrar nefes almaya başladığı apne durumu görülmektedir.



Şekil 1. Göğüs hareketi üzerinden apne olayının izlenmesi

Figure 1. Monitoring of apnea event through chest movement

Komada vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada uyku apnesi hastalığını üç ana gruba ayırmıştır [13]:

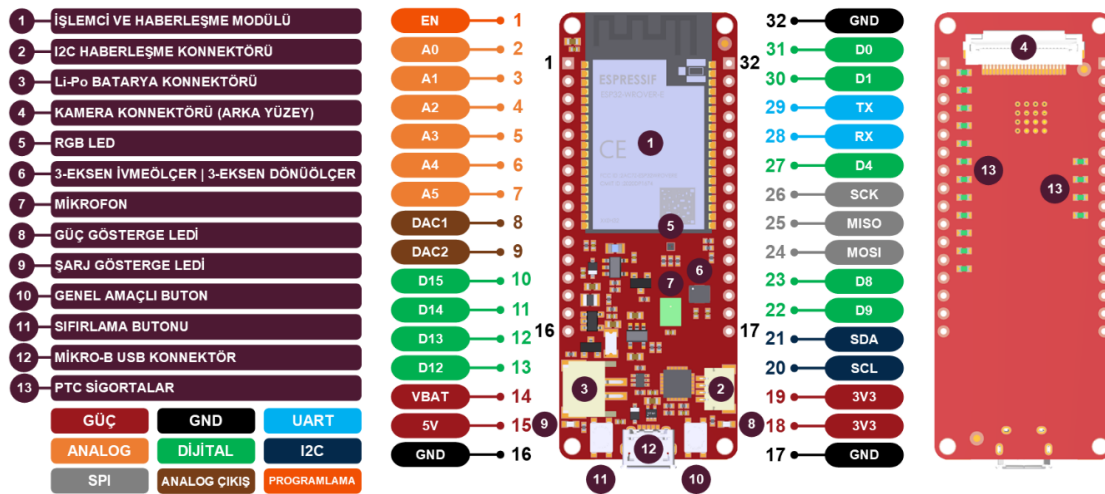
1. Tıkayıcı Uyku Apnesi (Obstructive Sleep Apnea – OSA):
2. Merkezi Uyku Apnesi (Central Sleep Apnea – CSA):
3. Bileşik Uyku Apnesi (Mixed Sleep Apnea – MSA):

Merkezi uyku apnesi hem solunum hareketlerinin hem de hava akımının 10 saniye ya da daha uzun süre tamamen kesilmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Teofilo vd., 2003). Bununla birlikte diyafram hareketlerinden apne tespiti sadece CSA tipi için uygundur. Bu çalışmada da CSA tip apne üzerinde durulmuştur. Uyku apnesi hastalığı kişilerin yaşam kalitesini de bozan ve henüz net bir tedavisi bulunmayan ve maalesef toplum içinde çok fazla bilinmeyen önemli bir hastalıktır. Özellikle son dönemde bu hastalığın teşhis ve tedavisine yönelik önemli çalışmalar yapılmışsa da henüz bu sorun tam manası ile çözüm bulmuş değildir. Teknolojinin gelişmesi ile önemli birçok çalışma yapılmış ve farklı yöntemler kullanılarak bu sorunun üzerine gidilmiştir. Literatürde giyilebilir teknolojiler üzerine gerçekleştirilen ve kas hareketlerinin izlenmesi; birtakım sensörler yardımı ile apne tespiti; yapay zeka, derin öğrenme gibi çeşitli makine öğrenme yöntemleri ile apne algılama algoritmalarının oluşturulması; apneli hastaların uzaktan takibi; akustik sinyaller ile apne anını tespit etme; elektrokardiyografi (EKG) yardımı ile apne bulma; abdomen ve toraks bölgeleri üzerinden Mikro Elektrik Mekanik Sistemler (MEMs) tabanlı yarı iletken ivmeölçerler yardımı ile diyafram hareketlerinin izlenmesi ve solunum takibi gibi apne tespitini inceleyen çalışmaların sayısı oldukça fazladır (Xu vd., 2021; Uriel vd., 2021; Hassan vd., 2022; Chen vd., 2022 ; Yüzer vd., 2020; Wisana vd., 2021; Sümbül vd., 2022; Mallegni vd., 2022; Pombo vd., 2020; Yüzer vd., 2020). Özellikle apne tespitinde ivme ölçer kullanımı son dönemde oldukça dikkat çeken ve başarılı sonuçlar veren yöntemler arasındadır. Nefes alıp verme sırasında göğüs ve karın bölgelerinde hareketler oluşmaktadır ve bu hareketler neticesinde ortaya çıkan statik ivme bilgisi (g kuvveti),

bir ivmeölçerler yardımı ile rahatlıkla izlenebilir (Sümbül vd., 2015). Algılayıcının referans konumu genellikle, XY eksenlerinin yere paralel olduğu (0g), Z ekseninin ise yere dik olduğu (1g) konumdur. İvmeölçer ile tespit edilen 3 eksenli (XYZ) ivme bilgisi, akciğere hava girip girmediği, dolayısı ile hastanın nefes alıp almadığı konusunda, yani apnenin saptanmasında kullanılan en güvenilir yöntemlerden birisidir (Kaimakamis vd., 2009). Bu eksen bilgileri ile aynı anda hasta yatış pozisyonu da tespit edilebilmektedir.

Bunun yanında özellikle yatış pozisyonuna bağlı uyku apnesi hastalığında (pozisyonel uyku apnesi) hasta yatış pozisyonu tespiti de oldukça önemli bir konudur (Sümbül vd., 2016). Yanlış uyku posturunda yatan kişilerde apne atağı geçirme ihtimali daha fazladır. Pozisyonel Apne her yaşta görülebilmesine rağmen bu konu bebekler için hayati öneme sahiptir. Çünkü bebekler uyurken farkında olmadan yüz üstü pozisyona gelebilirler ve henüz yutma refleksi tam olarak gelişmediği için kendi salyalarında boğulma riski taşırlar. Bu nedenle, bebeğin yaşamını kaybetme riskiyle karşı karşıya kalabileceği, nefessiz kalma ve uyku esnasında boğulma riskleriyle karşı karşıya olduğu unutulmamalıdır. Bu sebeple, bebeklerin güvenli bir yatış pozisyonu olan sırtüstü pozisyonda yatırılması ve bu pozisyonunun korunması gereklidir. Bebekler uyku sırasında kendi kendilerine pozisyon değiştirme eğiliminde olsalar bile, uykuya sırtüstü pozisyonda başlamaları önemlidir. Bu nedenle, bebeklerin uyku esnasındaki yatış pozisyonları devamlı olarak izlenmelidir (Genç, 2023). Yatma pozisyon algılama konusunda da yine MEMs tabanlı 3 eksenli yarıiletken ivme ölçerleri sıklıkla kullanılmaktadır (Oral vd., 2022).

Bu çalışmada uyku esnasında solunum sırasında göğüste oluşan diyafram kaynaklı hareketlerinin gözlenmesi yöntemi ile pozisyonel apne tespiti için yerli-milli olarak üretilmiş olan DENEYAP KART kullanılarak bir veri toplama ve kaydetme sistemi oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan Deneyap Kart elektronik geliştirme kartı, orjinal ESP32-WROVER-E modülü kullanılarak T3 (Türkiye Teknoloji Takımı) vakfının desteğiyle yerli teknoloji girişimi tarafından ülkemizin mühendislik kaynakları kullanılarak yerli-milli imkanlarla geliştirilmiştir. Kart, yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı projelerde de kullanılabilen, güçlü bir çift çekirdekli Tensilica Xtensa LX6 mikroişlemcisi içermektedir (Deneyap Kart, 2023). Şekil 2, Deneyap karta ait pin diyagramı ve teknik çizimi göstermektedir.



Şekil 2. Deneyap kart pin diyagramı ve teknik çizimi
Figure 2. Deneyap Card Pin Diagram and Technical Drawing

Deneyap kart kullanılarak geliştirilen devrede, 3 eksenli dijital çıkış verebilen, kart üzerine konuşlandırılmış bir dahili Çoklu Sensör Kartı (IMU) algılayıcısı (LSM6DSM) kullanılmıştır (Şekil 2' de 6 numaralı blok). Mems yapıda imal edilmiş bu yüksek hassasiyetli algılayıcı ile rahatlıkla $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g aralıklarında 3-eksen ivme ölçümü yapılabilmektedir. Algılayıcıdan alınan ivme bilgileri seri çevre birimi arayüzü (SPI) seri veri bağlantısı yöntemi kullanılarak mikrodenetleyici tarafından okunmuştur.

Algılayıcıdan alınan bilgiler, güvenli sayısal hafıza kartında (SD) saklanmakta ve aynı zamanda evrensel seri veriyolu (USB) aracılığıyla bilgisayara aktarılabilir. Solunum sinyallerinin yanı sıra hasta pozisyonu gibi bilgiler de ilgili veriler arasında yer almaktadır. Bu sayede hastanın solunum hareketlerinin ne zaman ve hangi pozisyonda yapıldığı kolayca takip edilebilmektedir. Bu veriler ayrıca cihazın üzerindeki sıvı kristal

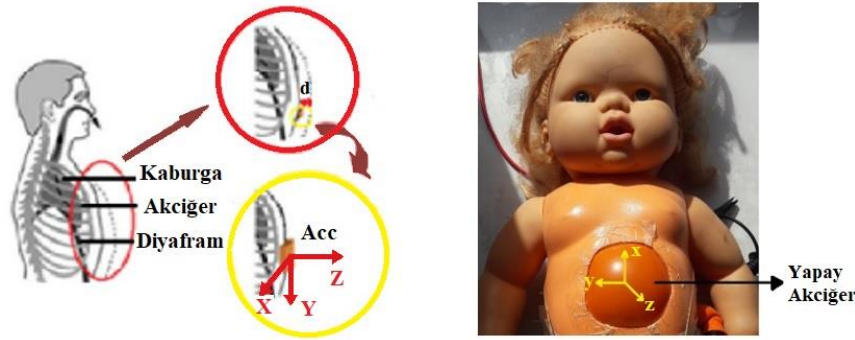
ekran (LCD) aracılığıyla da anlık olarak takip edilebilmektedir. Uyarılar tarafından apne durumu ve yatış pozisyonları tespit edilebilir hale getirilmiştir. Bu da sistemin Pozisyonel Uyku Apnesi çalışmalarında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Geliştirilen proje ile hem yatış pozisyonu hem de apne durumu başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Apne tespiti, daha zahmetsiz ve Pratik olarak diyafram hareketleri neticesinde ortaya çıkan ivmelenmeler üzerinden fizyolojik sinyal izleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yapılırken de akademik literatürde ilk kez yer alacak yerli-millî bir kart (deneyap kart) kullanılmıştır. Nitekim yapılan kapsamlı literatür taramasında Deneyap kart kullanılarak geliştirilen bir uygulama örneğine rastlanılmamıştır. Gerçekleştirilen proje bu yönüyle (ölçülen verilerin doktora kablosuz ulaştırılması) mevcut projelerden (PSG-Polisomnografi cihazlarından) ayrılmakta ve bir adım öne çıkmaktadır. Gerek yazılımı ve gerekse donanımı ile yerli ve millî olarak geliştirilen bu cihazın biyomedikal cihaz teknolojisinde önemli bir boşluğu doldurması beklenmektedir.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

Bu projede Deneyap kart üzerinde dahili halde bulunan LSM6DSM sensör kullanılarak respirasyon ve pozisyon durumları tespit edilmiştir. Kullanılan sensörün hasta toraks bölgesinde konumlandırıldığı bölge ve XYZ doğrultularında ivme verilerinin ölçülme yöntemi Şekil 3' de görülmektedir.



Şekil 3. Akciğer hareketlerinin 3 eksenli modellenmesi

Figure 3. 3-axis modeling of lung movements

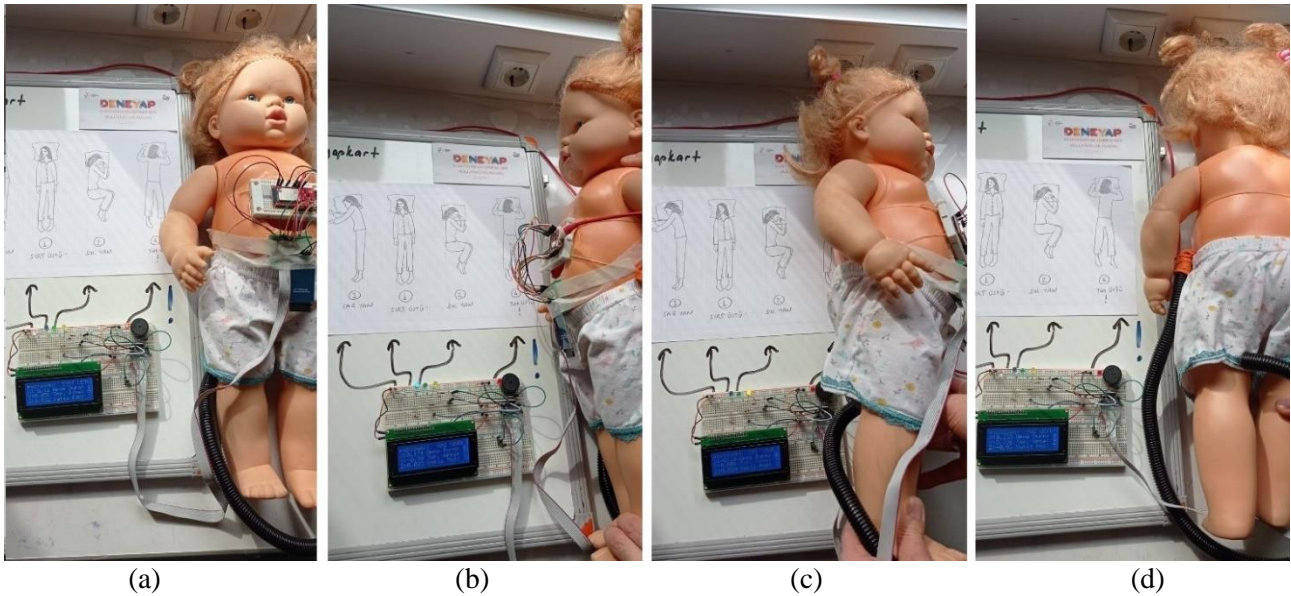
Çalışma ölçümlerin yapılabilmesi için Şekil 4' de görülen plastik bir bebek maket modeli kullanılmıştır. Diyaframı temsilen modelin göğüs bölgesi kesilmiş ve içerisine akciğeri temsilen plastik balon yerleştirilmiştir. Bu bölgeye de plastik hortum vasıtası ile solunmayı temsilen pompa kullanılarak hava akışı sağlanmıştır. Böylece modelin respirasyon (nefes alışveriş olayı) yapması sağlanmıştır. Sağlıklı bir birey soluma esnasında ciğerlerine ortalama 0.50 litre hava alır. Bununla birlikte akciğer hacim ve kapasiteleri yaş, boy ve cinsiyete göre farklılık gösterir. Uzun ve zayıf bireyler, kilolu bireylere göre daha büyük akciğer kapasitesine (vital kapasite) sahiptirler (Ardıç vd., 2012). Ölçüm sisteminin gerçek modele yakın ve uygun olabilmesi için bu parametrelere (bebek model boyu, akciğeri temsil etmek üzere bebek model içerisine yerleştirilen plastik balon elastiki yapısı ve fiziksel özellikleri, verilen hava hacmi vs.) azami dikkat edilmiştir. Böylece hazırlanan deney düzeneği için gerçek ortama yakın veriler kullanılmıştır.

Pozisyon ve apne olayı tespiti için kullanılacak LSM6DSM ivmeölçer, Deneyap kart üzerinde dahili bulunduğu için, kart modelin göğüs bölgesine üzerine sabitlenmiş ve bağlantı kabloları yardımı ile uzatılarak anakarta bağlanmıştır. Ölçüm düzeneği bu şekilde oluşturulmuştur. Çalışmada böyle bir model oluşturulduğundan etik belgesi alınmasına gerek kalmamıştır. Şekil 3'teki ölçümler, göğüs kafesi bölgesindeki ivmelenmenin (d mesafesindeki aksenal yer değişikliği) soluma sonucuyla elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin gerçek hastalar üzerinde de başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Geliştirilen projenin uygulanabilirliğini gösteren plastik model Şekil 4' de görülmektedir.



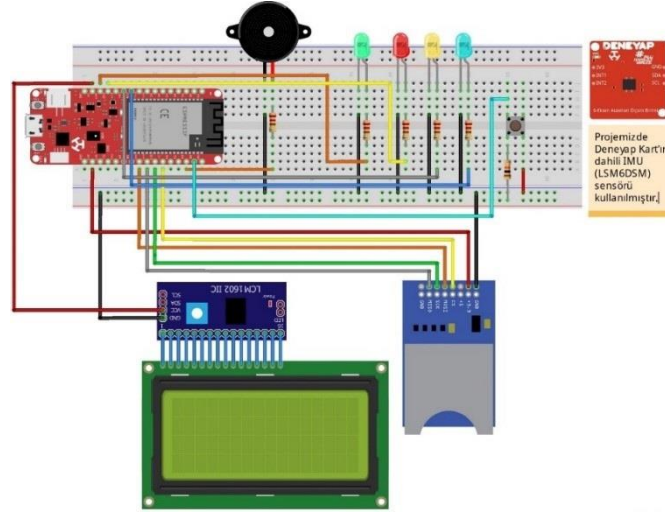
Şekil 4. Apne ve Pozisyon tespit deneme çalışmalarında kullanılan model
Figure 4. Model used in apnea and position detection trial studies

Ayrıca, pozisyon bilgisi elde etmek için her üç eksendeki ivme değerleri kullanılarak bir pozisyon algoritması geliştirilmiştir ve buna göre 4 farklı yatış pozisyon durumu tanımlanmıştır. Sırt üstü yatış için 1; sol yan yatış için 2; sağ yan yatış için 3 ve yüz üstü yatış içinde 4 bilgisi üretilmektedir. Hasta yatış pozisyon tespiti çalışmalarına ait görseller Şekil 5’ te verilmiştir.



Şekil 5. Deneyap Kart ile hasta yatış pozisyonu tespiti, sırt üstü (a), sağ yan (b), sol yan (c), yüz üstü (d).
Figure 5. Determination of Patient Living Position Using Deneyap card; supine (a), right side (b), left side (c), prone (d).

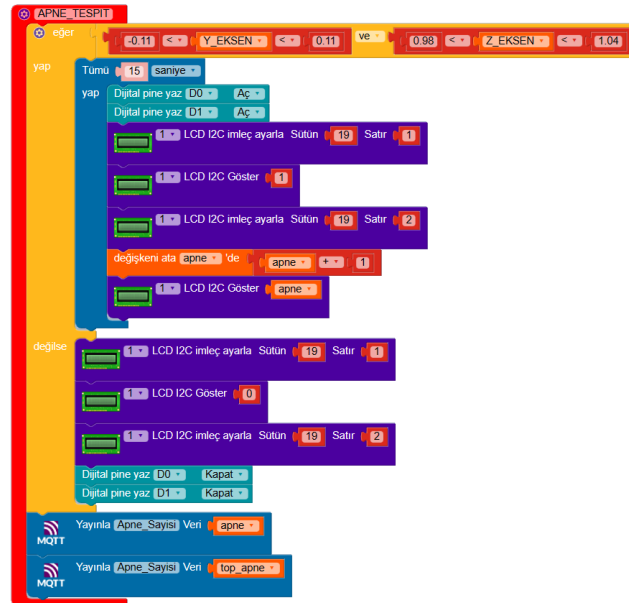
Şekil 6, fritzing programı kullanılarak oluşturulan devrenin şemasını göstermektedir.



Şekil 6. Devre fritzing şeması
Figure 6. Circuit fritzing scheme

Deneypap kart, programlanabilir bir kart olarak, çeşitli programlama dilleri ile programlanabilir. Bu diller arasında Arduino IDE, Blok, PlatformIO IDE ve MicroPython gibi popüler diller yer almaktadır. Bu çalışmada ise deneypap kart programlamak için deneypap blok kullanılmıştır. Deneypap Blok, Google Blockly'e dayanan ücretsiz ve açık kaynaklı bir görsel programlama dilidir.

Apne olayı, hastanın en az 10s süre ile nefessiz kalması olarak nitelendirilmektedir (Iber vd., 2007). Buradan yola çıkarak geliştirilen apne tespit algoritmasına göre hastanın nefes almama durumu, yani göğüs bölgesinde herhangi bir hareket olmama, ivme oluşmama durumu eğer 10 saniye ve üzeri sürdü ise bu durum apne olarak kabul edilmiştir. Kişiler uykularında birden fazla apneye girebildiklerinden, cihaz üzerinde görülen LCD üzerinden toplam apne sayısı bilgisi de verilmektedir. Böylelikle hastalar gece boyunca apneye kaç defa girdikleri ve hatta hangi pozisyonda kaç kez girdikleri bilgisini SD kart ve LCD üzerinden anlık olarak ta görebileceklerdir. Bu durum doktorlarında iş yükünü oldukça azaltacak ve kolaylaştıracak bilgileri ihtiva etmektedir. Bu kapsamda geliştirilen apne tespit algoritması blok programı da Şekil 7' de görülmektedir.



Şekil 7. Apne tespit algoritması blok kodları
Figure 7. Apnea detection algorithm block codes

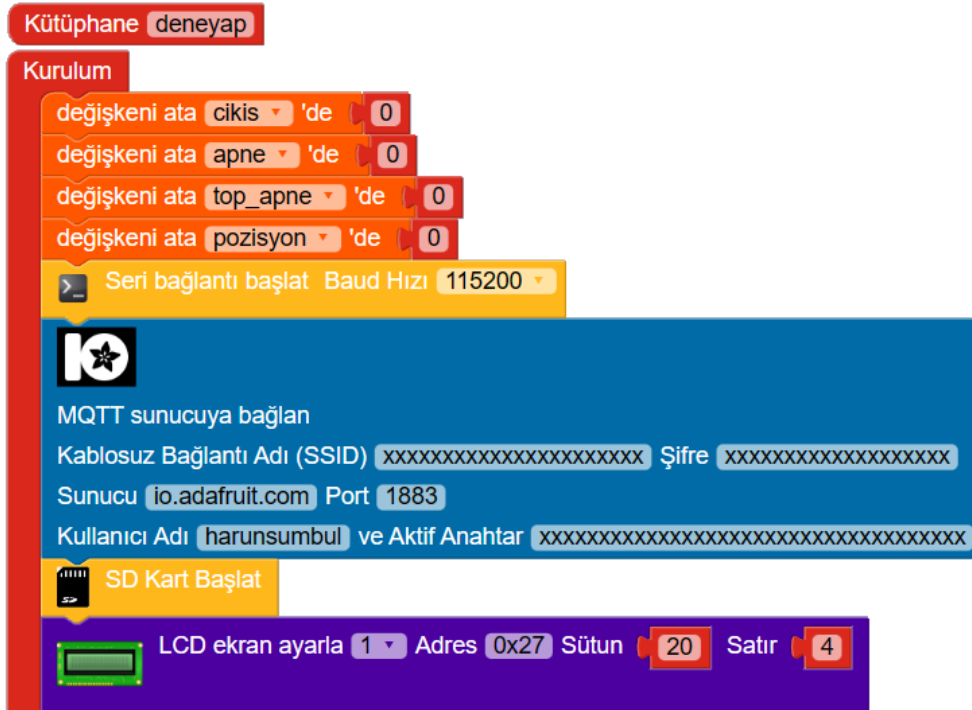


Şekil 8. Deneyap Blok kullanılarak geliştirilen pozisyon tespit algoritması
 Figure 8. Position Detection Algorithm Developed using Deneyap Block

Deneyap Blok kullanılarak geliştirilen pozisyon tespit algoritması Şekil 8’ de görülmektedir. Buna göre hasta, en tehlikeli yatma pozisyonu kabul edilen yüz üstü yatar pozisyona geçtiği anda cihaz üzerindeki sesli uyarı elemanı (buzzer) sesli uyarım vermektedir.

Nesnelerin İnterneti (IoT), farklı aygıtların internet, bluetooth gibi ağlar üzerinden birbirleriyle iletişim kurarak, veri toplama, işleme ve paylaşma yeteneklerine sahip olmalarını sağlayan bir kavramdır (Demir vd., 2018). Bu sayede, cihazlar arasındaki iletişim kolaylaşır ve verimlilik artar. IoT, birçok sektörde kullanılan ve hayatımızın birçok alanında etkisini gösteren bir teknolojidir. Kurulan devre yardımı ile ölçülen verilerin uzaktan başka bir ortama iletilmesi, çalışma için oldukça önemlidir. Zira uyku apnesine girmiş ve uzun süre bu durumda kalıp nefessiz kalan, benzer şekilde yüz üstü pozisyonda uzun süre kalıp pozisyon değiştiremeyen hastaların uzaktan takibi hayati öneme sahiptir. Bu verilerin kaydedilmesi, internet üzerinden iletilmesi ve teşhis konusunda doktora yardımcı olabilmesi açısından çalışmaya IoT özelliği eklenmiştir. Böylece doktorlar, uzaktaki hastalarına ait bir takım yaşamsal verileri (apne durumu, toplam apne sayısı, yatış pozisyon bilgisi, pozisyonel apne olayları vb.) kendi ekranlarından anlık olarak takip edebilmektedirler. Mevcut durumda bu işlem, hastanelerde bulunan uyku odalarında gerçekleştirilmektedir. Hastalar bu odalara alınır ve gerekli koşullar sağlanarak hastanın en az 8 saatlik uyuması sağlanarak hasta üzerinden veriler PSG (Polisomnografi) cihazı üzerinden kaydedilmektedir. Bu iş oldukça zahmetli ve maliyetli bir iştir. Zira ülkemizde hala çok az sayıda bulunan uyku odaları her gece için tek hastaya hizmet verebildiğinden ve ülkemizde uyku odasında teşhis konulmasını bekleyen çok fazla sayıda apne hastası bulunduğundan bu alanda yeni teknolojilerin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda gerçekleştirilen bu çalışma yerli milli imkanlar ile bu konudaki eksiklikleri ortadan kaldıracak niteliktedir.

Ölçülen verilerin kablosuz olarak farklı ortamlara iletimini sağlamak için bir internet sunucusuna ihtiyaç vardır. Bu çalışmada faydalanılan sunucu hizmeti, ücretsiz olarak sunulan <https://io.adafruit.com/> internet sitesinde bulunmaktadır (Adafruit, 2023). Ölçülen verilerin AdaFruit üzerinden alınabilmesi için verilerin tutulacağı gerekli sayfalar (Dashboard) oluşturulmuştur. Oluşturulan sayfa üzerinden verilerin anlık görüntülenip grafiğe aktarılması içinde “Line Chart” aracından faydalanılmıştır. Verileri iletebilmek için Şekil 9’ da verilen blok kodları oluşturulmuştur. Verilerin iletimi için son derece basit ve kullanımı kolay olan MQTT(Message Queuing Telemetry Transport) protokolü kullanılmıştır.

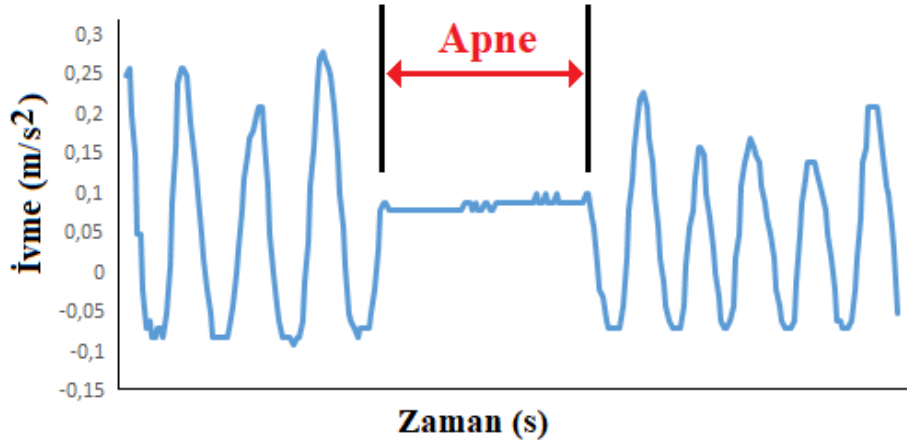


Şekil 9. IoT için AdaFruit MQTT bloğu dahil etme blok kodları
Figure 9. AdaFruit MQTT block inclusion block codes for IoT

3. Bulgular

3. Results

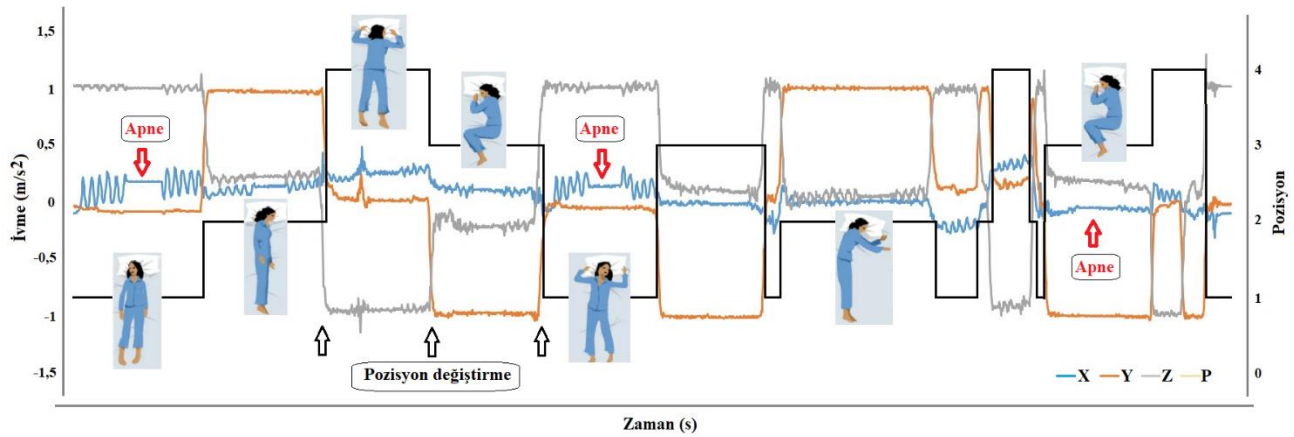
Apne tespiti için ivmeölçer modelin göğüs bölümüne yerleştirilmiş ve harici bir hava kaynağı ile modele inspirasyon ve ekspirasyon yaptırılmıştır. Apne olayını temsilen verilen hava 10s boyunca kesilmiş ve tekrar hava verilmeye başlanmıştır. Bu durumda ivmeölçer aracılığı ile veriler ölçülerek SD karta kaydedilmiştir. Kayıtlar analiz edildiğinde model yardımı ile apne olayının başarılı bir şekilde tespit edilebildiği görülmüş ve elde edilen apne grafiği Şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 10. İvmeölçer yardımı ile model üzerinden apne olayının ölçülmesi

Figure 10. Measuring the apnea event on the model with the help of the accelerometer

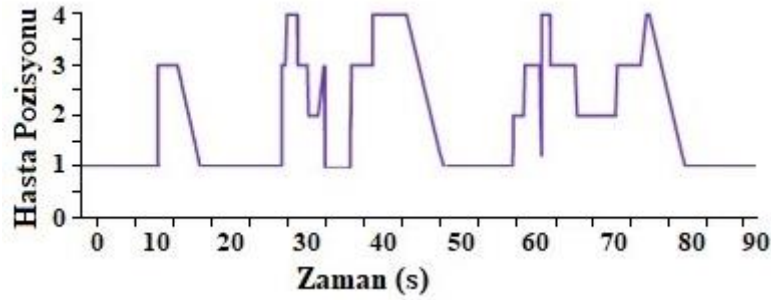
Şekil 11, geliştirilen sistem ile hasta pozisyonu ve pozisyona bağlı apne olaylarını göstermektedir. Şekil 11 dikkatle incelendiğinde hastanın uyku sırasında 16 defa pozisyon değiştirdiği ve pozisyona bağlı olarak ta 6 defa apneye girdiği belirgin bir şekilde görülmektedir. Benzer şekilde soluma sinyalleri de izlenmekte ve hastanın hangi pozisyonda iken kaç defa respirasyon yaptığı anlaşılabilir. Örneğin Şekil 11' e göre hasta sırt üstü pozisyonda iken 6 defa nefes alıp vermiş ve devamında apneye girmiştir. Apne çıkışında ise 5 kez nefes alıp verdikten sonra pozisyon değiştirmiş ve sol yan şeklinde uyumaya devam etmiştir.



Şekil 11. Geliştirilen sistem ile hasta pozisyonu ve pozisyona bağlı apne olayları

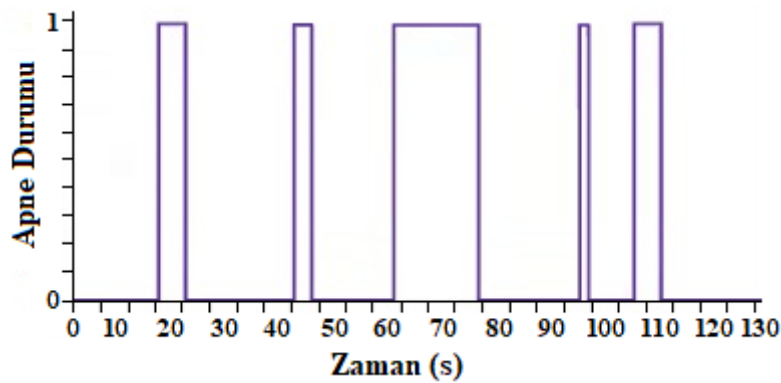
Figure 11. Measurement of patient position and position-related apnea events using the developed system

Ölçülen verilere uzaktan erişilebilmesi için geliştirilen adafruit ortamı ile modelin pozisyona girme ve apne sayıları örnek olarak sırası ile Şekil 12 ve Şekil 13' de verilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde hastanın 21 defa pozisyon değiştirdiği ve 4 defa tehlikeli kabul edilen yüz üstü yatış pozisyonunda kaldığı anlaşılmaktadır. (Burada hasta pozisyon bilgisi; 1: Sırt üstü yatış; 2: sol yan yatış; 3: sağ yan yatış, 4: yüz üstü yatış şeklinde etiketlenmiştir.)



Şekil 12. Adafruit ortamından hastanın pozisyon bilgisi grafiği
Figure 12. Patient position information graph from Adafruit environment

Şekil 13' de ise hastanın 5 defa apneye girdiği ve farklı sürelerde apnede kaldığı görülmektedir. (Burada Apne durum bilgisi; 1: Apne VAR; 0: Apne YOK şeklinde etiketlenmiştir.)



Şekil 13. Adafruit ortamından apne bilgisi grafiği
Figure 13. Apnea info graph from Adafruit environment

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu araştırmada, Uyku Apnesi hastalığından kaynaklanan solunum problemlerinin tanısında kullanılacak, yerli ve milli kaynaklar kullanılarak geliştirilen bir biyomedikal ölçüm ve uyarım cihazı tasarlanmıştır. Algılayıcı olarak, Deneyap Kart'ta bulunan dahili IMU sensörü (LSM6DSM) kullanılmıştır. Literatürde apne tespit yöntemleri ile alakalı birçok çalışma bulunmasına rağmen apne anını tek bir algılayıcı ile tespit edip sonuçları da kablosuz aktaran çok az çalışma bulunmaktadır. Gerçekleştirilen proje bu yönüyle (ölçülen verilerin doktora kablosuz ulaştırılması) mevcut projelerden (PSG cihazlarından) ayrılmakta ve bir adım öne çıkmaktadır. Tanı konmayan çoğu uyku apnesi hastaları için zamanında teşhis oldukça önemli bir sorundur. PSG kaydı teknik uzmanlık gerektiren, yoğun emek isteyen ve zaman alan pahalı ve karmaşık bir işlemdir. Ülkemizde çok yaygın olmayan ve bu yüzden aylar sonrasına randevu verebilen uyku odaları ve oldukça pahalı olan PSG cihazları, mevcut durumun en önemli dezavantajlarıdır. Sunulan çalışmada gerek yazılımı ve gerekse donanımı ile yerli ve milli olarak geliştirilen bu cihazın biyomedikal cihaz teknolojisinde önemli bir boşluğu doldurması beklenmektedir.

Uyku Apnesi hastalığına ön tanı koyabilecek araştırmanın yapıldığı bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Algılayıcının pozisyonu en uygun şekilde belirlenmiştir.
- Bebekler için yatma pozisyonunun takibi ve bunun önemi, deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.
- Hastanın yattığı pozisyon, ne kadar süre boyunca o pozisyonda kaldığı ve kaç kez pozisyon değiştirdiği gibi birçok pozisyonel parametre, başarılı bir şekilde ölçülmüştür ve daha sonra bu verilerin analiz edilebilmesi için SD karta kaydedilmiştir.
- Ölçülen parametrelerin uzaktan izlenmesine imkân sağlayacak IoT temelli bir sistem geliştirilerek veriler farklı ortamlara iletilerek başarılı bir şekilde izlenebilmiştir.

- Doktorlar için uzaktan hasta takibine yönelik yerli-milli bir medikal cihaz geliştirilmiştir.
- Bu çalışma ile yerli-milli kartımız olan DENEYAP KART kullanarak bundan sonraki çalışmalara ışık tutabilecek öznel bir çalışma literatüre kazandırılmıştır.

İleriki çalışmalar olarak ise aşağıdaki özelliklerin eklenmesi düşünülmektedir;

- Apne hastaları için titreşime dayalı bir uyarım tekniği geliştirme,
- Geliştirilen cihazın, apne durumunda hastayı uyarıcı bir sesli alarm özelliği zaten bulunmaktadır. Ancak, daha fazla güvenlik sağlamak için, uykusu ağır olan hastalar için uyarı sistemini geliştirmek için çalışmalar yapılabilir. Örneğin, hareket sensörleri veya basınç sensörleri kullanarak, hastanın yatağından çıktığında veya aşırı hareket ettiğinde alarm sistemi otomatik olarak devreye girebilir. Böylece, hasta yakını daha hızlı bir şekilde uyarılabilir ve gerekli müdahaleler yapılabilir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi'nin Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinatörlüğü tarafından PYO.YMY.1908.23.001 numaralı proje ile finanse edilmiştir. Makale, inceleme ve değerlendirme aşamalarında Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi editör ve hakemlerinin yapmış olduğu katkılardan dolayı teşekkür ediyoruz.

Yazar katkısı

Author contribution

Çalışmada bir başka yazarın katkısı yoktur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

References

Adafruit. (2023). <https://io.adafruit.com/harunsumbul/wippersnapper>

Ardıç, S., Demir, A. U., Hikmet, F., Oktay, B., Darılmaz, Y. G., Zübeyir, Y., Pınar, A., Cengiz, Ö., & Bardakçı, M. G. (2015). Chronic obstructive pulmonary disease and obstructive sleep apnea symptoms: an outpatient-based population study in Turkey. *Turkish Journal of Geriatrics, 15*(2),142-150.

Chen, E. X., Chen, Y., Ma, W., Fan, X., & Li, Y. (2022). Toward sleep apnea detection with lightweight multi-scaled fusion network. *Knowledge-Based Systems, 247*, 108783. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108783>

Demir, A.K., & Abut, F. (2018). Grid ağ topolojilerinde CoAP ve CoCoA tıkanıklık kontrol mekanizmalarının karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 53-60*. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.436056>

Deneyap Kart. (2023) <https://docs.deneyapkart.org/tr/content/contentDetail/deneyap-kart>

Genç, Y. (2023), <https://www.medikalakademi.com.tr/bebeklerde-uyku-pozisyonu-nasil-olmalı/>

- Hassan, O., Paul, T., Shuvo, M.H., Parvin, D., Thakker, R., Chen, M., Mosa, A. S. M., & Islam, S. K. (2022). Energy efficient deep learning inference embedded on FPGA for sleep apnea detection. *Journal of Signal Processing Systems*, 94, 609–619. <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01722-7>
- Iber, C. (2007). The AASM manual for the scoring of sleep ve associated events : rules. terminology and technical Specification, <https://ci.nii.ac.jp/naid/10024500923>.
- Kaimakamis, E., Bratsas, C., Sichletidis, L., Karvounis, C., & Maglaveras N. (2009). Screening of patients with obstructive sleep apnea syndrome using C4.5 algorithm based on nonlinear analysis of respiratory signals during sleep. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis, MN, USA*, 3465-3469. <http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5334605>.
- Komada, Y., Takaesu, Y., Nishida, S., Sasai, T., Furudate, N., & Inoue, Y. (2013). Comparison of clinical features between primary and secondary sleep-related eating syndrome. *Sleep Medicine*, 14S, e165–e238. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2013.11.404>
- Mallegni, N., Molinari, G., Ricci, C., Lazzeri, A., Rosa, D. L., Crivello, A., & Milazzo, M. (2022). Sensing devices for detecting and processing acoustic signals in healthcare. *Biosensors*, 12(10), 835. <https://doi.org/10.3390/bios12100835>
- Oral, O., Bilgin, S., & Ak, M. U. (2022). Evaluation of vibration signals measured by 3-Axis MEMS accelerometer on human face using wavelet transform and classifications. *Tehnički vjesnik*, 29(2), 355-362. <https://doi.org/10.17559/TV-20210820150837>
- Pombo, N., Silva, B. M. C., Pinho, A. M., & Nuno Garcia. (2020). Classifier precision analysis for seep apnea detection using ECG signals. *IEEE Access*, 8, 200477-200485. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036024>
- Rasche, K., Duchna, H. W., Lauer, J., Orth, M., Kotterba, S., Bauer, T. T., Gillissen, A., & Schultze-Werninghaus, G. (1999). Obstructive sleep apnea and hypopnea efficacy and safety of a long-acting beta2-agonist. *Sleep and Breathing*, 3(4),125–129. <https://doi.org/10.1007/s11325-999-0125-1>
- Sümbül, H., & Yüzer A. H. (2016). 3D monitoring of lying position for patients with positional sleep apnea syndrome. *Journal of New Results in Science*, 12(2016), 59–76. <http://dergipark.gov.tr/jnrs/issue/27333/287730>
- Sümbül, H., & Yüzer A. H. (2015). Measuring of diaphragm movements by using iMEMS acceleration sensor. *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2015)*, Bursa, Turkey, 166-170. <https://doi.org/10.1109/ELECO.2015.7394532>
- Sümbül, H., Yüzer, A.H., & Şekeroğlu, K. (2022). A novel portable real-time low-cost sleep apnea monitoring system based on the global system for mobile communications (GSM) network. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 60, 619–632. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02492-x>
- Teofilo L., & Lee-Chiong, Jr. (2003). Monitoring respiration during sleep. *Clinics in Chest Medicine*, 24(2), 297-306, [https://doi.org/10.1016/s0272-5231\(03\)00021-2](https://doi.org/10.1016/s0272-5231(03)00021-2).
- Uriel, M. H., Benjamin, M., Tareq, A., Leen, J., James, M. & Dingguo, Z. (2021). Wearable assistive robotics: a perspective on current challenges and future trends. *Sensors*, 21(20),6751. <https://doi.org/10.3390/s21206751>
- Uykuder. (2023). <https://www.ntv.com.tr/saglik/turkiyede-1-5-milyon-kisinin-uykusu-bozuk,A1xsZ8gyOUqh-Ppyq3D-KQ>
- Varady, P., Bongar, S., & Benyo, Z. (2003). Detection of airway obstructions and sleep apnea by analyzing the phase relation of respiration movement signals. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 52(1),2-6. <https://doi.org/10.1109/TIM.2003.809095>

- Wisana, I. D. G. H., Nugraha, P. C., & Estiwidani, D. (2021). The effectiveness obstructive sleep apnea monitoring using telemedicine smartphone system (TmSS). *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 50, 113–121. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jbbbe.50.113>
- Xie, B., & Minn, H. (2012). Real-time sleep apnea detection by classifier combination. *IEEE Transactions On Information Technology In Biomedicine*, 16(3),469-477. <https://doi.org/10.1109/TITB.2012.2188299>
- Xu, J., & Yuan, K. (2021). Wearable muscle movement information measuring device based on acceleration sensor. *Measurement*. 167(108274). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108274>
- Yüzer, A. H., Sümbül, H., & Polat, K. (2020). A novel wearable real-time sleep apnea detection system based on the acceleration sensor. *IRBM Innovation and Research in BioMedical engineering*, 41(1), 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2019.10.007>
- Yüzer, A. H., Sumbul, H., Polat, K., & Nour, Majid. (2020). A different sleep apnea classification system with neural network based on the acceleration signals. *Applied Acoustics*, 163,107225. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107225>

Jeomorfik indislerle Varto Havzası'nı (Muş) denetleyen fayların göreceli tektonik aktivitesinin belirlenmesi

Determination of relative tectonic activity of faults controlling Varto Basin (Muş) by geomorphic indices

Vedat AVCİ *¹ , Murat SUNKAR ² 

¹ Bingöl Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 12000, Bingöl

² Fırat Üniversitesi, İnsani ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 23000, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 29.04.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 15.09.2023

Öz

Bu çalışmada Varto Havzası'nı denetleyen fayların göreceli tektonik aktivitesinin jeomorfik indislerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Varto Havzası, Karlıova'nın güneydoğusunda Bingöl Dağı ile Şerafettin Dağı arasında yer almaktadır. Havzanın oluşumunda, Karlıova'da, Doğu Anadolu Fayı ile kesişen, Kuzey Anadolu Fayı'nın güneydoğuya doğru devamı niteliğinde olan Varto Fayı etkili olmuştur. Bu konumu nedeniyle havza ve çevresinde tektonik hareketlilik çok yüksektir. Havzanın genç tektonik hareketi jeomorfik indis analizleri yöntemiyle ortaya konulmuştur. Bu analizlerde sayısal yükselti modeli (sym), akarsu, fay ve jeoloji verileri temel veri seti olarak kullanılmıştır. Havza çevresi ve Varto Fay Zonu (VFZ) üzerinde tektonik aktiviteyi yansıtan toplam 43 alt havza belirlenmiştir. Bu amaçla hipsometrik integral (Hi), hipsometrik eğri (He), havza asimetri faktörü (AF), drenaj havzası şekli (Bs), akarsu uzunluk-gradyan indeksi (SL), yatak kıvrımlılığı (S) ve uzama oranı (Re) analizleri yapılmıştır. Havza analizleri ile birlikte aktif tektoniğin belirlenmesinde sık kullanılan dağ önü sinüslülük oranı (Smf) ve vadi tabanı genişliği-vadi yüksekliği oranı (Vf) ölçümleri ile havzadaki akarsuların boyuna profil analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre havzaların tektonik aktivite sınıfları belirlenerek dağılımları gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre havza güneyindeki iki küçük havza ile VFZ'deki bir havza dışındaki diğer havzaların tamamı çok yüksek ve yüksek tektonik aktivite sınıfında yer almaktadır. İndis sonuçları, yaşanan depremler, fay zonu boyunca çıkan sıcak ve soğuk kaynakları, jeomorfolojik şekiller Varto Havzası ve çevresinde aktif tektoniğin güçlü olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Göreceli tektonik aktivite, Jeomorfik indis, Varto Fay Zonu (VFZ), Varto Havzası

Abstract

In this study, it is aimed to determine the relative tectonic activity of faults controlling Varto Basin with geomorphic indices. Varto Basin is located in the southeast of Karlıova, between Bingöl and Serafettin Mounts. Varto Fault, which intersects with the East Anatolian Fault in Karlıova and the continuation the North Anatolian Fault towards southeast, has been effective in the formation of the basin. Being right lateral strike slip, Varto Fault starts in the east of Karlıova Triple Junction and continues towards southeast in the form of a zone. Due to this location, tectonic activity in and around the basin is very high. The young tectonic movement of the basin has been revealed by geomorphic index analysis method. In these analyses, digital elevation model (DEM), stream, fault and geology data were used as the basic data set. A total of 43 sub-basins reflecting tectonic activity have been identified around the basin periphery and on Varto Fault zone (VFZ). For this purpose, hypsometric integral (Hi), hypsometric curve (Hc), basin asymmetry factor (AF), drainage basin shape (Bs), stream length-gradient index (SL), channel sinuosity (S) and elongation ratio (Re) analyses were performed. Along with the basin analyses, the measurements of mountain front sinuosity ratio (Smf) and valley floor width-to-valley height ratio (Vf), which are frequently used in the determination of active tectonics, and streams longitudinal profile analyses were done in the basin. According to the results of the analyses, tectonic activity classes of the basins were determined and their distributions were shown. According to these results, except for the two basins in the south of the Varto basin and one located in the VFZ, all others fall into very high and high tectonic activity classes. Index results, earthquakes, hot and cold sources along the fault zone and geomorphological figures prove that active tectonics are intense in and around Varto Basin.

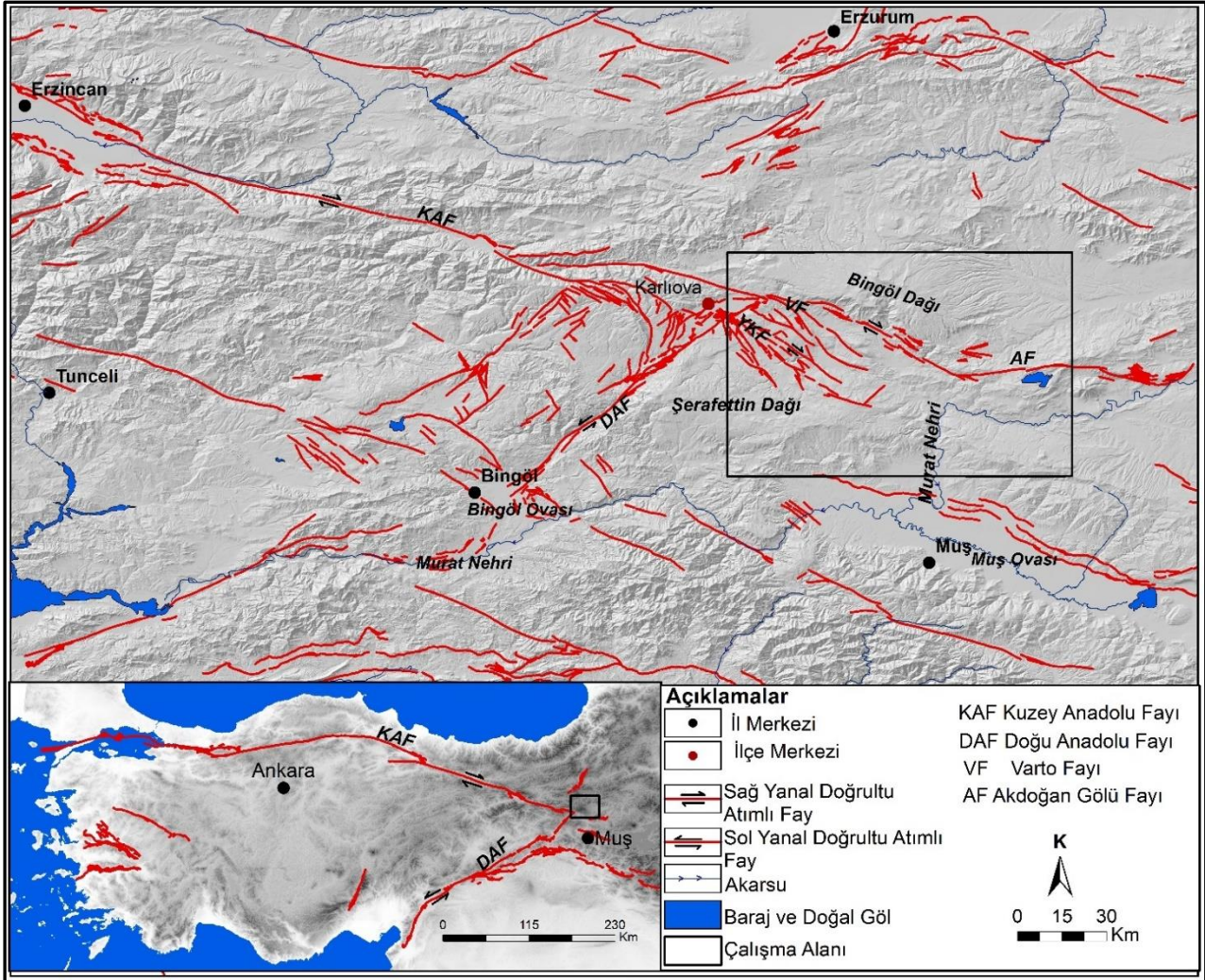
Keywords: Relative tectonic activity, Geomorphic indices, Varto Fault Zone (VFZ), Varto Basin

* Vedat AVCİ; vavci@bingol.edu.tr

1. Giriş

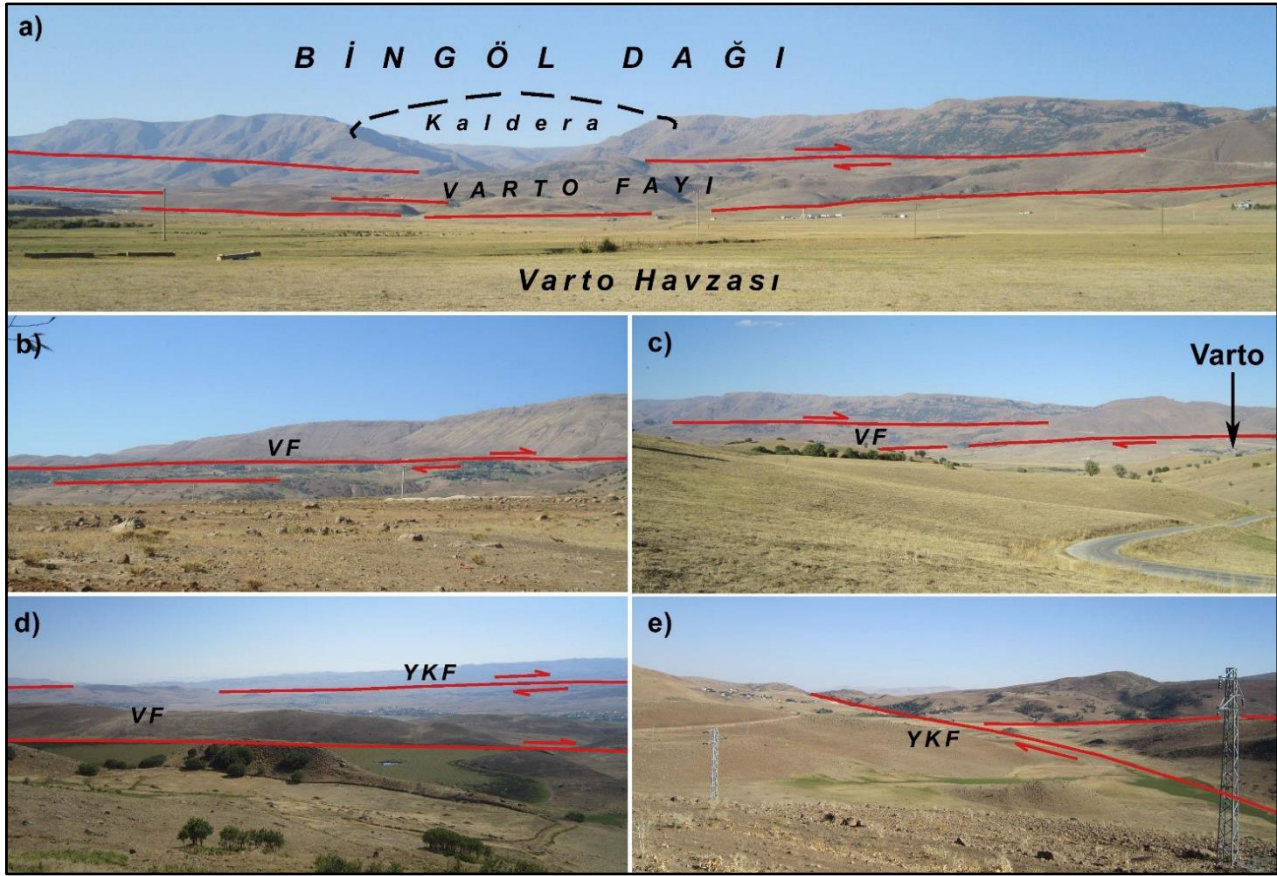
1. Introduction

Varto Havzası, Muş Ovası'nın kuzeyinde kalkan şekilli Bingöl Dağı ile plato görünümlü Şerafettin Dağı arasında yer almaktadır. Karlıova doğusunda, KB-GD doğrultusunda uzanan Varto Havzası, Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) güneydoğuya doğru devamını oluşturan Varto Fayı Zonu (VFZ) üzerinde yer almaktadır (Şekil 1, 2). Varto Fay Zonu içerisinde yer alan Varto Havzası, KB-GD doğrultusunda 12 km genişliğinde 40 km uzunluğunda, 1450-1550 m yükseltileri arasında yer almaktadır (Mirze, 2013; Avcı & Sunkar 2017).



Şekil 1. Varto Havzası'nın lokasyon haritası. Faylar, Emre vd. (2013)'den alınmıştır
Figure 1. Location map of Varto Basin. Faults, were taken from Emre et al. 2013

Varto Havzası'nın, KAF ve Doğu Anadolu Fayı'nın (DAF) kesiştiği Karlıova Üçlü Ekleminin doğusunda yer alması, KAF'ın güneydoğuya doğru devamı niteliğinde VFZ'nin varlığı ve geçmişte yaşanan büyük depremler tektoniğin çok aktif olduğunu göstermektedir. VFZ ve güneyinde bu zona paralel uzanan Yorgançayır-Kaynarca Fay Zonu (YKFZ), Karlıova Üçlü Ekleminin güneydoğusunda ciddi deformasyonlara neden olarak topografyaya yansımıştır. İki fay zonu boyunca tektoniğin jeomorfolojiye yansımaları ve göreceli tektonik aktivitenin belirlenmesi amacıyla toplam 43 akarsu havzasında jeomorfik indis analizleri uygulanmıştır. VFZ ile YKFZ arasında belirgin bir sınır olmadığından iki zon adeta birbirine girmiş durumdadır. Bu nedenle güneydeki 13 havzanın YKFZ üzerinde kaldığı izlenimi oluşsa da seçili havzaların hepsi VFZ üzerinde kalmaktadır.



Şekil 2. Bingöl Dağı güney yamaçlarını kesen ve KAF'ın doğuya devamını oluşturan Varto Fayı (VF) (a). Fayın Bingöl Dağı batısında kalan bölümü (b) ve doğusunda kalan bölümleri (c). Varto Havzası kuzeyinde VF ve güneyindeki YKF (d. e)

Figure 2. Varto Fault (VF) (a), which cuts the southern slopes of Mount Bingöl and forms the eastern continuation of the NAF(a). The part of the fault to the west of Bingöl Mountain (b) and the parts to the east (c). VF in the north of Varto Basin and YKF in the south (d. e)

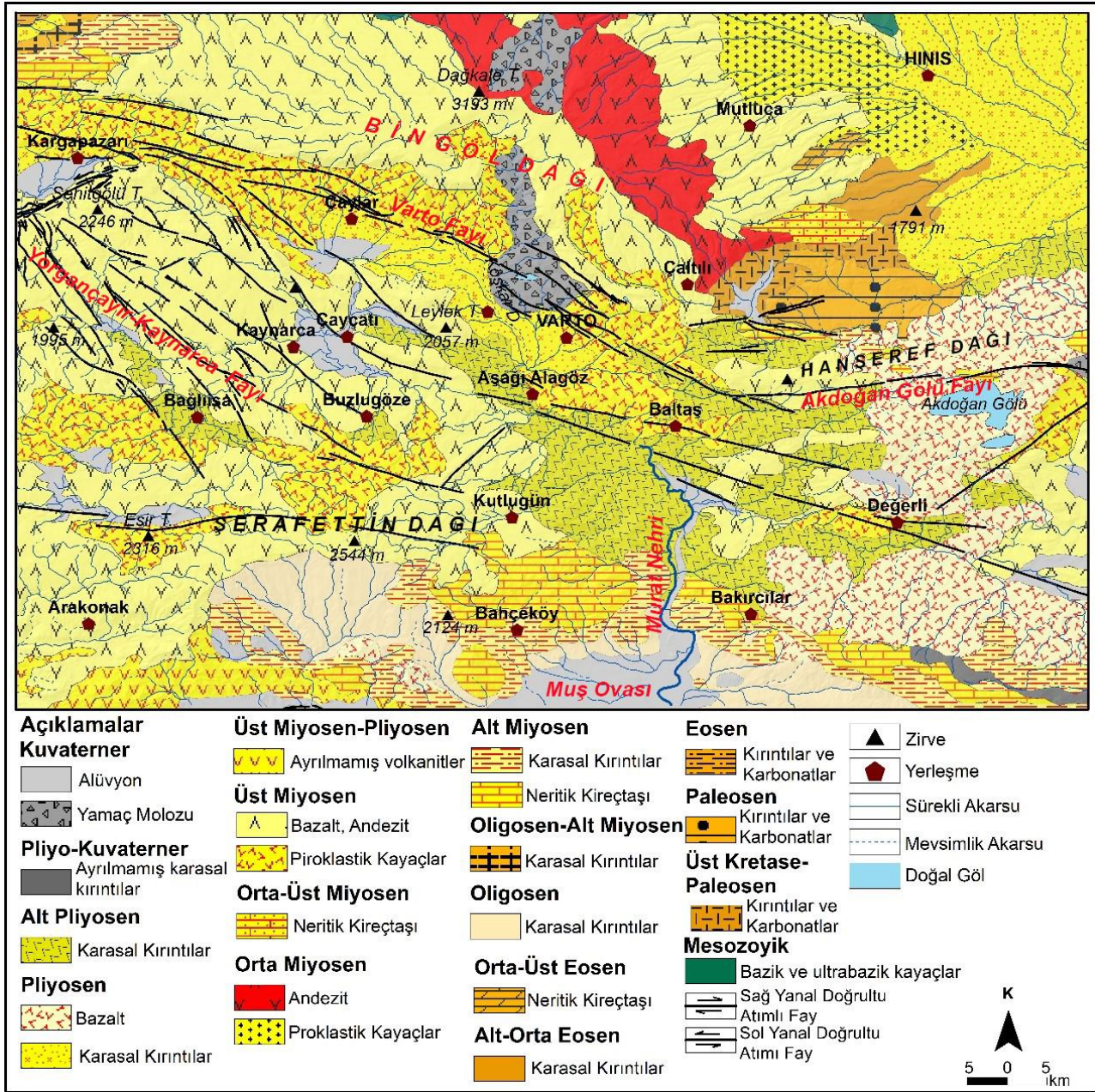
Arazi çalışmaları ile fayların aktiflik derecesi belirlendiği gibi farklı indis analizleriyle de bu özellikler belirlenebilmektedir. Varto Havzası'nın tektonik aktivitesini belirlemeye yönelik olarak yapılan ilk analiz sonuçları 2017 yılında Türk Coğrafya Kurumu tarafından düzenlenen sempozyumda sözlü bildiri olarak sunulmuş ve tam metin olarak basılmıştır (Avci & Sunkar 2017). Ancak daha sonra yapılan detaylı analizlerde tektonikten etkilenen havzaların daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum dikkate alınarak akarsu havza sınırları yeniden çizilmiş, analizlere daha fazla havza dahil edilerek bulguları bu makalede sunulmuştur.

1.1. Varto Havzası ve çevresinin jeolojik özellikleri

1.1. Geological characteristics of Varto Basin and its surroundings

Varto Havzası ve çevresinin en önemli jeolojik özelliği yaşlı litolojilerin genç birimler tarafından örtülü olması ve kırıklı yapıların yaygın olmasıdır. Bu genel durum dışında genç volkanik birimlerin geniş alan kaplaması dikkat çekmektedir (Şekil 3). Varto-Hınıs arasında sınırlı alanlarda yüzeyleyen Mesozoyik ve Paleojen dönemine ait temel kayalar dışında kalan alanların büyük bölümü Miyosen-Pliyosen dönemi volkanitlerinden oluşmaktadır. Hınıs kuzeyinde sınırlı bir alanda yüzeyleyen Mesozoyik bazik ve ultra bazik kayalar ile Varto doğusunda Üst Paleosen-Kretase ile Eosen kırıntılı ve karbonatlar temel kayalarıdır. Varto Havzası güneyinde, Muş Havzası kuzeyinde ise Eosen-Oligosen neritik kireçtaşları ile karasal kırıntılar yüzeylemektedir. Varto Havza tabanı ile Varto güneyinde Pliyosen karasal kırıntıları dışındaki diğer alanlarda Miyosen-Pliyosen bazalt, andezit ve piroklastik kayalardan oluşan birimler yüzeylemektedir (Tarhan, 2002). Bingöl Dağı ile Muş Ovası arasında Miyosen-Pliyosen dönemini temsil eden genç volkanik birimlerin geniş alan kaplaması bu dönemde volkanik faaliyetin yaygınlığını göstermektedir.

Ova ve havza tabanlarında sınırlı alanlarda görülen Kuvaterner birimleri, ova tabanlarında alüvyonlardan, havza ve vadilerde ise genç alüvyon ve yelpaze dolgularından oluşmaktadır. Bingöl Dağı güneyindeki yamaç molozları heyelan enkazından, kuzeyindekileri ise [Tonbul \(1997\)](#)'a göre morenlerden oluşmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Varto Havzası ve çevresinin jeoloji haritası. Litolojik birimler [Tarhan \(2002\)](#)'den, faylar ise [Emre vd. \(2012\)](#)'den alınmıştır

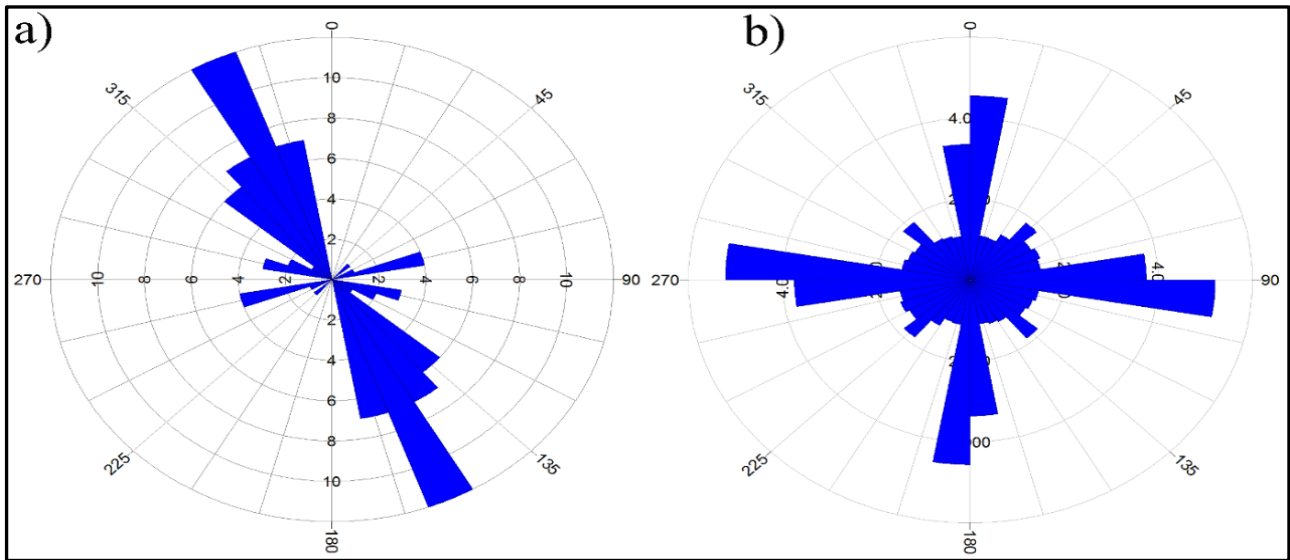
Figure 3. Geological map of Varto Basin and its environment. Lithological units are from [Tarhan \(2002\)](#), faults are from [Emre et al. \(2012\)](#)

Bingöl Dağı ile Muş Ovası arasında en önemli yapısal unsuru VFZ ile YKFZ oluşturmaktadır. [Herece \(2008\)](#)'e göre DAF, Kargapazarı doğusunda Bahri Gölü'nün kuzeyinde doğuya doğru bir büküm yaparak sönmelenirken, KAF güneydoğu yönünde belirsizleşerek Köprücük köyüne doğru uzanmaktadır. Bahri Gölü'nün kuzeyinden doğuya doğru belirgin, sağ yanal doğrultu atımlı olan ve birbirine paralel uzanan fayların bulunduğu alan VFZ'yi oluşturmaktadır. VFZ, Kargapazarı doğusundan başlayıp Baltaş doğusunda kadar devam eden 2-13 km genişliğinde bir zon halinde görülmektedir. En kuzeyde yer alan Varto Segmenti, KB-GD doğrultusunda sağyanal doğrultu atımlı iken Leylekdağ Segmenti ve Çaycağı Segmenti ise bindirme bileşenli doğrultu atımlı sağ yönlü fay karakteri göstermektedir ([Akyüz vd., 2010](#)). VFZ'nin segmentleri inceleme alanında ötelenmiş vadi, kapatıcı sırt, basınç sırtı, çizgisel vadi, çizgisel çöküntü alanları ve

heyelanlarla morfolojiye yansımıştır. Bingöl Dağı yamaçlarından kaynağını alan Köşkar Deresi'nde ötelenme miktarı yaklaşık 2.5 km'dir. Çaylar kasabasının doğusundaki dereler ile Kaynarca Deresi vadisinde 1 km'yi aşan ötelenmeler görülmektedir (Mirze, 2013).

Varto Havzası güneyinde sağ yanal doğrultu atımlı faylardan oluşan alan ise YKFZ olarak tanımlanmıştır. Varto Havzası çevresinde bu ana zonların dışında, üzerlerinde oldukça fazla genişlemeli yapıların (belverme gölcüğü gibi) olduğu KB-GD doğrultulu sağ yanal atımlı başka faylar da bulunmaktadır (Akyüz vd., 2010). YKFZ, Şehitgölü Tepe güneyinden başlayıp, Şerafettin Dağı kuzeyine kadar KB-GD doğrultusunda genişliği 1-10 km arasında değişen bir zon boyunca görülmektedir. Bu zonda yer alan fayların genç bazaltları kesmesine bağlı olarak belirgin çizgisel vadiler ve çizgisel çöküntü alanları gözlenmektedir.

Varto doğusunda Hanşeref Dağı güneyi ile Akdoğan Gölü arasında görülen fayların bulunduğu alan, "Akdoğan Gölü Fay Zonu" olarak adlandırılmıştır (Emre vd., 2012). Bu tektonik değerlendirmeler dışında inceleme alanında kırık sistemlerini oluşturan fayların doğrultusunu gösteren gül diyagramı ile akarsuların akış doğrultularını gösteren gül diyagramının karşılaştırılması sonucunda aktif fayların KB-GD ve KD-GB doğrultusunda yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 4). Akarsuların akış doğrultusu ile diri fayların doğrultusunun farklılık göstermesi havzanın ana jeomorfolojik yapısı ile ilgilidir.



Şekil 4. Varto Havzası ve çevresindeki diri faylara (a) ve akarsuların akış doğrultusuna göre (b) oluşturulan gül diyagramları

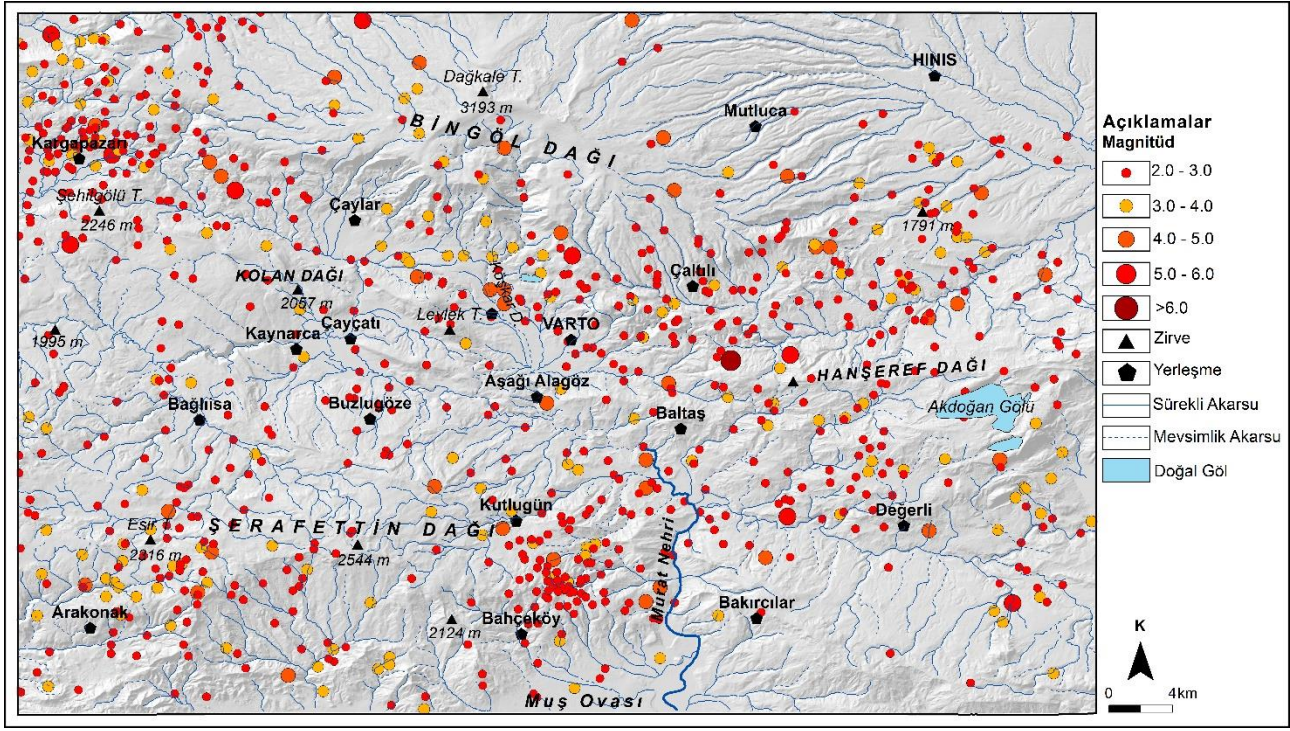
Figure 4. Rose diagrams created according to the active faults (a) and streams flow direction (b) in and around the Varto Basin

1.2. Varto Havzası ve çevresinin depremselliği

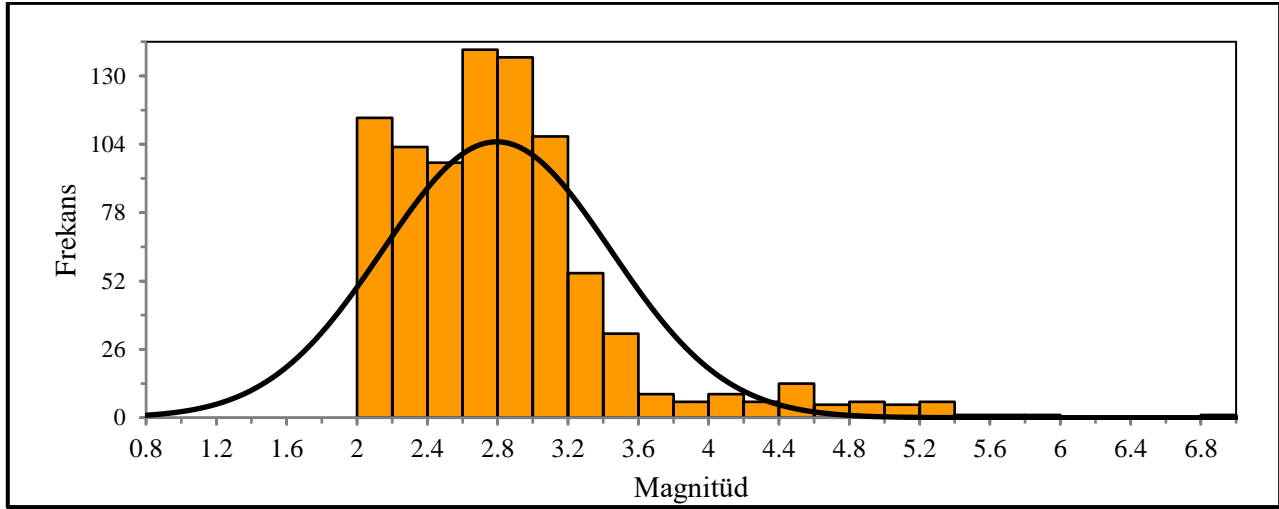
1.2. Seismicity of Varto Basin and its surroundings

Varto ve çevresini etkileyen tarihi ve aletsel dönem depremleri Varto Fay Zonu'nda meydana gelmiştir. Varto ve çevresinde tarihi dönemdeki en önemli depremler 1647 ve 1881 yıllarında meydana Van, Muş ve Bitlis'i etkileyen 9 şiddetindeki depremlerdir (B.Ü. KRDAE, 2022a). Aletsel dönem deprem verilerine göre de Varto Fayı üzerinde önemli depremlerin yaşandığı görülmektedir. Bu depremlerin en önemlileri 1946 Varto-Hınıs Depremi ve 19 Ağustos 1966 tarihinde yaşanan 6.9 büyüklüğündeki Varto depremleridir (B.Ü. KRDAE, 2022b).

AFAD verilerine göre çalışma alanında 1900-2022 yılları arasında 2'den büyük olan 854 deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin 54'ünün magnitüdü 4 ve üzerinde olup (AFAD, 2022) VFZ üzerinde yoğunlaştıkları görülmektedir. Depremlerin frekans dağılımı incelendiğinde deprem büyüklüğü 2.6-3.2 arasında yoğunlaşmaktadır (Şekil 5, 6). Ayrıca havza güneyinde YKFZ ve güneydoğuda AFZ üzerinde de depremler yaşanmıştır. Doğrudan Varto Havzası'nı ilgilendiren bu fay zonları dışında, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde meydana gelen depremler de Varto ve çevresini etkilemektedir.



Şekil 5. Varto Havzası ve çevresinde aletsel dönem depremlerin dağılışı haritası (1900-2022) (AFAD, 2022)
 Figure 5. Distribution map of instrumental earthquakes in and around Varto Basin (1900-2022) (AFAD, 2022)



Şekil 6. Varto ve çevresinde görülen ($M_g > 2$) depremlerin frekans dağılımı diyagramı (1900-2022), (AFAD, 2022)
 Figure 6. Frequency distribution diagramme of ($M_g > 2$) earthquakes in and around Varto (1900-2022), (AFAD, 2022)

Varto Havzası ve çevresinde yaşanan en büyük deprem 19.08.1966 tarihinde meydana gelen 6.9 büyüklüğündeki Varto depremidir. Bu deprem 2529 kişinin ölümüne, 1500 kişinin yaralanmasına neden olmuş ve 19013 yapı yıkılmıştır (Ambraseys & Zátópek, 1968; Wallace, 1968; Herece, 2008). Bu depremde Varto-Üstükran arasında şoförün kontrolünü kaybettiği yüklü bir kamyon ters dönmüş, Varto'da çok sayıda park etmiş aracın hareket ettiği bildirilmiştir (Herece, 2008). Varto depremi uzun süre hafızalardan silinmemiş olup izleri günümüze kadar gelmiştir. Bu depremde sonra kırsalda depreme karşı dayanıklı olan ahşap iskeletli çamur dolgulular artış göstermiştir. Maalesef bu deprem sonrasında yapıyı planlanan deprem konutları ise bu depremde 36 yıl sonra ancak tamamlanabilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. 1966 Varto depreminden sonra ahşap iskelet ve çamur dolgu kullanılarak yapılan evler (a. b). Bu depremden 36 yıl sonra 2002 yılında tamamlanan afet evleri (c. d). Kırsaldan yaşanan göç nedeniyle bu evlerin bir bölümü kullanılmamaktadır

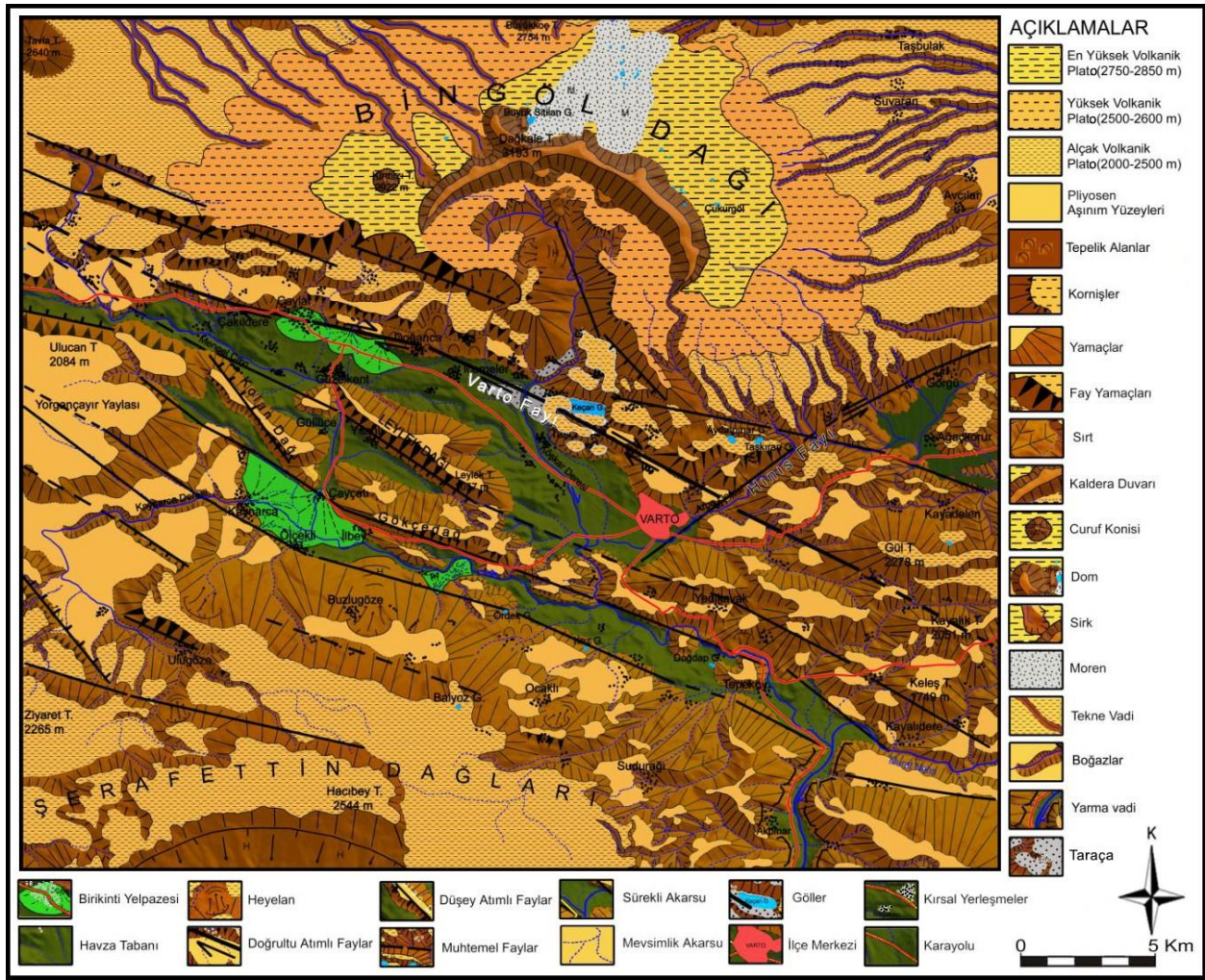
Figure 7. Houses built using wooden skeletons and mud fill after the 1966 Varto earthquake (a. b). Disaster houses completed in 2002, 36 years after this earthquake (c. d). Some of these houses are not used due to the migration

1.3. Varto Havzası ve çevresinin jeomorfolojik özellikleri

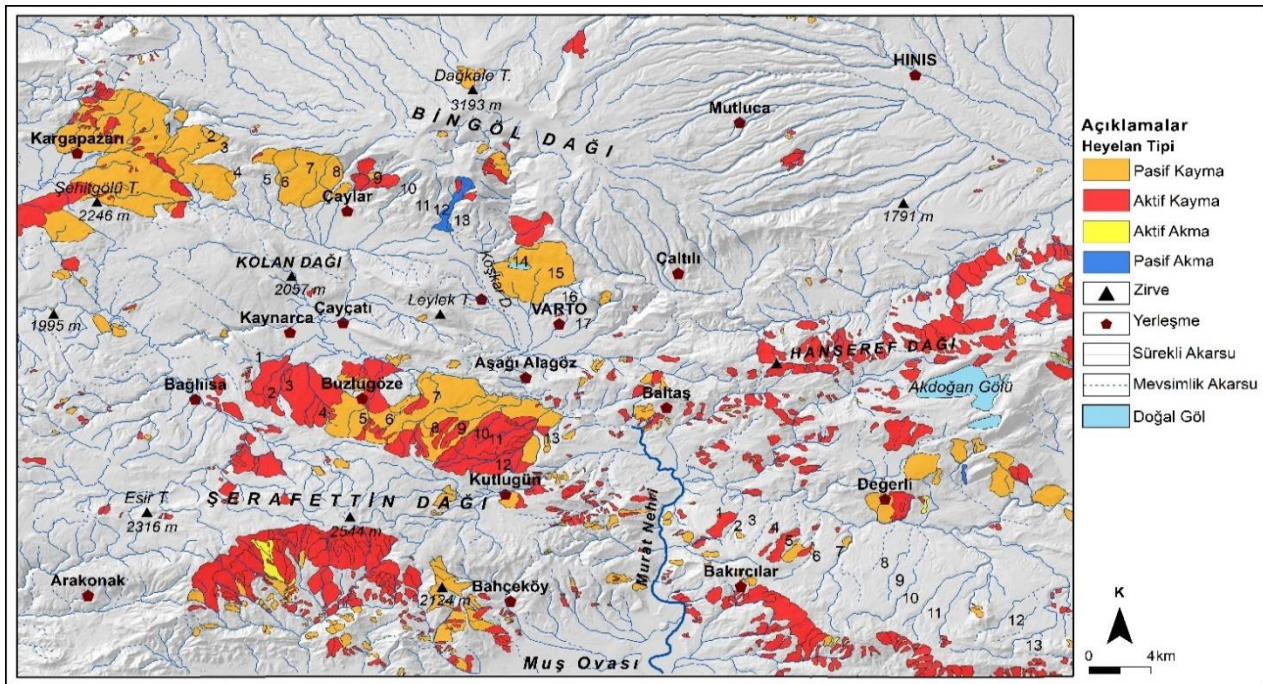
1.3. Geomorphological characteristics of Varto Basin and its surroundings

Varto Havzası ile ilgili jeomorfoloji çalışmalarına göre havza ve çevresinde dağlar, platolar, vadi ve havzalar ana jeomorfolojik birimleri oluşturmaktadır (Tonbul, 1996; Mirze, 2013). Havzayı kuzeyden sınırlandıran Bingöl Dağı tabla-kalkan şeklinde bir volkan konisi olup Pleyistosen’de plato buzullaşması etkisinde şekillenerek üzerinde çok sayıda göl oluşmuştur (Tonbul, 1996; 1997). Havza güneyinde yer alan Leylek Dağı ve Kolan Dağı, VFZ’ye bağlı olarak şekillenmiş, dağlık kütleler fay diklikleri ile çevrelenmiştir. Doğuda yer alan Hanşeref Dağı, Akdoğan Gölü Fayı tarafından kesilmiştir. Güneyde yer alan Şerafettin Dağı ise plato görünümlü bir volkanik dağdır (Tonbul, 1990). Havza ve çevresinde volkanizmaya bağlı olarak farklı yükseltilerde volkanik platolar oluşmuştur. Varto Havzası, Murat Nehri’nin oluşturduğu boğaz vadi ile Muş Ovası’na bağlanmaktadır (Şekil 8).

Varto Havzası ve çevresinde VFZ ve YKFZ boyunca heyelanlar yaygın olarak görülmektedir (Şekil 9). Bu heyelanlar; depremler, yüksek eğim ve piroklastiklere bağlı olarak meydana gelmiştir (Herece, 2008). Heyelanların yanıl atımlı fayların uzanışına bağlı bir dağılışı göstermesi de tektonik aktiviteyi göstermektedir.



Şekil 8. Varto Havzası ve çevresinin jeomorfoloji haritası (Mirze, 2013)'den alınmıştır
 Figure 8. Geomorphology map of Varto Basin and its environment. taken from (Mirze, 2013)



Şekil 9. Varto Havzası ve çevresinde görülen heyelanların dağılışı haritası (Duman vd., 2009).
 Figure 9. Distribution map of landslides in and around Varto Basin (Duman et al., 2009).

2. Materyal ve metot

2. Material and method

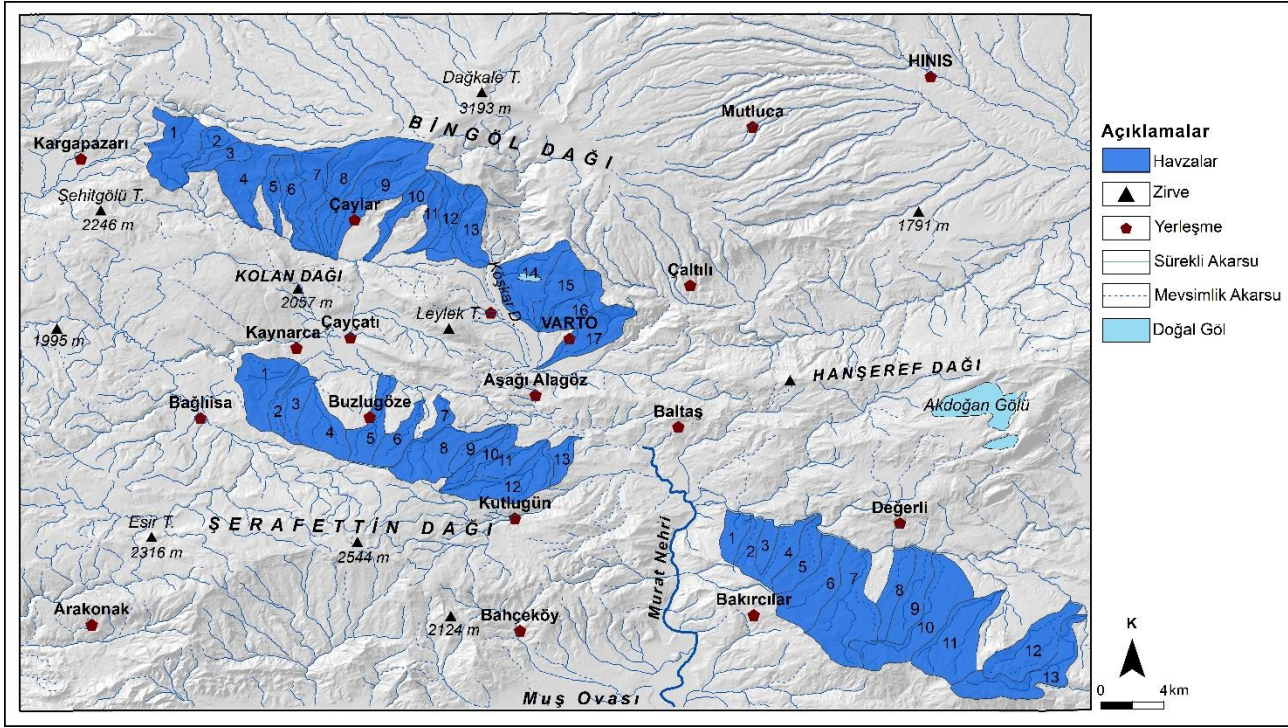
Jeomorfolojik parametrelerin analizi binlerce hatta milyonlarca yıllık bir zaman diliminde arazi yapısındaki değişiklikleri tanımlamak ve değerlendirmek için geçerli bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır (Keller & Rockwell, 1984; Keller & Pinter, 2002; Bull, 2008; 2011). Yer şekilleri, iklim, topografya, litoloji ve tektonik gibi ana faktörler tarafından kontrol edilen jeomorfolojik süreçlerin sonucu olarak oluşmaktadır. Bu süreçte özellikle tektonik aktivite doğrudan (aktif faylanma, tiltlenme ve kıvrımlanma ile) veya dolaylı (levha hareketleri nedeniyle topografya ve litolojide meydana getirdiği değişiklikler yoluyla) olarak etkili olmaktadır (Bull, 2008; 2011).

Aktif tektonik alanlarda tektonik aktivitenin yoğunluğunu belirlemek için morfotektonik bir araç olarak kullanılmaktadır (Wells vd., 1988; Merritts & Vincent, 1989; Sharma, 2020). Bu kapsamda tektonizmanın morfoloji üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla jeomorfik indisler tercih edilmektedir. Morfometrik analizler kapsamında jeomorfik indisler deformasyon süreçlerine karşı topografik tepkileri iyi tespit edebildiklerinden, aktif tektonizma araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Topal, 2019).

Morfometrik analizlerin sonucunda elde edilen verilere göre bir fay zonunda hangi segmentin aktif olduğu ve yükselme hızı belirlenebilmektedir (Bull & McFadden, 1977; Azor vd., 2002; Keller & Pinter, 2002; Sağlam Selçuk & Düzgün, 2017; Sol, 2017; Arıkan vd., 2023). Bu özelliği nedeniyle bu indisler hem aktif tektonik alanlara hem de tektonikçe nispeten daha az aktif alanlara uygulanabilmektedir (Bull, 1977; Bull & McFadden, 1977; Hare & Gardner, 1985; Rockwell vd., 1985; Ramírez-Herrera, 1998; Chen vd., 2003; Silva vd., 2003; Bull, 2008; El Hamdouni vd., 2008; Pérez-Peña vd., 2010; Bull, 2011; Giaconia vd., 2012; Ntokos vd., 2016; Sol, 2017; Arıkan vd., 2023).

Aktif tektoniğin belirlenmesi ile ilgili çalışmalarda doğru sonuçlar veren bazı jeomorfik indisler sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar hipsometrik integral (Strahler, 1952), drenaj havzası asimetrisi (Hare & Gardner, 1985; Cox, 1994), akarsu uzunluk-gradyan indeksi (Hack, 1973), dağ önü sinüslülüğü, vadi tabanı genişliğinin-vadi yüksekliğine oranı (V_f) gibi indislerdir (Bull, 1977; 1978). Bazı jeomorfik indis analiz sonuçları diğer verilerle birlikte kullanılarak, farklı tektonik aktivite sınıfları üretilip (Bull, 1978), göreceli tektonik aktivitenin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Keller & Pinter, 2002).

Akyüz vd. (2010) tarafından Varto Segmenti üzerinde yer alan 6 drenaj alanına hipsometrik eğri ve integral indisleri uygulanmış ve havzaları drene eden akarsuların boyuna profilleri çıkarılmıştır. Bu çalışmada Varto segmentinde gelişen drenaj sistemi üzerinde VF'nin aktivitesinin KAF'a göre daha az olduğu ileri sürülmüştür. Daha sonra Avcı ve Sunkar (2017) tarafından Varto Havzası'nda 28 alt havzaya morfometrik indisler uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar dikkate alınarak daha hassas ve havza sayısı artırılarak, aktif tektonik çalışmalarında yaygın olarak kullanılan indislerle göreceli tektonik aktivite belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak morfometrik analizler yapılmıştır. Oluşturulan SYM'den ArcHydro Modülü kullanılarak alt havzalar çıkarılmış ve VFZ üzerinde 17, YKFZ üzerinde 13 ve güneydoğuda 13 olmak üzere toplam 43 havza belirlenmiştir. Havzaların özellikleri dikkate alınarak tektonik aktivitenin yüksek olması muhtemel 43 havzanın morfometrik analizi yapılarak karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Varto Havzası ve çevresindeki alt akarsu havzalarına uygulanan indisler Tablo 1'de gösterilmiştir. Analizlerde kullanılan indis sonuçları göreceli tektonik aktivite indisi olarak değerlendirilmiş ve sonuçta fay zonları üzerinde yer alan havzalarda tektonik aktivitenin derecesi belirlenmiştir.



Şekil 10. Varto Havzası ve çevresinde jeomorfik indislerin uygulandığı alt havzalar haritası
Figure 10. Sub-basins map where morphometric analyzes are applied in and around the Varto Basin

Tablo 1. Varto Havzası ve çevresinde seçilen drenaj havzalarına uygulanan indisler tablosu
Table 1. Table of the indices applied to selected drainage basins in and around Varto Basin

İndis	Formül	Açıklama	Kaynak
Hipsometrik integral (Hi)	$HI = \frac{H_{ort} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$	Formülde Hort. ortalama yükseltiye, Hmin. minimum yükseltiye, Hmax. maksimum yükseltiye karşılık gelir	Strahler (1952)
Hipsometrik eğri (He)	$y = \frac{h}{H} \quad x = \frac{a}{A}$	h : Değerlendirilen yükseklik (m). H : Havzanın en yüksek noktası (m). a : Alınan yükseklik üzerindeki gerçek alan (m ²). A : Havzanın toplam gerçek alanı (m ²).	Strahler (1952)
Havza asimetrisi (AF)	$AF = 100 \times \frac{Ar}{At}$	Formülde Ar, ana akarsuyun akış doğrultusuna göre sağındaki alanı, At ise toplam alanı ifade eder.	Hare ve Gardner (1985)
Drenaj havzası şekli (Bs)	$B_s = \frac{B_l}{B_w}$	Eşitlikte B_l maksimum havza uzunluğunu, B_w maksimum havza genişliğini karşılar.	Cannon (1976); Ramirez-Herrera (1998)
Dağ önü sinüslülük oranı (Smf)	$S_{mf} = \frac{L_{mf}}{L_s}$	Eşitlikte L_{mf} ; belirgin eğim kırığı boyunca dağ cephesi boyu iken, L_s , Dağ önü düz çizgi uzunluğunu göstermektedir.	Bull (1977); Bull & McFadden (1977)
Vadi tabanı genişliği-vadi yüksekliği oranı (Vf)	$V_f = \frac{2V_{fw}}{(E_{ld} - E_{sc}) - (E_{rd} - E_{sc})}$	Formülde V_{fw} ; vadi tabanı genişliği iken, E_{ld} ; sol vadi kesimi yüksekliği, E_{rd} ; sağ vadi kesimi yüksekliği, E_{sc} vadi tabanı yüksekliğidir.	Bull & McFadden (1977); Keller & Pinter (2002)
Akarsu uzunluk-gradyan indisi (SL)	$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} \times L$	Formülde SL: Akarsu Uzunluk-Grandyan İndeksidir. ΔH hesaplama yapılan koldaki yükseklik değişimi, ΔL kolun uzunluğu, L ise hesaplama yapılan kolun orta noktasından vadinin en yüksek noktasına kadar olan mesafedir.	Hack (1973)
Kıvrımlılık oranı (S)	$C_s = \frac{S_l}{V_l}$	Formülde, C_s yatak kıvrımlılığı iken, S_l akarsu uzunluğunu ve V_l ise vadi uzunluğunu gösterir.	Mueller (1968)
Uzama oranı (Re)	$R_e = \frac{2(\sqrt{A}/\sqrt{\pi})}{L}$	Formülde havza alanı A, maksimum havza uzunluğu L'dir.	Bull & McFadden (1977)

3. Bulgular

3. Results

Varto Havzası, konumu nedeniyle tektonik açıdan fazla incelenmiş ve bu alanda fazla yayın üretilmiştir (Sançar vd., 2011; Gürboğa, 2015; Sançar vd., 2015). Klasik yöntemlerden farklı olarak Varto Havzası ve çevresi için uygulanan birçok jeomorfik indis ve sonuçları farklı başlıklar altında aşağıda değerlendirilmiştir. Bu analiz sonuçları havzanın jeomorfolojik gelişimi ve tektonik aktivite hakkında önemli veriler sunmaktadır:

3.1. Hipsometrik integral (Hi) ve hipsometrik eğri (He)

3.1 Hypsometric integral (Hi) and hypsometric curve (Hc)

Hi, havza geometrisi, rölyef ve drenaj havzası alanına bağlı olup (Topal, 2019) genelde doğal yüzeylerde Hi değeri nadiren 0.2'nin altında veya 0.8'in üzerinde olabilmektedir (Pérez-Peña vd., 2009a). Önemli ölçüde aşınmış alanlarda Hi, 0'a yakın değerler gösterirken; az aşınmış alanlarda bu değer 1'e yakın çıkmaktadır (Pérez-Peña vd., 2010). VFZ üzerindeki havzalarda Hi değerleri 0.29-0.56, YKFZ üzerindeki havzalarda 0.40-0.629 ve güneydoğudaki havzalarda 0.38-0.62 arasında değişmektedir. El Hamdouni vd. (2008) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre $Hi > 0.50$ yüksek tektonik aktivite (Sınıf 1), $0.4 < Hi < 0.5$ orta derecede tektonik aktivite (Sınıf 2), $Hi < 0.4$ düşük tektonik aktivite (Sınıf 3) olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre YKFZ'deki alt havzalar ile güneydoğudaki havzalarda göreceli tektonik aktivite yüksek çıkmıştır (Tablo 2, Şekil 11). VFZ'deki bazı havzalarda Hi'nin orta ve düşük çıkması bu alanda geniş heyelanlar ile havzaların bozulmasından kaynaklanmaktadır.

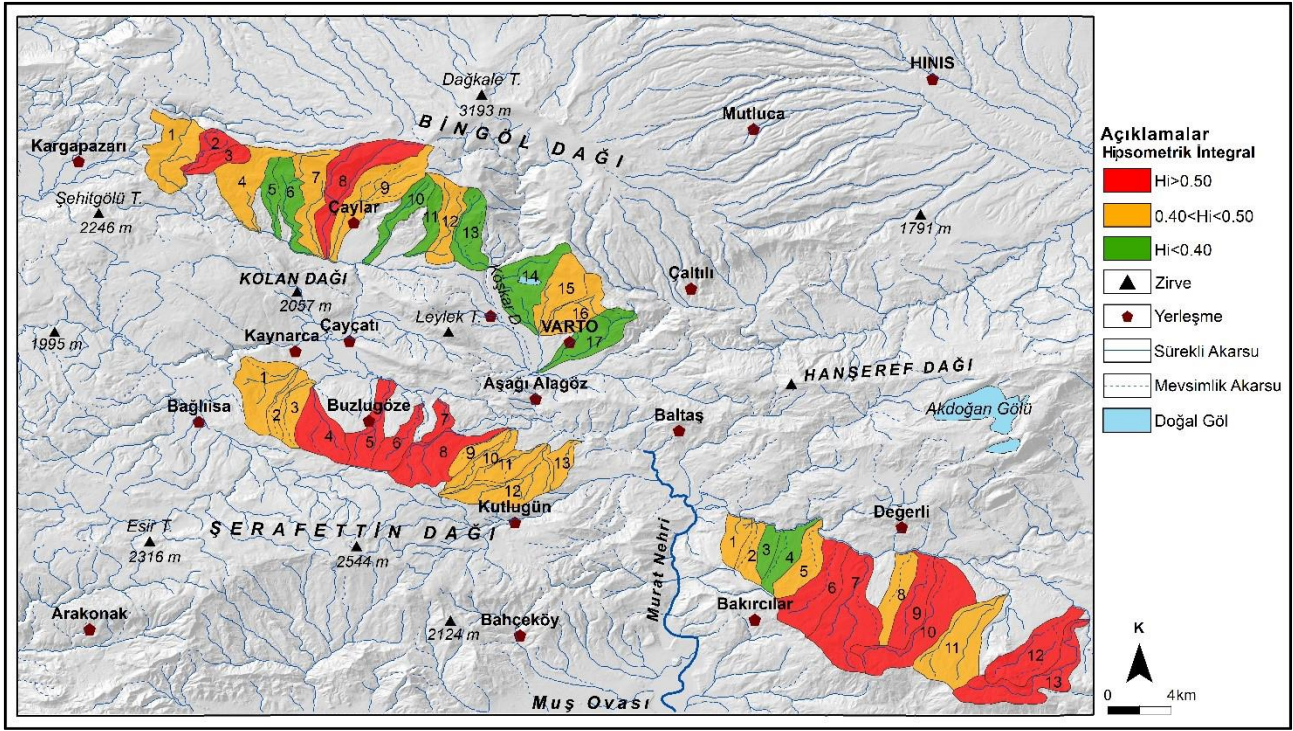
Tablo 2. Varto Havzası ve çevresindeki alt havzaların Hi değerlerinin El Hamdouni vd. (2008)'e göre tektonik aktivite sınıfları tablosu

Table 2. Tectonic activity classes table of the Hi values of Varto Basin and surrounding sub-basins according to El Hamdouni et al. (2008)

Tektonik aktivite sınıfı	Hi değeri	VFZ'deki alt havzalar	YKFZ' deki alt havzalar	Güneydoğudaki alt havzalar
Yüksek tektonik aktivite (1)	$Hi > 0.50$	2. 3. 8	4. 5. 6. 7. 8	6. 7. 9. 10. 12. 13
Orta derecede tektonik aktivite (2)	$0.4 < Hi < 0.5$	1. 4. 7. 9. 12. 15. 16	1. 2. 3. 9. 10. 11. 12. 13	1. 2. 5. 8. 11
Düşük tektonik aktivite (3)	$Hi < 0.4$	5. 6. 10. 11. 13. 14. 17	-	3. 4

Hipsometrik eğrilerin gösterdiği şekil ve Hi değerleri, Strahler (1952), tarafından Davis'in (1899), havza gelişim evrelerine göre üç havza kategorisinde değerlendirilmiştir. Buna göre; 1) Dışbükey hipsometrik eğri ve yüksek Hi değerine sahip genç havzalar, 2) S şekilli bir eğriye sahip havzalar (0.5 'e yakın ve olgun dönemi temsil eder) ve 3) İçbükey bir şekle sahip havzalardır (0.5 'ten büyük ölçüde düşük olup yaşlılık dönemini temsil eder). Ancak sonraki çalışmalarda, hipsometrik eğri ve Hi değerlerinin doğrudan havzanın gelişimi dışında havzanın topoğrafik şekli, litolojik koşullar, çatlama oranı, tektonizma ve erozyon oranı gibi diğer faktörle ilişkili olduğu ortaya konulmuştur (Ohmori, 1993; Moglen vd., 1998; Willgoose & Hancock, 1998; Luo, 2000; Huang & Niemann, 2006; Pérez-Peña vd., 2009a; b; Pérez-Peña vd., 2010; Cheng vd., 2012).

Varto Havzası ve çevresindeki alt havzaların hipsometrik eğrilerinde VFZ üzerindeki havzalarda kısmi bir içbükeylik dikkati çekmektedir. Aslında bu alanda yüksek tektonik aktivite görülmesine rağmen geniş alanlı heyelanların etkisiyle Hi değerlerine göre orta ve düşük tektonik aktivite ön plana çıkmaktadır (Şekil 12 a. b). YKFZ üzerindeki havzalarda dışbükey eğri ve yüksek Hi değeri yüksek tektonik aktiviteyi göstermektedir (Şekil 12 c. d). Havza güneydoğusundaki alt havzalarda da dışbükey hipsometrik eğri ve yüksek Hi değeri tektonik aktivitenin yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 12 e. f).



Şekil 11. Varto Havzası ve çevresinde seçilen drenaj alanlarının Hi değerlerinin tektonik aktivite sınıflarına göre dağılım haritası

Figure 11. Distribution map of Hi values of selected drainage areas in and around Varto Basin according to tectonic activity classes.

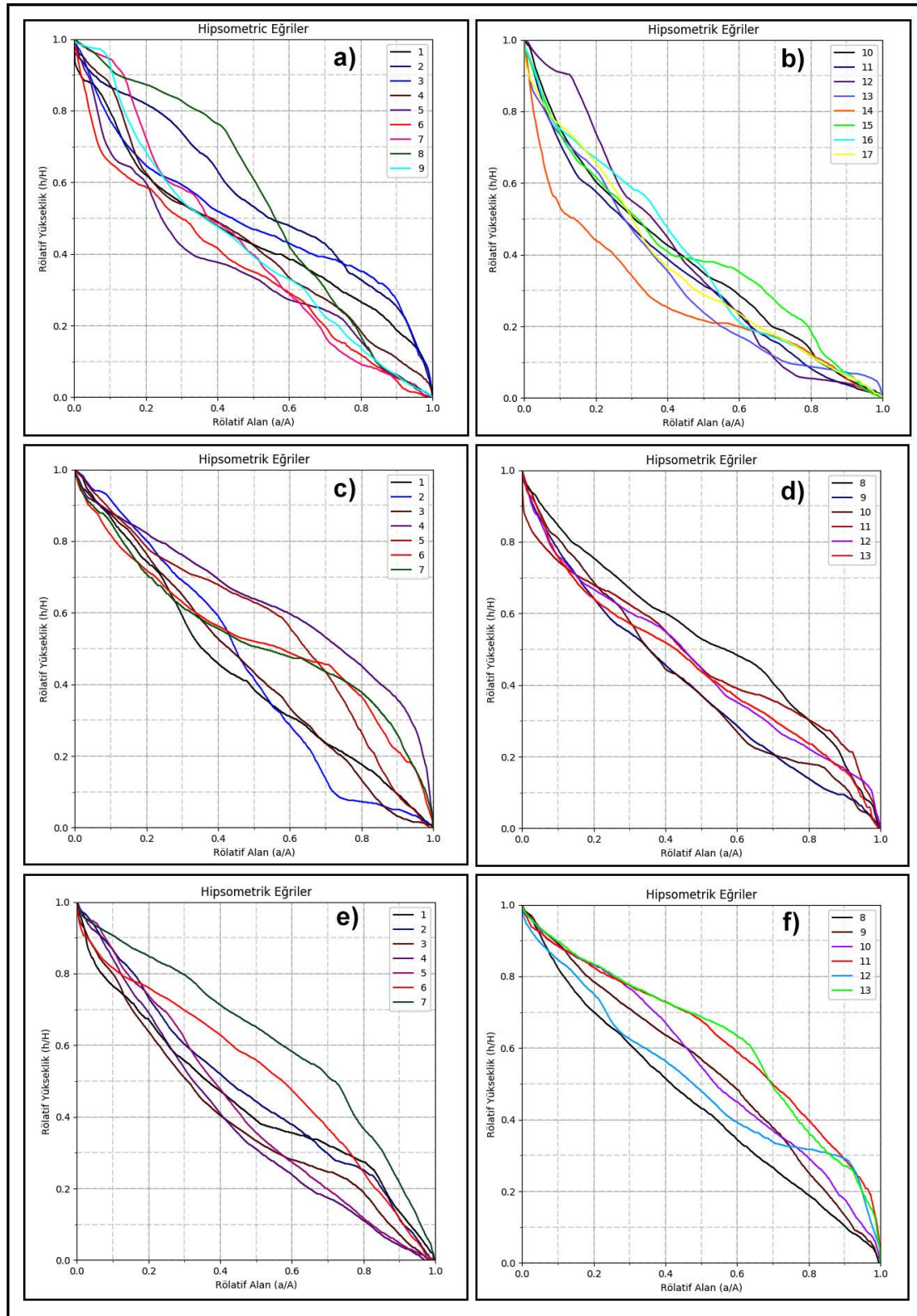
3.2. Havza asimetri faktörü (AF)

3.2. Basin asymmetry factor (AF)

Bu indis drenaj havzalarında tektonik etkinin belirlenmesinde temel bir kriter olarak kullanılmaktadır (Hare & Gardner, 1985; Salvany, 2004; Harkins vd., 2005; Ntokos vd., 2016; Ntokos, 2018). AF, ana nehrin sağına uzanan havza bölümü alanının nehrin drenaj havzasının toplam alanına oranını (%) ifade etmektedir (Hare & Gardner, 1985). Bir drenaj havzası; eşit kayaç direncine, kayaç strüktürüne, topografyaya ve stabil bir tektonik ortama sahip litolojiler altında simetrik bir geometriye dönüşebilir (Figueiredo vd., 2019). Tektonizma etkisinde kalan drenaj havzalarında AF değeri % 50'den yüksek ya da düşüktür. Simetrik havzalarda AF değeri % 50 olup (Keller & Pinter, 2002) bu değerden sapma ne kadar büyükse havzada tiltlenmenin değeri o kadar yüksek olmaktadır (Pérez-Peña vd., 2010). VFZ, YKFZ ve güneydoğuda yer alan tüm havzaların AF değerleri simetri için aranan AF=50 koşulunu sağlamamaktadır. Bu durum havzaların tektonizma etkisiyle simetrik olma özelliklerini kaybettiğini göstermektedir. Havzaların gelişiminde tektonizma etkili olduğundan havzalar farklı yönere doğru eğilmiştir. VFZ üzerinde asimetri faktörü değerleri 22-77, YKFZ'de 12.4-77.7 ve güneydoğuda ise 28.4-80.2 arasında değişmektedir (Tablo 3).

Havzalardaki asimetri dört grupta değerlendirilmektedir. Bunlar 1) Simetrik havza ($AF < 5$), 2) Az simetrik havza ($5 < AF < 10$), 3) Orta asimetrik havza ($10 < AF < 15$) ve 4) Baskın asimetrik havzadır ($AF > 15$) (Pérez-Peña vd., 2010; Giaconia vd., 2012; akt. Sağlam Selçuk & Düzgün, 2017). Bu asimetri değerlerine göre VFZ üzerinde 6. 7. 9. 14. 16 ve 17 nolu havzalar, YKFZ üzerinde 1. 2. 3. 4. 6. 8. 9. 10. 11 nolu havzalar ve güneydoğuda 2. 4. 5. 7. 8. 10. 11 ve 12 nolu havzalarda baskın bir asimetri değeri hesaplanmıştır.

Bu değerlendirme dışında AF değerleri ile tektonik aktiviteyi dikkate alınan sınıflandırmada $AF - 50 > 15$ yüksek tektonik aktiviteye ait 1. sınıfı, $AF - 50 = 7 - 15$ tektonik aktivite olarak 2. sınıfı, $AF - 50 < 7$ düşük tektonik aktiviteye sahip 3. sınıfı göstermektedir (El Hamdouni vd., 2008; akt. Topal & Özkul, 2018). Bu sınıflandırmaya göre VFZ üzerinde 6 havza, YKFZ üzerinde 9 havza, güneydoğuda 8 havza yüksek tektonik aktivite sınıfında yer almaktadır (Tablo 3).



Şekil 12. Varto Havzası çevresindeki alt havzaların hipsometrik eğrilerinin grafikleri a. b) VFZ üzerinde yer alan. c. d) Yorgançayır-Kaynarca Fay Zonunda yer alan, e. f) Varto Havzası güneydoğusunda yer alan havzaların hipsometrik eğrileri. Bu çalışmada Pérez-Peña vd. (2009b) tarafından geliştirilen CalHypso uzantısı kullanılarak hipsometrik eğriler otomatik olarak çizdirilmiştir **Figure 12.** The graphics of hypsometric curves of the sub-basins around the Varto Basin. a.b), Located on the VFZ, c.d) Located in the Yorgançayır-Kaynarca Fault Zone, e.f) The hypsometric curves of the basins located in the southeast of the Varto Basin. In this study, CalHypso extension, developed by Pérez-Peña et al. (2009b), is used to automatically draw the hypsometric curves

Tablo 3. Varto Havzası'nda seçilen drenaj alanlarının AF değerleri tablosu**Table 3.** AF values table of selected drainage areas in Varto Basin

Havza no	VFZ	AF-50	Sınıf	YKFZ	AF-50	Sınıf	GD	AF-50	Sınıf
1	56.66	6.66	3	30.77	-19.22	1	57.71	7.71	2
2	63.10	13.10	2	66.06	16.06	1	65.09	15.09	1
3	55.01	5.01	3	66.48	16.48	1	61.98	11.98	2
4	54.17	4.17	3	25.45	-24.54	1	78.60	28.60	1
5	45.39	-4.60	3	56.49	6.49	3	28.46	-21.53	1
6	30.61	-19.3	1	33.28	-16.71	1	57.51	7.51	3
7	76.38	26.38	1	44.02	-5.97	3	67.54	17.54	1
8	64.07	14	2	12.46	-37.53	1	65.93	15.93	1
9	77.36	27	1	77.78	27.78	1	46.84	-3.15	3
10	41.48	-8.52	2	67.62	17.62	1	80.22	30.22	1
11	46.43	-3.56	3	75.19	25.19	1	79.04	29.04	1
12	60.65	10.65	2	62.31	12.31	2	71.69	21.69	1
13	35.06	-14.9	2	53.54	3.54	3	64.31	14.31	2
14	28.90	-21	1						
15	61.14	11.14	2						
16	22.03	-27.9	1						
17	67.86	17.86	1						

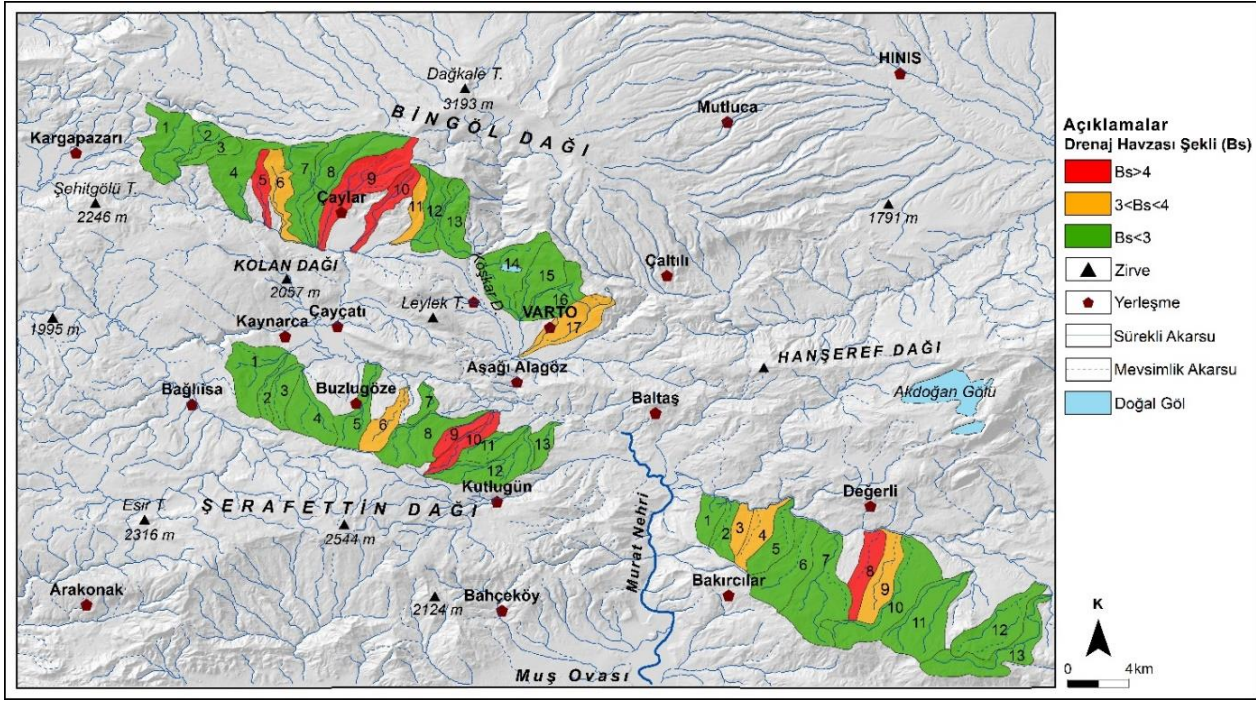
3.3. Drenaj havzası şekli (Bs)

3.3. Drainage basin shape (Bs)

Aktif tektonik alanlarda, genç drenaj havzalarının şekli, bir dağın topografik eğimine paralel olarak nispeten uzamaktadır. Zamanla topografik gelişim süreci içerisinde tektonik aktivite azaldığından uzunlamasına gelişen havzalar dairesel şekle dönüşmektedir (Bull & McFadden, 1977). Drenaj havzalarının şeklini belirlemek amacıyla dairesellik oranı (Miller, 1953), uzama oranı (Schumm, 1956) gibi bazı indisler kullanılmıştır. Daha sonra bu indisler, havza şekil indeksi olarak uyarlanmıştır (Cannon, 1976; Ramírez-Herrera, 1998; Figueiredo vd., 2019). Yüksek Bs değerleri uzunlamasına havzaları ve yüksek tektonik aktiviteyi, düşük Bs değerleri dairesel havzaları ve düşük tektonik aktiviteyi göstermektedir (Ramírez-Herrera, 1998; Dehbozorgi vd., 2010). Varto Havzası'nda Bs değerlerine göre yapılan sınıflandırmada havzaların büyük bölümü düşük tektonik sınıfta kalmaktadır (Tablo 4; Şekil 13). Ancak tektonik aktiviteyi yansıtmayacak havzalar da görülmektedir. Havzanın kuzey ve güneyindeki alt havzalarda yaşanan geniş alanlı heyelanlar kısmen genişlemeyi sağlamıştır.

Tablo 4. Varto Havzası ve çevresindeki alt havzaların Bs değerlerinin (El Hamdouni vd. (2008)'e göre) tektonik aktivite sınıfları tablosu**Table 4.** Tectonic activity classes table of Bs values according to El Hamdouni et al. (2008) of the Varto Basin and its surrounding sub-basins

Tektonik aktivite sınıfı	Bs değeri	VFZ'deki alt havzalar	YKFZ' deki alt havzalar	Güneydoğudaki alt havzalar
Yüksek tektonik aktivite (Sınıf 1)	Bs>4	5. 9. 10	9. 10	8
Orta derecede tektonik aktivite (Sınıf 2)	3<Bs<4	6. 11. 17	6	3. 4. 9
Düşük tektonik aktivite (Sınıf 3)	Bs<3	1. 2. 3. 4. 7. 8. 12. 13. 14. 15. 16	1. 2. 3. 4. 5. 7. 8. 11. 12.13	1. 2. 5. 6. 7. 10. 11. 12.13



Şekil 13. Varto Havzası ve çevresinde seçilen alt drenaj havzalarında havza şekli (Bs) değerlerinin dağılışı haritası

Figure 13. Distribution map of drainage basin shape (Bs) values in selected sub-drainage basins in and around Varto Basin

3.4. Dağ önü sinüslülük indisi (Smf)

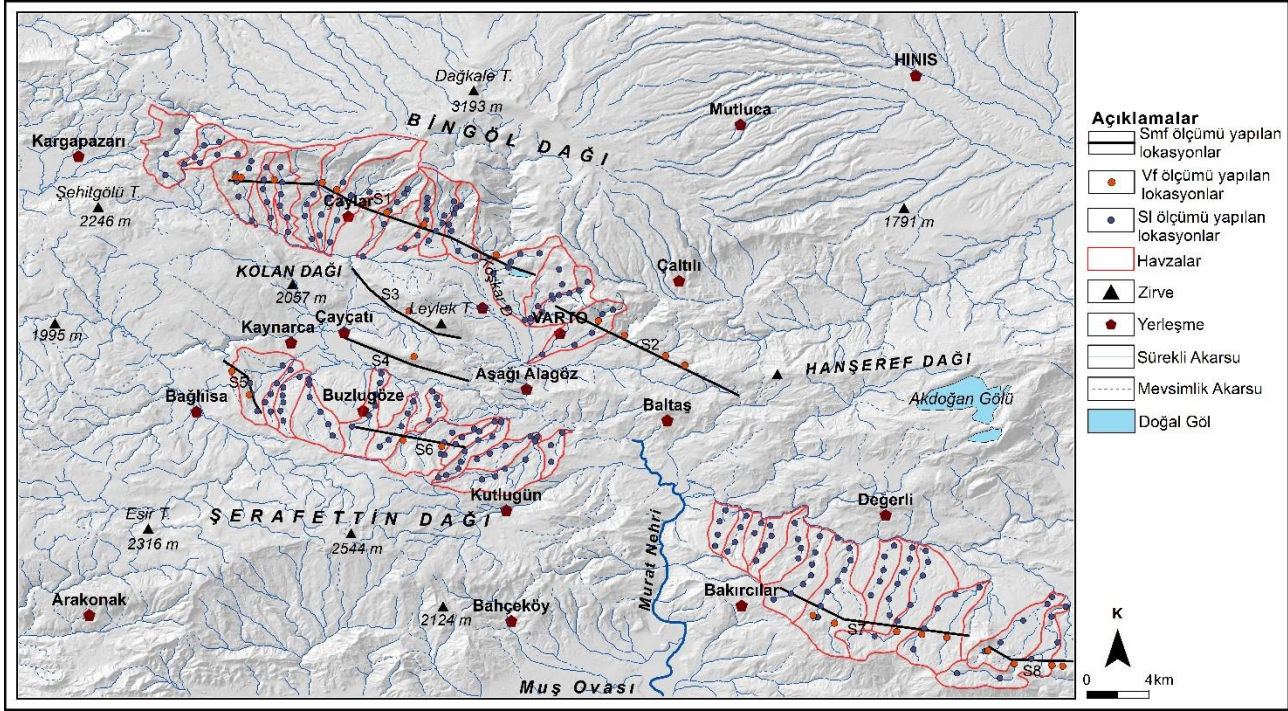
3.4. Mountain front sinuosity ratio

Genelde Smf değerleri topoğrafya haritalarından ve hava fotoğraflarından kolaylıkla hesaplanabilmekte olup haritanın ölçeği belirleyicidir (Bull & McFadden, 1977). Yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları ile daha büyük ölçekli haritalar dağ önü sinüslülük oranı hesaplaması için daha doğru sonuçlar vermektedir (Keller & Pinter, 2002). Faylara bağlı gelişen yamaçlarda dağ önü çizgiselliği artmasına rağmen erozyonun etkisine bağlı olarak zamanla azalmaktadır. Smf değerleri ile tektonizma arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için literatürde farklı gruplandırmalar bulunmaktadır. Bull ve McFadden (1977) tarafından önerilen sınıflandırmaya göre $Smf=1$ yüksek tektonik aktiviteyi gösterirken, $Smf > 1$ değeri olan alanlar nispeten daha az tektonik aktiviteyle karakterize etmektedir. Bunun yanında $Smf < 1.4$ değeri aktif tektonik alanları gösterirken, $Smf > 3$ inaktif dağ önlerini göstermektedir (Rockwell vd., 1985; Keller & Pinter., 2002; Silva vd., 2003; Bull, 2008; Pérez-Peña vd., 2010; Topal, 2019). Bu çalışmada Smf ölçümü 1/25.000 ölçekli topoğrafya haritaları kullanılarak elde edilen 10x10 m çözünürlüğünde sayısal yükseklik modeli üzerinde yapılmıştır (Şekil 14). VFZ boyunca ölçülen Smf değerleri kuzeyde 1.02-1.10, VFZ içerisinde Leylek Dağı ile Kolan Dağı arasında 1.005-1.009 arasında değişmektedir. Bu değerler VFZ'nin tektonik aktivitesinin yüksek olduğunu göstermektedir (Tablo 5).

Tablo 5. Varto Havzası'nda Smf değerleri tablosu

Table 5. Table of the Smf values in Varto Basin

Çizgisel hat lokasyonları	Lmf (m)	Ls (m)	Smf
S1	23180	20929	1.10
S2	13875	13480	1.02
S3	9156	9109	1.005
S4	8461	8382	1.009
S5	13311	12597	1.05
S6	5821	5511	1.05
S7	5225	5021	1.04
S8	7242	7191	1.007



Şekil 14. Varto Havzası ve çevresinde Smf, Vf ve Sl ölçümü yapılan lokasyonların haritası

Figure 14. Map of locations where Smf, Vf and Sl measurements are made in and around Varto Basin

YKFZ’de Smf değerleri 1.05, güneydoğuda 1.04-1.007 arasında ölçülmüştür. Bu parametreye göre VFZ ve YKFZ’nin aktif olduğu, güneydoğuda aktif tektonik hatlara işaret eden değerlerin ölçüldüğü görülmektedir. Smf<1.4 değeri dikkate alındığında tüm segmentlerde tektonik aktivitenin yüksek olduğu görülmektedir.

3.5. Vadi tabanı genişliği-vadi yüksekliği oranı (Vf)

3.5. Valley floor width-to-valley height ratio

Bu indis, nispeten yüksek Vf değerlerine sahip geniş tabanlı vadiler ile nispeten düşük Vf değerlerine sahip V şekilli vadileri yansıtmaktadır (Keller & Pinter, 2002). Düşük Vf değerleri genellikle yükselme ile ilişkili akışları olan derin vadileri karakterize etmektedir. Farklı havzalar arasında güvenilir ve karşılaştırılabilir ölçümler yapabilmek için, Vf oranları ya tektonik kaynaktan yukarı doğru belirli ve sabit bir mesafede ya da sabit bir havza konumu koordinatında ölçülmelidir (Bull, 2008). Bu kural dikkate alınarak, incelenen her vadi için dağ cephesinden belirli bir mesafede ölçüm yapılarak Vf değeri hesaplanmıştır (Şekil 14). Dağ cephesinden 300 m yukarıda ölçülen Vf değerleri VFZ üzerinde kuzeyde S1’de 0.12-1.36 arasında değişmektedir. Bu hat için Vf değeri ortalaması 0.49 olarak hesaplanmıştır. Kuzeyde S2’de Vf değerleri 0.12-0.30 arasında değişmekte olup ortalaması 0.21 hesaplanmıştır (Tablo 6). VFZ üzerinde Kolan Dağı ile Leylek Tepe arasında S3’se Vf değeri 0.18, S4’de Çaycı’ta 0.16 olarak ölçülmüştür.

Tablo 6. Varto Havzası ve çevresinde ölçüm yapılan noktaların Vf değerleri tablosu

Table 6. Vf values table of the measurement points in and around the Varto Basin

Vf	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Minimum	0.12	0.12			1.06	1	0.4	0.22
Maksimum	1.36	0.30	0.18	0.16	1.42	1.09	5.80	0.74
Ortalama	0.49	0.21			1.24	1.045	2.2	0.54

Varto Havzası kuzeyinde Bingöl Dağı yamaçlarında yüksek Vf değerleri doğrudan tektonizma ile ilişkilidir. Şaroğlu (1986) tarafından Bingöl Dağı’nın KAF tarafından kesildiğini, kalderaya benzeyen şeklin

parçalandığını ve VFZ kuzeyinde atımın 1500 m, güneyinde ise 700 m'yi geçtiği belirtilmektedir. Bu tektonik ve morfolojik gelişim bu indis değerlerinin yüksek çıkmasına neden olmaktadır. YKFZ üzerinde ölçülen Vf değerleri 1-1.42 arasında değişmekte olup Vf değerleri ortalaması S5'de 1.24 ve S6'da 1.045'dir. Güneydoğuda ise (S7) Vf değerleri 0.4 ile 5.80 arasında değişmekte olup ortalama Vf değeri 2.2 hesaplanmıştır. Güneydoğuda S8'de Vf değerleri 0.22-0.74 arasında değişen değerler göstermektedir. Vf değeri ile tektonik seviye arasındaki ilişkide, Vf değeri 0.5'den düşük olan sahalar tektonik aktivitenin fazla olduğu, Vf değeri 1 ile 0.5 arasında olan sahalar tektonik aktivitenin orta seviyede olduğu ve Vf değerinin 1'den fazla olduğu sahalar ise düşük seviyede tektonik aktivitenin olduğu sahalar olarak değerlendirilmiştir (Silva vd., 2003; El Hamdouni vd., 2008; Dehbozorgi vd., 2010; Mahmood & Gloaguen, 2012; Coşkun vd., 2019). Bu indise göre ölçülen Vf değerleri Varto Havzası ve çevresinde tektonik aktivitenin VFZ üzerinde yüksek olduğunu ispatlamaktadır. Güneydoğudaki alt havzalarda yapılan analiz sonuçları tektonik aktivitenin yüksek olduğunu ve bu alanların da faylı olduğunu göstermektedir.

3.6. SL indeksi

3.6. Stream length-gradient index

Bu indeks Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımları ile otomatik olarak hesaplandığı (Piacentini vd., 2020) gibi topoğrafya haritalarından yararlanılarak manuel olarak da hesaplanabilmektedir. SL indisi, akarsuyun gücü ile ilişkili olup kanal eğimindeki değişikliklere karşı duyarlıdır. Bu duyarlılık, olası tektonik aktivite, kaya direnci ve topografya arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır (Keller & Pinter, 2002). Bu makalede SL indisi seçilen drenaj alanlarında 100 m aralıklarla belirlenmiştir (Şekil 14). Ortalama SL değerleri VFZ üzerinde 174.53-663.41 arasında değişmektedir. Ortalamalar açısından minimum SL değeri 3 nolu drenaj alanında, ortalama maksimum SL değeri 8 nolu drenaj alanında ölçülmüştür. YKFZ'de ortalama SL değerleri 191.93-518.95 arasında değişmektedir. En düşük değer 13 nolu havzada, en yüksek değer 5 nolu havzada ölçülmüştür. Güneydoğuda ortalama SL değerleri 189.06-529.62 arasında değişmektedir. En düşük ortalama değer 2 nolu havzada, en yüksek ortalama değer ise 10 nolu havzada ölçülmüştür.

Balkaya vd. (2021) SL değerleri ile tektonik aktivite arasındaki ilişkiyi 3 grupta incelemiştir. Yüksek tektonik aktivite için $250 < SL$, orta derecede tektonik aktivite için $150 < SL < 250$, düşük tektonik aktivite için $SL < 150$ sınıflandırmasını önerilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre VFZ üzerinde yer alan havzaların 13'ü yüksek tektonik aktivite sınıfında, 4'ü orta derecede tektonik aktivite sınıfında. YKFZ üzerindeki havzalardan 9'u yüksek tektonik aktivite sınıfında, 4'ü orta derecede tektonik aktivite sınıfında, güneydoğuda yer alan alt havzaların 10'u yüksek tektonik aktivite sınıfında. 3'ü orta derecede aktif sınıfta yer almaktadır (Tablo 7).

Tablo 7. Varto Havzası ve çevresinde SL ölçümü yapılan noktalara ait değerler

Table 7. Values of the SL measurement points in and around the Varto Basin

Havza no	VFZ	Sınıf	YKFZ	Sınıf	Güneydoğudaki havzalar	Sınıf
1	314.52	1	300.53	1	243.51	2
2	273.47	1	233.81	2	189.06	2
3	174.53	2	387.51	1	211.14	2
4	390.40	1	402.03	1	406.21	1
5	298.22	1	518.95	1	279.51	1
6	296.61	1	495.31	1	375.30	1
7	515.05	1	210.61	2	331.73	1
8	663.41	1	454.84	1	444.20	1
9	390.98	1	200.12	2	328.19	1
10	373.59	1	250.85	1	529.62	1
11	426.92	1	259.31	1	477.27	1
12	534.65	1	387.02	1	514.43	1
13	334.82	1	191.93	2	362.02	1
14	239.74	2				
15	204.86	2				
16	375.89	1				
17	246.36	2				

3.7. Yatak kıvrımlılığı (S)

3.7. Channel sinuosity (S)

Bir akarsuyun yatak kıvrımlılığı, [Mueller \(1968\)](#), tarafından tektonizmanın rolünü anlamak için önerilmiş bir indistir ([Rhea, 1993; Raj vd., 1999](#)) Yatak kıvrımlılığı analizi, arazi özelliklerinin akarsu seyri üzerindeki etkisinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. İndeks değerinin 1 olması düz akarsu vadisini göstermektedir ([Acharjee vd., 2013](#)). Bir akarsu yatağı tektonik aktiviteye veya taban seviyesi değişimi gibi olaylara maruz kalması durumunda yatağın yapısında değişikliğe neden olarak denge profili bozulabilir. Kıvrımlılıktaki değişiklikler, yükselmiş bir alanın akış aşağısında veya çökmüş bir alanın akış yukarısında görülmektedir ([Ouchi, 1985; Schumm vd., 2000; Figueiredo vd., 2019](#)). Varto Havzası'nda uygulanan indis sonuçlarına göre yatak kıvrımlılığı değerleri VFZ üzerinde 1.02-1.52, YKFZ üzerinde 1.04-2.3 ve güneydoğuda 1.04-1.41 arasında değişmektedir. Yatak kıvrımlılığı değeri <1.5 ise yatak düz, >1.5 ise kıvrımlılık yüksek kabul edilmektedir ([Figueiredo vd., 2019](#)). Bu sınıflandırmaya göre de havzada kıvrımlılık değerleri düşüktür. Yatak kıvrımlılığı <1.5 tektonik olarak aktif (Sınıf 1), 1.5<Cs<2 orta derecede aktif (Sınıf 2) ve Cs>2 düşük derecede tektonik aktivite (Sınıf 3) olarak gruplandırılmıştır ([Figueiredo vd., 2019](#)) (Tablo 8).

Tablo 8. Varto Havzası ve çevresindeki alt havzaların yatak kıvrımlılık değerleri tablosu

Table 8. Channel sinuosity values table of the sub-basins in and around the Varto Basin

Havza no	VFZ'deki alt havzalar	Sınıf	YKFZ'deki alt havzalar	Sınıf	Güneydoğudaki alt havzalar	Sınıf
1	1.28	1	1.27	1	1.10	1
2	1.19	1	1.16	1	1.05	1
3	1.07	1	1.3	1	1.20	1
4	1.22	1	1.04	1	1.04	1
5	1.09	1	1.14	1	1.14	1
6	1.02	1	1.26	1	1.12	1
7	1.16	1	2.3	3	1.12	1
8	1.37	1	1.24	1	1.11	1
9	1.18	1	1.96	2	1.14	1
10	1.08	1	1.15	1	1.38	1
11	1.14	1	1.08	1	1.21	1
12	1.18	1	1.17	1	1.12	1
13	1.41	1	1.16	1	1.41	1
14	1.52	2				
15	1.26	1				
16	1.2	1				
17	1.13	1				

Bu sınıflandırmaya göre VFZ üzerinde 14 nolu havza dışındaki bütün havzalar tektonik aktivitenin yüksek olduğu 1. sınıfta, güneydoğudaki tüm alt havzalar 1. sınıfta, YKFZ'de yer alan 7 ve 9. havza dışındaki diğer havzalar 1. sınıfta yer almaktadır. Bu indis (S) değerleri, Varto Havzası'ndaki alt havzaların aktif tektonizma ile şekillendiğini gösteren veriler sunmaktadır.

3.8. Uzama oranı (Re)

3.8. Elongation ratio (Re)

Bu indis tektonik aktivite özellikle de son tektonik hareketlerin belirlenmesi açısından önemli bir parametredir. Farklı iklim ve jeolojik yapılarda, havza uzama oranının (Re) genellikle 0.60 ile 1.00 arasında değiştiği belirtilmiştir ([Strahler, 1964; Ntokos vd., 2016](#)). Başka bir sınıflandırmaya göre kurak ve yarı kurak iklimlerdeki drenaj havzaları, tektonik olarak aktif, hafif aktif ve aktif olmayan ortamlar için sırasıyla $Re < 0.50$, $Re = 0.50-0.75$ ve $Re > 0.75$ arasında değişen değerler göstermektedir ([Cuong & Zuchiewicz, 2001](#)). Bu analiz sonuçlarına göre VFZ üzerinde Re değerleri 0.20-0.36, YKFZ üzerinde 0.21-0.36 ve güneydoğuda 0.23-0.34, arasında değişmektedir. [Cuong ve Zuchiewicz \(2001\)](#) tarafından önerilen sınıflandırmaya göre uzama oranı değerleri VFZ üzerinde tüm alt havzalar için tektonik olarak aktif, <0.50 grubu içerisinde yer almaktadır. YKFZ üzerinde ve güneydoğuda analiz edilen tüm alt havzalarda uzama oranı 0.50'nin altındadır. Bu sonuçlar

da Varto Havzası ve çevresinde yüksek tektonik aktiviteyi göstermekte olup havzaların uzadığını göstermektedir (Tablo 9).

Tablo 9. Varto Havzası ve çevresinde alt havzaların uzama oranı değerleri tablosu

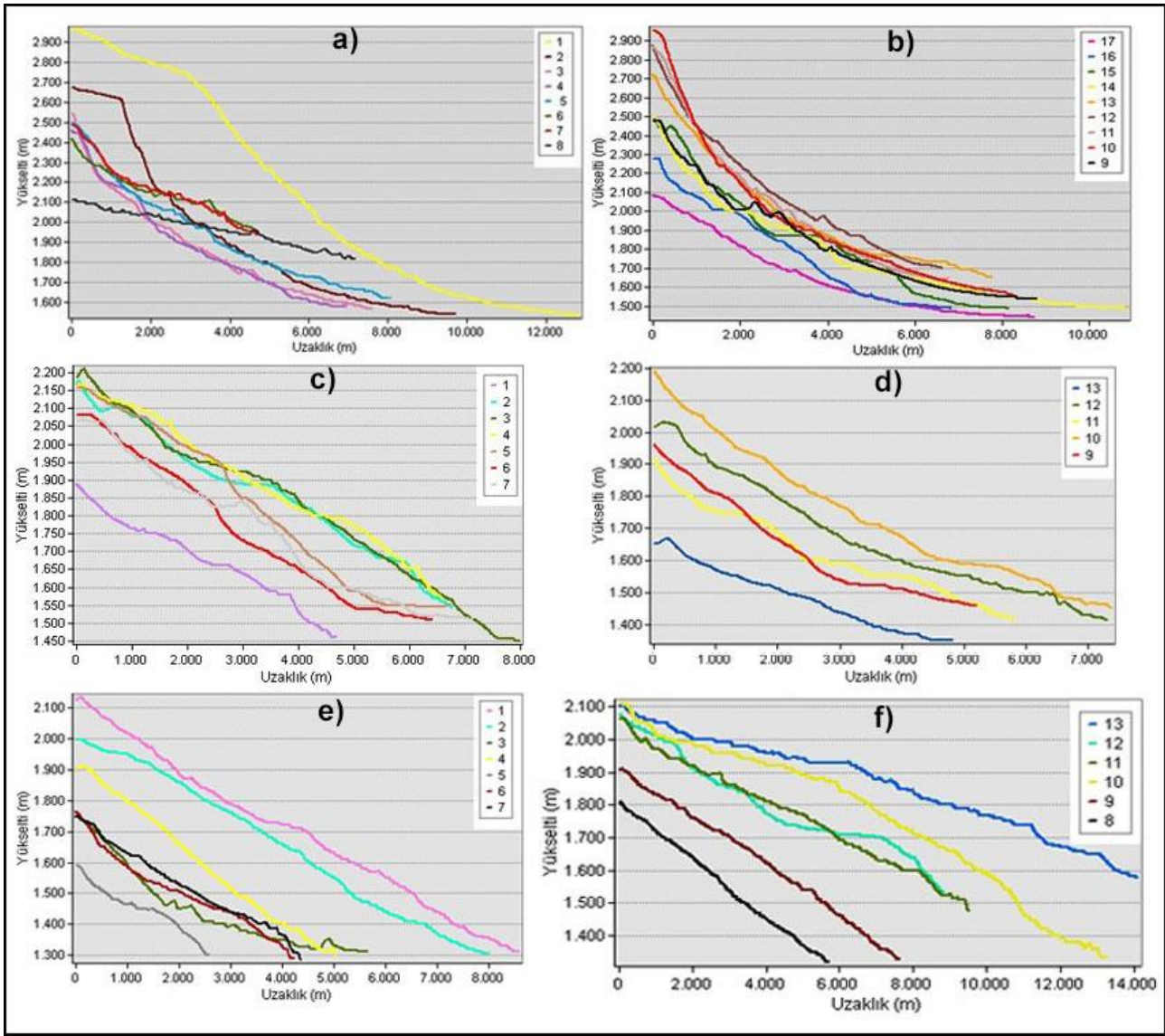
Table 9. Elongation ratio values table of sub-basins in and around Varto Basin

Havza no	VFZ	Sınıf	YKFZ	Sınıf	GD	Sınıf
1	0.36	1	0.36	1	0.32	1
2	0.34	1	0.21	1	0.26	1
3	0.28	1	0.28	1	0.28	1
4	0.32	1	0.32	1	0.24	1
5	0.20	1	0.26	1	0.27	1
6	0.23	1	0.27	1	0.31	1
7	0.25	1	0.30	1	0.30	1
8	0.21	1	0.28	1	0.23	1
9	0.24	1	0.23	1	0.25	1
10	0.21	1	0.22	1	0.28	1
11	0.22	1	0.28	1	0.34	1
12	0.26	1	0.29	1	0.29	1
13	0.29	1	0.29	1	0.25	1
14	0.32	1				
15	0.31	1				
16	0.33	1				
17	0.27	1				

3.9. Havza akarsularının boyuna profil analizleri

3.9. Longitudinal profile analyses of basin streams

Bir akarsuyun boyuna profili genelde düzgün bir içbükey profile olmayıp bazı alanlarda düz, bazı alanlarda ise dike yakın şekillerde olabilmektedir. Eğim kırıklığının başladığı noktalardan itibaren farklı dirençteki litoloji, tektonik hareketlere bağlı kırılmalar ve debideki artış gibi olaylardan kaynaklanabilmektedir. Boyuna profillerdeki bu tip değişimleri belirlemek amacıyla arazi gözlemleri veya indis analizleri yapılmalıdır. Bu kapsamda VFZ üzerinde yer alan akarsuların boyuna profilleri analiz edildiğinde belirgin eğim kırıklıkları ve basamaklanmalar görülmektedir. Analiz havzalarındaki akarsuların boyuna profilleri Varto Fayı (VF) ve Yorgançayır-Kaynarca Fayı (YKF) etkisindeki akarsuların boyuna profillerinde görülen özellikler, güneydoğuda yer alan akarsular için de geçerlidir. Bu durum Varto Havzası'nda drenaj gelişiminin tektonizma etkisinde olduğunu göstermektedir (Şekil 15).



Şekil 15. Varto Havzası'nda yer alan alt analiz havzalarındaki akarsuların boyuna profilleri. a. b) VFZ üzerinde yer alan akarsuların profilleri. c. d) YKFZ üzerinde yer alan akarsuların profilleri, e. f) Güneydoğuda yer alan havzalardaki akarsuların boyuna profilleri

Figure 15. Longitudinal profiles of streams in sub-analysis basins in Varto Basin. a. b) Longitudinal profiles of streams on the VFZ. c. d) Longitudinal profiles of streams on YKFZ. e. f) Longitudinal profiles of streams in the southeastern basins

3.10. Göreceli tektonik aktivite indeksi

3.10. Relative tectonic activity index

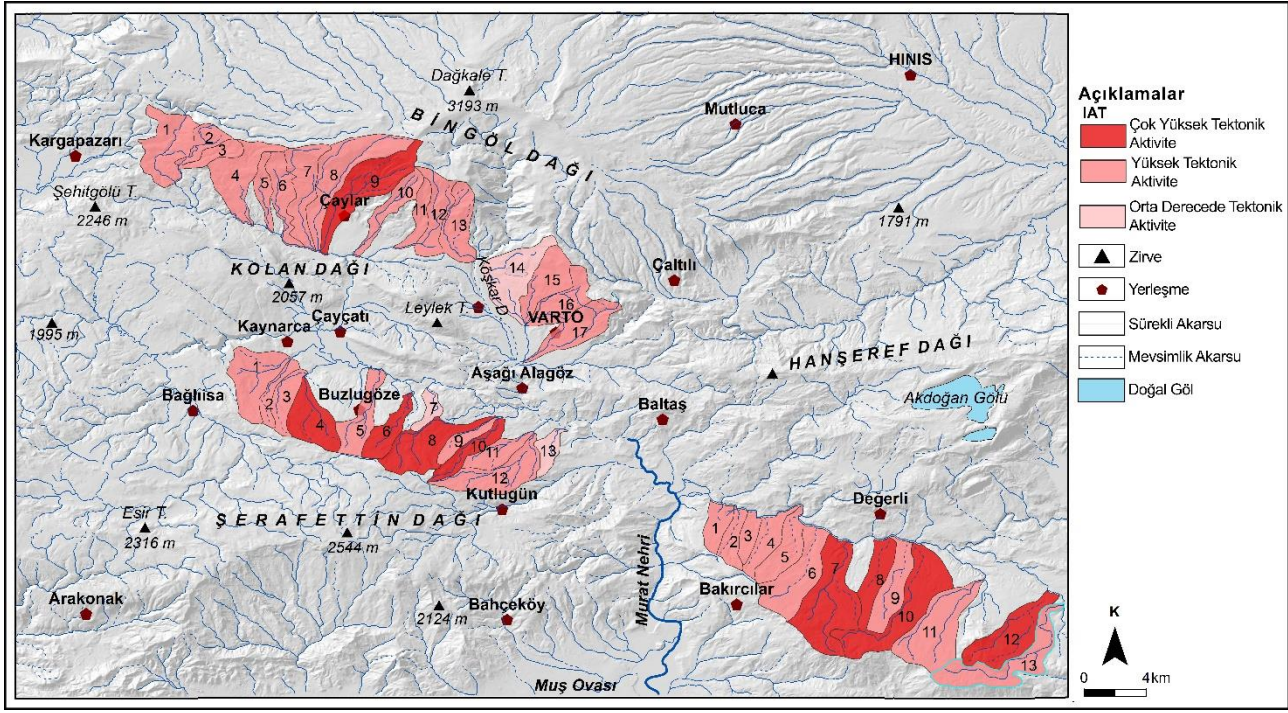
Göreceli tektonik aktivite bazı araştırmalarda S_{mf} ve V_f indislerinin kombinasyonu (Bull & McFadden., 1977; Silva vd., 2003), bazı araştırmalarda ise göreceli tektonik aktivite (IAT) indisi kullanılarak belirlenmiştir. Bu sınıflandırmada tektonik aktivitesi çok yüksek olan havzalarda IAT değeri $IAT < 1.5$, yüksek olan havzalarda $1.5 \leq IAT < 2$, orta derecede olan havzalarda IAT değeri $2 \leq IAT < 2.5$, düşük olan havzalarda IAT değeri $2.5 \leq IAT$ olarak belirlenmiştir (El Hamdouni vd., 2008). Bu çalışmada da göreceli tektonik aktivite (IAT) indisi kullanılarak Varto Havzası'nı denetleyen fayların tektonik aktivitesi belirlenmiştir. IAT indis analizi için H_i , AF, Bs, SL, S ve Re indislerinin sınıflandırmadaki puanları toplanarak indis sayısına bölünmüş ve göreceli tektonik aktivite sınıfı belirlenmiştir (Tablo 10). Buna göre VFZ üzerinde yer alan havzaların IAT değerleri 1.16-2 arasında değişmekte olup, bir havza dışında çok yüksek ve yüksek tektonik aktiviteyi göstermektedir. YKFZ üzerinde yer alan havzaların IAT değeri 1.16-2.16 arasında değişmekte olup 4. 6. 8. ve 10 nolu havzalar tektonik olarak çok aktif, 1. 2. 3.5.9.11 ve 12 nolu havzalar yüksek, 7. ve 13 nolu havzalar orta derecede tektonik aktivite sınıfında yer almaktadır. Güneydoğuda yer alan havzaların IAT değeri 1.16-1.83 arasında

değişmekte olup 7. 8. 10. 12 nolu havzalar tektonik olarak çok aktif sınıfta diğer havzalar tektonik aktivitenin yüksek olduğu sınıfta yer almaktadır (Şekil 16).

Tablo 10. Varto Havzası ve çevresindeki havzaların göreceli tektonik aktivitesinin belirlenmesinde kullanılan indisler ve IAT değerleri

Table 10. Indices and IAT values used to determine the relative tectonic activity of the Varto Basin and the surrounding basins

Havza lokasyonları	Havza no	Hi	AF	Bs	SL	S	Re	IAT sınıfı
VFZ	1	2	3	3	1	1	1	Yüksek
	2	1	2	3	1	1	1	Yüksek
	3	1	3	3	2	1	1	Yüksek
	4	2	3	3	1	1	1	Yüksek
	5	3	3	1	1	1	1	Yüksek
	6	3	1	2	1	1	1	Yüksek
	7	2	1	3	1	1	1	Yüksek
	8	1	2	3	1	1	1	Yüksek
	9	2	1	1	1	1	1	Çok yüksek
	10	3	2	1	1	1	1	Yüksek
	11	3	3	2	1	1	1	Yüksek
	12	2	2	3	1	1	1	Yüksek
	13	3	2	3	1	1	1	Yüksek
	14	3	1	3	2	2	1	Orta
	15	2	2	3	2	1	1	Yüksek
	16	2	1	3	1	1	1	Yüksek
	17	3	1	2	2	1	1	Yüksek
YKFZ	1	2	1	3	1	1	1	Yüksek
	2	2	1	3	2	1	1	Yüksek
	3	2	1	3	1	1	1	Yüksek
	4	1	1	3	1	1	1	Çok yüksek
	5	1	3	3	1	1	1	Yüksek
	6	1	1	2	1	1	1	Çok Yüksek
	7	1	3	3	2	3	1	Orta
	8	1	1	3	1	1	1	Çok yüksek
	9	2	1	1	2	2	1	Yüksek
	10	2	1	1	1	1	1	Çok yüksek
	11	2	1	3	1	1	1	Yüksek
	12	2	2	3	1	1	1	Yüksek
	13	2	3	3	2	1	1	Orta
G.Doğu	1	2	2	2	2	1	1	Yüksek
	2	2	1	3	2	1	1	Yüksek
	3	3	2	2	2	1	1	Yüksek
	4	3	1	2	1	1	1	Yüksek
	5	2	1	3	1	1	1	Yüksek
	6	1	3	3	1	1	1	Yüksek
	7	1	1	3	1	1	1	Çok yüksek
	8	2	1	1	1	1	1	Çok yüksek
	9	1	3	2	1	1	1	Yüksek
	10	1	1	3	1	1	1	Çok yüksek
	11	2	1	3	1	1	1	Yüksek
	12	1	1	3	1	1	1	Çok yüksek
	13	1	2	3	1	1	1	Yüksek



Şekil 16. Varto Havzası ve çevresinde analiz edilen havzaların göreceli tektonik aktivite indeksine (IAT) göre tektonik aktivite sınıflarının dağılışı haritası

Figure 16. The distribution map of tectonic activity classes according to the relative tectonic activity index (IAT) of the analyzed basins in and around the Varto Basin

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Varto Havzası, KAF ve DAF'ın kesişme alanına karşılık gelen Karlıova'nın doğusunda yer almaktadır. Havzanın oluşum ve gelişiminde KAF'ın güneydoğuya doğru devamını oluşturan Varto Fayı (VF) etkili olmuştur. VFZ, KB-GD doğrultusunda, birbirine paralel doğrultu ve düşey atımlı çok sayıda faydan oluşmaktadır. Bu faylar Bingöl Dağı'nın güney yamaçlarını keserek Varto Havzası'nı oluşturmuştur. Havza güneyinde YKFZ üzerindeki ve güneydoğusundaki faylar morfolojiye yansımıştır.

Morfometrik analizler ile aktif tektonik aktiviteyi sayısal veriler ile belirlemek mümkündür. Varto Havzası'nı denetleyen fayların göreceli tektonik aktivitelerinin belirlenmesi amacıyla VFZ ve YKFZ üzerindeki seçilen toplam 43 havza jeomorfik indislerle değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre; alt havzalarda akarsuların boyuna profillerinin dış bükey özellik göstermesi tüm havzaların asimetric bir formda olması, dağ önü sinüslülük oranının yüksek olması, yatak kıvrımlılık değerlerinin düşük olması yüksek tektonik aktiviteyi göstermektedir.

Morfometrik analiz sonucunda elde edilen değerlerin göreceli tektonik aktivite indisine göre yeniden gruplandırılmasıyla Varto Havzası'ndaki alt havzaların aktiflik sınıfları belirlenmiştir. Bu analize göre VFZ ve YKFZ üzerinde yer alan alt havzalar ile güneydoğuda yer alan havzaların büyük bir bölümü çok yüksek ve yüksek tektonik aktivite sınıfında yer almaktadır. Göreceli tektonik aktivite indisi açısından değerlendirildiğinde alt havzaların büyük bir kısmında tektonik aktivite yüksek çıkmaktadır. İndis sonuçlarının dağılışı ile genç tektonik şekiller ve depremlerin dağılışı arasındaki yüksek uyum, yüksek tektonik aktiviteyi göstermektedir.

Akarsuların boyuna profillerindeki eğim kırıklıkları da tektonik aktivitenin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Smf ve Vf indisleri açısından yapılan değerlendirmede; VFZ üzerinde ölçülen Smf ve Vf değerleri oldukça düşüktür. Bu değerler VF'na bağlı olarak sahanın aktif olduğunu ve yükselmesine devam ettiğini göstermektedir.

Sonuç olarak jeomorfolojik ve sismik verilere göre; tektonik açıdan aktif olan ve genç tektonik hareketlerin etkin olduğu alanlarda jeomorfik indisler ile bu aktiviteler sayısal değerlerle ifade edilebilmektedir. Bunun dışında jeomorfolojik ve sismik verilerin olmadığı alanlarda yapılacak morfometrik analizler ile o alanların göreceli tektonik aktivitesinin belirlenmesinin mümkün olduğu da görülmektedir.

Teşekkür

Acknowledgement

Çalışmanın değerlendirilmesindeki katkıları için Hakemlere ve Editör Kuruluna teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Vedat Avcı; metodoloji, kaynak temini, sayısal altlıkların hazırlanması ve jeomorfik indis analizleri, haritaların hazırlanması ve orijinal taslak metin yazımı ile hakem önerilerine göre düzeltme ve düzenlemeleri yapmıştır. Murat Sunkar; jeoloji ve jeomorfoloji bölümlerini yazmış, fotoğraf, metin ve harita düzenlemelerini yaparak jeomorfik indis analiz sonuçlarının yorumlanmasına katkı sunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.”. “Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder

Kaynaklar

References

- Acharjee., S., Sarma. J. N., & Mili, N. (2013). Morphotectonic analysis of Disai River Basin Jorhat, Assam (India) using Remote Sensing and GIS approach. *Asian Journal of Spatial Science*, 1, 53–66.
- AFAD- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2022, 29 Kasım). <https://deprem.afad.gov.tr/>
- Akyüz, H. S., Sançar, T., & Zabcı. C. (2010). *Karlıova üçlü eklemi civarında Göynük fayı (Bingöl) ve Varto fayının (Muş) morfotektoniği, fay geometrisi ve kayma hızı* (No. 109Y160). Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu. <https://search.trdizin.gov.tr/yayin/detay/610486/>
- Ambraseys, N. N., & Zátópek, A. (1968). The Varto Üstükran (Anatolia) earthquake of 19 August 1966 summary of a field report. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 47–102. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010047>
- Arıkan, M., Erkal, T., & Ertek T. A. (2023). Kuzey Anadolu Fay Zonu ve güneyindeki Kızılırmak Havzası'nın (Çorum) relief morfometrisi. *Eastern Geographical Review*, 28 (49), 8-27. <https://doi.org/10.5152/EGJ.2023.220405>
- Avcı, V., & Sunkar, M. (2017). Jeomorfik indislerle Varto Havzası'nda (Muş) tektonik aktivitenin belirlenmesi. *Türk Coğrafya Kurumu 75. Yıl Kongresi*, 730-742. Ankara.
- Azor, A., Keller, E. A., & Yeats, R. S. (2002). Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain–Oak Ridge anticline. Ventura Basin, Southern California. *Geological Society of America Bulletin*, 114 (6), 745–753.

- Balkaya, M., Özden, S., & Akyüz, H. S. (2021). Morphometric and morphotectonic characteristics of Sürgü and Çardak Faults (East Anatolian Fault Zone). *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 7(3), 375–392. <https://doi.org/10.28979/jarnas.939075>
- Bull, W. B. (1977). *Tectonic geomorphology of the Mojave desert: US geological survey contract report 14-08-001-G-394. Office of Earthquakes. Volcanoes. and Engineering. Menlo Park. California. 188p.*
- Bull, W. B. (1978). *Geomorphic tectonic activity classes of the south front of the San Gabriel Mountains. California. Geosciences Department. University of Arizona.*
- Bull, W. B. (2008). *Tectonic geomorphology of mountains: A new approach to paleoseismology.* John Wiley & Sons.
- Bull, W. B. (2011). *Tectonically active landscapes.* John Wiley & Sons.
- Bull, W. B., & McFadden, L. D. (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault. California. In D. O. Doehring (ed.), *Geomorphology in Arid Regions. Proceedings of the Eight Annual Geomorphology Symposium.* Binghamton, NY: State University of New York at Binghamton, 115-138
- B.Ü.-KRDAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. (2022a, 12 Ocak). <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/tarihsel-depremler>
- B.Ü.-KRDAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. (2022b, 15 Kasım). <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>
- Cannon, P. J. (1976). *Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of the mill creek drainage basin.* Oklahoma Geology Notes, 36, 3–16.
- Chen, Y.-C., Sung, Q., & Cheng, K.-Y. (2003). Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: Tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis. *Geomorphology*, 56(1–2), 109–137. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00059-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00059-X)
- Cheng, K.-Y., Hung, J.-H., Chang, H.-C., Tsai, H., & Sung, Q.-C. (2012). Scale independence of basin hypsometry and steady state topography. *Geomorphology*, 171-172, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.022>
- Coşkuner, B., Eren, Y., Demircioğlu, R., & Aksoy, R. (2019). Fethiye Burdur Fay Zonu'nun kuzeydoğu kesiminin (Burdur-Güneybatı Anadolu) göreceli tektonik aktivitesinin jeomorfik indislerle incelenmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 62(3), 221–246. <https://doi.org/10.25288/tjb.546135>
- Cox, R. T. (1994). Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi Embayment. *Geological Society of America Bulletin*, 106(5), 571–581.
- Cuong, N. Q., & Zuchiewicz, W. A. (2001). Morphotectonic properties of the Lo river fault near Tam Dao in North Vietnam. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1, 15–22. 10.5194/nhess-1-15-2001
- Davis, W. M. (1899). The geographical cycle. *The Geographical Journal*, 14(5). 481–504.
- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Matkan, A. A., Motamedi, H., & Hosseiniasl, A. (2010). Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran. *Geomorphology*, 121(3–4). 329–341. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.002>
- Duman, T. Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioğlu, H. A., Hamzaçebi, S., Elmacı, H., Durmaz, S., & Çörekçioğlu, Ş. (2009). *Türkiye heyelan envanteri haritası 1/500.000 ölçekli Erzurum paftası.* Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1–2). 150–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Olgun, Ş., Özalp, S., & Elmacı, H. (2012). *1/250000 ölçekli Türkiye diri fay haritaları Erzurum (NJ 37-4) paftası.* Seri No:48. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., & Şaroğlu, F. (2013). Açıklamalı Türkiye diri fay haritası. ölçek 1:1.250.000. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Özel Yayın Serisi-30. Ankara-Türkiye. ISBN: 978-605-5310-56-1
- Figueiredo, P. M., Rockwell, T. K., Cabral, J., & Lira, C. P. (2019). Morphotectonics in a low tectonic rate area: Analysis of the southern Portuguese Atlantic coastal region. *Geomorphology*, 326, 132–151. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.019>
- Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J. M., Azañón, J. M., & Pérez-Peña, J. V. (2012). Geomorphic analysis of the Sierra Cabrera. an active pop-up in the constrictional domain of conjugate strike-slip faults: The Palomares and Polopos fault zones (eastern Betics. SE Spain). *Tectonophysics*, 580, 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.028>
- Gürboğa, Ş. (2015). Source Fault of 19 August 1966 Varto earthquake and its' mechanism: New field data, Eastern Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111, 792-803. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.07.015>
- Hack, J. T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the Us Geological Survey*, 1(4). 421–429.
- Hare, P. W., & Gardner, T. W. (1985). Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins. Nicoya Peninsula. Costa Rica. In: M. Morisawa & J.T. Hack (Eds.), *Tectonic Geomorphology.: Proceedings of the 15 Annual Binghamton Geomorphology Symposium* September 1984. Boston: Allen & Unwin, 75-104.
- Harkins, N.W., Anastasio, D. J., & Pazzaglia, F. J. (2005). Tectonic geomorphology of the Red Rock Fault, insights into segmentation and landscape evolution of a developing range front normal fault. *Journal of Structural Geology*, 27(11), 1925-1939. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.07.005>
- Herece, E. (2008). *Doğu Anadolu Fayı atlası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. 359 sayfa.
- Huang, X., & Niemann, J. D. (2006). An evaluation of the geomorphically effective event for fluvial processes over long periods. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F3). <https://doi.org/10.1029/2006JF000477>
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape*. Prentice-Hall. Upper Saddle River.
- Keller, E. A., & Rockwell, T. K. (1984). Tectonic geomorphology, Quaternary chronology, and paleoseismicity. In: Costa, J.E., Fleisher, P.J. (eds.), *Developments and applications of geomorphology*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69759-3_7
- Luo, W. (2000). Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E1). 1685–1694. <https://doi.org/10.1029/1999JE001096>
- Mahmood, S. A., & Gloaguen, R. (2012). Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geoscience Frontiers*, 3(4), 407–428. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.12.002>
- Merritts, D., & Vincent, K. R. (1989). Geomorphic response of coastal streams to low, intermediate, and high rates of uplift, Medocino triple junction region, northern California. *Geological Society of America Bulletin*, 101(11), 1373–1388. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<1373:GROCST>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<1373:GROCST>2.3.CO;2)
- Miller, V. C. (1953). *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area. Virginia and Tennessee*. Technical report, Columbia Univ. New York.
- Mirze, S. H. (2013). *Varto Havzası (Muş) ve çevresinin jeomorfolojisi*. [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü].
- Moglen, G. E., Eltahir, E. A. B., & Bras, R. L. (1998). On the sensitivity of drainage density to climate change. *Water Resources Research*, 34(4). 855–862. <https://doi.org/10.1029/97WR02709>
- Mueller, J. E. (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the Association of American Geographers*, 58(2). 371–385. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1968.tb00650.x>
- Ntokos, D., Lykoudi, E., & Rondoyanni, T. (2016). Geomorphic analysis in areas of low-rate neotectonic deformation: South Epirus (Greece) as a case study. *Geomorphology*, 263, 156–169. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.005>

- Ntokos, D. (2018). Formulation of the conceptual model for the tectonic geomorphological evolution of an area: five main rivers of Greece as a case study. *Catena*, 167, 60-77. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.022>
- Ohmori, H. (1993). Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. *Geomorphology*, 8(4), 263–277. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90023-U](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90023-U)
- Ouchi, S. (1985). Response of alluvial rivers to slow active tectonic movement. *Geological Society of America Bulletin*, 96(4), 504–515. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<504:ROARTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<504:ROARTS>2.0.CO;2)
- Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., Booth-Rea, G., Azor, A., & Delgado, J. (2009a). Differentiating geology and tectonics using a spatial autocorrelation technique for the hypsometric integral. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F2). <https://doi.org/10.1029/2008JF001092>
- Pérez-Peña, J.V., Azañón, J. M., & Azor, A. (2009b). CalHypo: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, 35(6), 1214–1223. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.06.006>
- Pérez-Peña, J.V., Azor, A., Azañón, J. M., & Keller, E. A. (2010). Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, 119(1–2), 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.020>
- Piacentini, D., Troiani, F., Servizi, T., Nesci, O., & Veneri, F. (2020). SLIX: a gis toolbox to support along-stream knickzones detection through the computation and mapping of the stream length-gradient (SL) index. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 69. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020069>
- Raj, R., Maurya, D. M., & Chamyal, L. S. (1999). Tectonic geomorphology of the Mahi river basin. Western India. *Journal of Geological Society of India*, 54(4), 387–398.
- Ramírez-Herrera, M. T. (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic Belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(4), 317–332. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199804\)23:4<317::AID-ESP845>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199804)23:4<317::AID-ESP845>3.0.CO;2-V)
- Rhea, S. (1993). Geomorphic observations of rivers in the Oregon Coast Range from a regional reconnaissance perspective. *Geomorphology*, 6 (2), 135-150. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90043-2)
- Rockwell, T. K., Keller, E. A., & Johnson, D. L. (1985). Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura. California. *Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin Publishers. Boston. MA. 183–207.
- Sağlam Selçuk, A., & Düzgün, M. (2017). Başkale Fay Zonu'nun tektonik jeomorfolojisi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 155, 33–47. <http://dx.doi.org/10.19076/mta.53825>
- Sançar, T., Zabcı, C., & Akyüz, H.S. (2011). Quaternary activity of Varto Fault Zone (Eastern Anatolia) and new ideas about 1966 Varto earthquake, *EGU General Assembly, Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-9498-1 Vienna, Austria
- Sançar, T., Zabcı, C., Akyüz, H.S., Sunal G., & Villa I.M. (2015). Distributed transpressive continental deformation: the Varto Fault Zone, eastern Turkey. *Tectonophysics*, 661, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.08.018>
- Salvany, J. M. (2004). Tilting neotectonics of the Guadiamar Drainage Basin, SW Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (2), 145-160. <https://doi.org/10.1002/esp.1005>
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Schumm, S. A., Dumont, J. F., & Holbrook, J. M. (2000). *Active tectonics and alluvial rivers*. Cambridge University Press. 276 sayfa.
- Sharma, I. (2020). *Investigation of active tectonics in the Ramganga Basin Eastern Kumaon Himalaya using geomorphic Indices derived from digital elevation models*. [Ph. D. Thesis, Geology of the Aligarh Muslim University Department of geology].

- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C., & Bardajı T. (2003). Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: Geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, 50(1-3), 203-225. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00215-5)
- Sol, B. (2017). *Mudurnu Çayı Havzası'nın (Taşburnu-Abant Gölü batısı arası) flüvyo-tektonik jeomorfolojisi*. [Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü].
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel net work. In: Chow, V., (Ed.), *Handbook of applied hydrology*, McGraw Hill, New York, 39-76.
- Şaroğlu, F. (1986). *Doğu Anadolu'nun Neotektonik dönemde jeolojik ve yapısal evrimi*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi. https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&product_id=7857
- Tarhan, N. (2002). *1/500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları Erzurum paftası*. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
- Tonbul, S. (1990). Bingöl Ovası ve çevresinin iklimi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(1), 347-374.
- Tonbul, S. (1996). Bingöl Dağı'nın volkan morfolojisi ve volkanizma-tektonik ilişkileri. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(1), 311-340.
- Tonbul, S. (1997). Bingöl Dağı'nda buzul şekilleri. *Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 6, 347-374
- Topal, S., & Özkul, M. (2018). Determination of relative tectonic activity of the Honaz fault (SW Turkey) using geomorphic indices. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1200-1208. doi: 10.5505/pajes.2017.18199
- Topal, S. (2019). Karacasu Fayı'nın (GB Türkiye) göreceli tektonik aktivitesinin jeomorfik indislerle incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 37-48. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.409561>
- Wallace, R. E. (1968). Earthquake of August 19, 1966. Varto Area, eastern Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 11-45. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010011>
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J. B., & Wesling, J. R. (1988). Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology*, 1(3), 239-265. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(88\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0169-555X(88)90016-5)
- Willgoose, G., & Hancock, G. (1998). Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and process in transport-limited catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(7), 611-623. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199807\)23:7<611::AID-ESP872>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<611::AID-ESP872>3.0.CO;2-Y)

Detection of buried objects with different material properties by ground penetrating radar (GPR) method

Farklı malzeme özelliklerine sahip gömülü nesnelerin yer radarı (GPR) yöntemiyle tespiti

Mahmut SARI *¹ 

¹Gümüşhane University, Gümüşhane Vocational School, Construction Department, 29100, Gümüşhane

• Received: 20.06.2023

• Accepted: 15.09.2023

Abstract

GPR, which permits the capture of high-resolution subterranean data, has developed into a key geophysical technique for determining the depth, geometry, boundaries, and volumes of buried shallow objects. In this study, the detectability of the location, size, and physical property parameters of buried objects with the ground radar method was revealed by creating a laboratory environment in real field conditions. For this purpose, a realistic laboratory environment with a depth and length of 5 m was created on the filled soil material at the test site, and buried objects with different material properties were placed. In addition, by adding sand material to the middle part of the soil fill material in the test area, its situation in different layers was tried to be examined. GPR data were collected on the models using the RAMAC CU II system and a 500 MHz center frequency shield antenna. After processing the data, reflected/scattered electromagnetic (EM) wave fields on the radargram of a profile perpendicular to the buried objects were examined. In this way, the positions, sizes, physical properties (types) of buried objects along with their depths and their situations in different layer environments have been revealed. According to the results, the peak width of hyperbolas and the sizes of buried objects were determined on the processed radargrams. The types of buried objects and their situations in different layer environments are clearly revealed. The scattered wave field amplitudes of the plastic pipe (A and C regions) from the reflection coefficients are substantially lower than the scattered wave field amplitudes of the iron pipe (B region) from the buried objects. It is thought that the strong reflections extending from the C region to the deep on the radar are caused by the lead blocks in the plastic pipe.

Keywords: Buried objects, Ground penetrating radar, Shallow geophysics

Öz

Yüksek çözünürlüklü yeraltı verisi alınmasına olanak sağlayan GPR, gömülü sığ nesnelerin derinlik, geometri, sınır ve hacimlerinin hesaplanmasında önemli bir jeofizik yöntem haline gelmiştir. Bu çalışmada, yer radarı yöntemi ile gömülü nesnelerin konum, büyüklük ve fiziksel özellik parametrelerinin tespit edilebilirliği, gerçek arazi şartlarında laboratuvar ortamı oluşturularak ortaya konulmuştur. Bu amaçla, test sahasında dolgu toprak malzeme üzerinde derinlik ve uzunluğu 5 m olacak şekilde gerçeğe yakın bir laboratuvar ortamı oluşturulup farklı malzeme özelliklerinde gömülü nesnelere yerleştirilmiştir. Ayrıca, test sahasındaki toprak dolgu malzemenin orta kısmına kum malzeme eklenerek farklı tabakalardaki durumu da irdelenmeye çalışılmıştır. GPR verileri, modeller üzerinde RAMAC CU II sistem ve 500 MHz merkez frekanslı kapalı anten kullanılarak toplanmıştır. Veriler işlendikten sonra gömülü nesnelere dik bir profile ait radargram üzerinde yansımış/ saçılmış elektromanyetik (EM) dalga alanları irdelenmiştir. Böylece gömülü nesnelerin derinlikleri ile birlikte konumları, büyüklükleri, fiziksel özellikleri (cinsleri) ve farklı tabaka ortamlarındaki durumları ortaya konulmuştur. Sonuçlara göre, işlenmiş radargramlar üzerinde hiperbollerin tepe genişliği gömülü nesnelerin büyüklükleri belirlenmiştir. Gömülü nesnelerin cinsleri ve farklı tabaka ortamlarındaki durumları net bir şekilde ortaya konulmuştur. Plastik borunun yansıma katsayılarından saçılan dalga alanı genlikleri (A ve C bölgeleri), gömülü nesnelere demir borudan saçılan dalga alanı genliklerinden (B bölgesi) önemli ölçüde düşük olduğu görülmüştür. Radargram üzerinde C bölgesinden derine doğru uzanan kuvvetli yansımaların sebebinin plastik boru içerisindeki kurşun bloklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Gömülü nesnelere, Yer radarı, Sığ jeofizik

* Mahmut SARI; msari@gumushane.edu.tr

1. Introduction

Ground Penetrating Radar (GPR) is one of the important methods used to investigate the physical properties of structures in near-surface environments and the environments surrounding these structures. The position of the centimeter-sized target structures and their buried depths can be found with the use of suitable antenna selections in environments where ground radar measurements are feasible, such as those without substantial clay and water content. GPR is used in geotechnical applications to determine the underground properties of the areas where engineering structures will be built and to examine the reinforcements of these structures (Hugenschmidt, 2002; Sari & Öztürk, 2018; Sariçiçek & Şeren, 2020), in archaeological studies (Aydın et al., 2022; Neubauer et al., 2002) determination of buried structures and environments that cause environmental problems (Carcione et al., 2003; Kurt et al., 2009; Kurtuluş & Drahor, 2008; Uyar, 2017), revealing and mapping infrastructure features and problems in urban areas (Zeng & McMechan, 1997), revealing the sedimentary layer stacking features and lake floors and water depths in river and lake areas (Streich et al., 2006) in forensic research (Hammon III et al., 2000), identification of landmines (Lopera et al., 2007) and determination of ice thickness (Annan & Davis, 1977). It has become one of the most widely used methods of shallow geophysical research today, as it gives successful results in similar special subjects.

In this study, GPR measurements were taken in the garden of Gümüşhane University Vocational School of Health Sciences by choosing the filled soil area (shown in red rectangle) as the test site (Figure 1). The detectability of the location, size, and physical characteristics of buried objects with the ground radar method in the test area was demonstrated by creating a laboratory environment in real field conditions. After processing the GPR data, the reflected/scattered electromagnetic (EM) wave fields on the radargram of a profile perpendicular to the buried objects were examined, and their positions, sizes, physical properties (types) and status in different layer environments were determined along with the depth of the buried objects. Without prior information of the locations, sizes, or types of pipes, this investigation will reveal changes in depth as well as the types and sizes of subterranean pipes.



Figure1. Location map of study area

2. Material and method

GPR is an electromagnetic technique that can produce high-resolution images of the area being studied at shallow depths (Davis & Annan, 1986). GPR method encounters discontinuities with different dielectric properties and buried objects (pipes, foundation, etc.) during the propagation of high center frequency electromagnetic radar signals sent underground. In this case, it is based on the principle of reflecting some of the energy back and recording the double path travel time of the wave in nanoseconds with the receiving antennas on the surface (Figure 2a). Three alternative kinds of picture data can be produced during GPR scans. These GPR images are referred to as A-, B-, and C-scan images. Time-dependent data from a single spot on the surface make up the A-scan signals (Figure 2b). The A-scan signals from the following places are combined to create the B-scan image (Figure 2c).

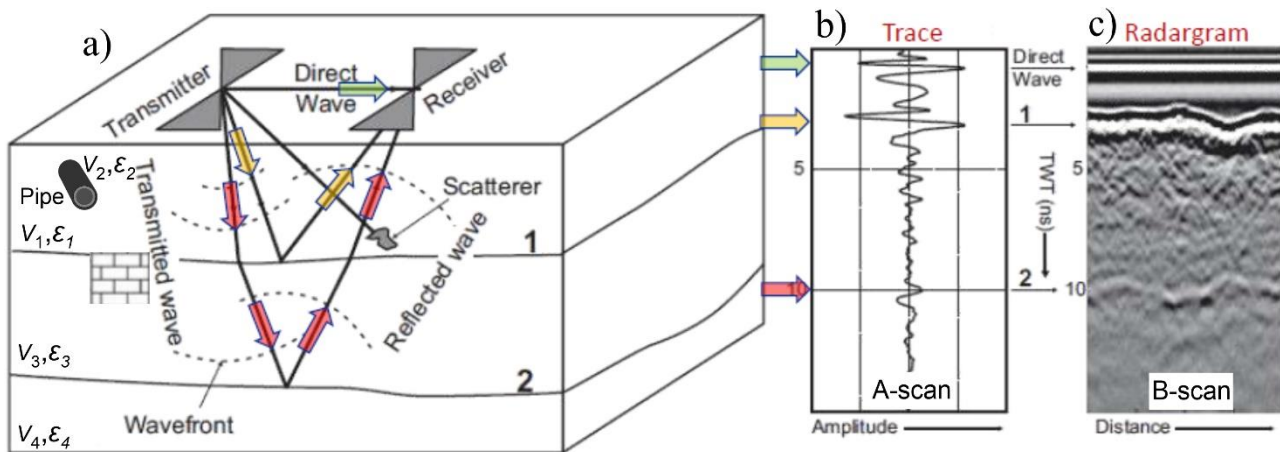


Figure 2. a) Working principle of GPR method b) GPR A-scan image, c) GPR B-scan image (ULiege & BGS, n.d)

The separation between these interfaces must be at least one wavelength of the radar energy traveling between them in order to detect reflections from two different parallel planes of a buried structure (Davis & Annan, 1989). If these two interfaces are closer to each other than the radar wavelength, they will either disappear or go unnoticed due to the interference of reflections from the upper and lower surfaces. In the opposite case, two separate reflections are obtained from these two interfaces and the sought structure can be determined. The reflection waves from a single mapped buried surface can be observed regardless of the radar wavelength that penetrates the surroundings if this surface creates a reflection that cannot be confused with other nearby structures. However, if this surface is an irregular or undulating surface, higher subsurface resolution is required to image it correctly. GPR signals can reach depths of approximately 50-60 m in materials or environments with low conductivity such as dry sand, granite or marble (Table 1). Wet clay, shale and other highly conductive materials absorb GPR signals, thus limiting the depth (penetration depth) that this signal can reach to 1 m or less. High-frequency antennas increase the resolution while the depth of search decreases (Daniels, 2004; Davis & Annan, 1989). In this study, information was obtained from a depth of approximately 5m using the RAMAC CU II system 500 MHz center frequency indoor antenna.

Table 1. Approximate depth ranges for different antenna frequencies (Ramac/GPR, n.d).

Antenna Frequency (MHz)	Lower limit of object target size (m)	Approximate depth range * (m)	Approximate penetration Depth (m)
100	0.1-1	2-15	15-25
250	0.05-0.5	1-10	5-15
500	0.04	1-5	3-10
800	0.02	0.4-2	1-6

*In normal geological environment absent of low resistive layers

The most effective method used to determine the types of pipes is to investigate the amplitude size and polarity. The reflection coefficient of the reflected or dispersed wave from the pipe provides the simplest explanation

for why the polarity is the same or different as well as the amplitude information. The reflection coefficient is for the wave perpendicular to the pipe;

$$R = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

is defined by the relation (Annan, 2005). Here, V_1 and ϵ_1 are respectively; It shows the EM wave velocity and dielectric coefficient of the environment (dry sand poured into the work area) in which the pipe is located. V_2 and ϵ_2 are respectively; represents the EM wave velocity and dielectric coefficient of the pipes.

3. Data acquisition: GPR mapping and surveying

In the garden of Gümüşhane University Vocational School of Health Sciences, A and C: Plastic pipes (40 cm in diameter, 47 cm in length, sewage waste pipe), with different material properties to be buried in the fill soil test site, B: Iron fuel tank (30 cm in diameter, 68 cm in length, truck fuel tank) and lead blocks selected (Figure 3).

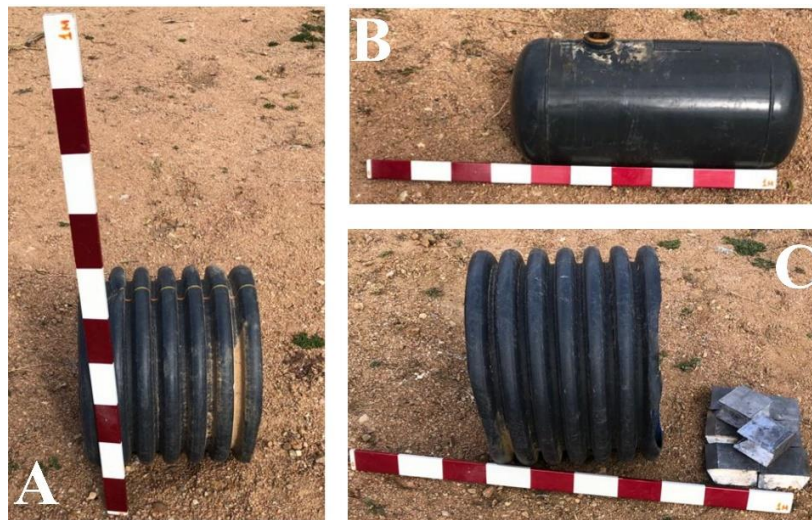


Figure 3. Objects with different material properties to be buried in the test site

The test site was first limited with white lime, with a width of 80 cm and a length of 5 m, and excavation began with the help of ladle (CAT brand) at a depth of 5 m. (Figure 4). After the excavation process was completed, buried objects A, B and C began to be placed at a certain depth in the excavated area (Figure 5). The intermediate layer was filled with truck-transported sand before being once again covered with soil filling. The test area covered with the filling material was made ready for the GPR measurement by limiting it with white lines as was done at the beginning.

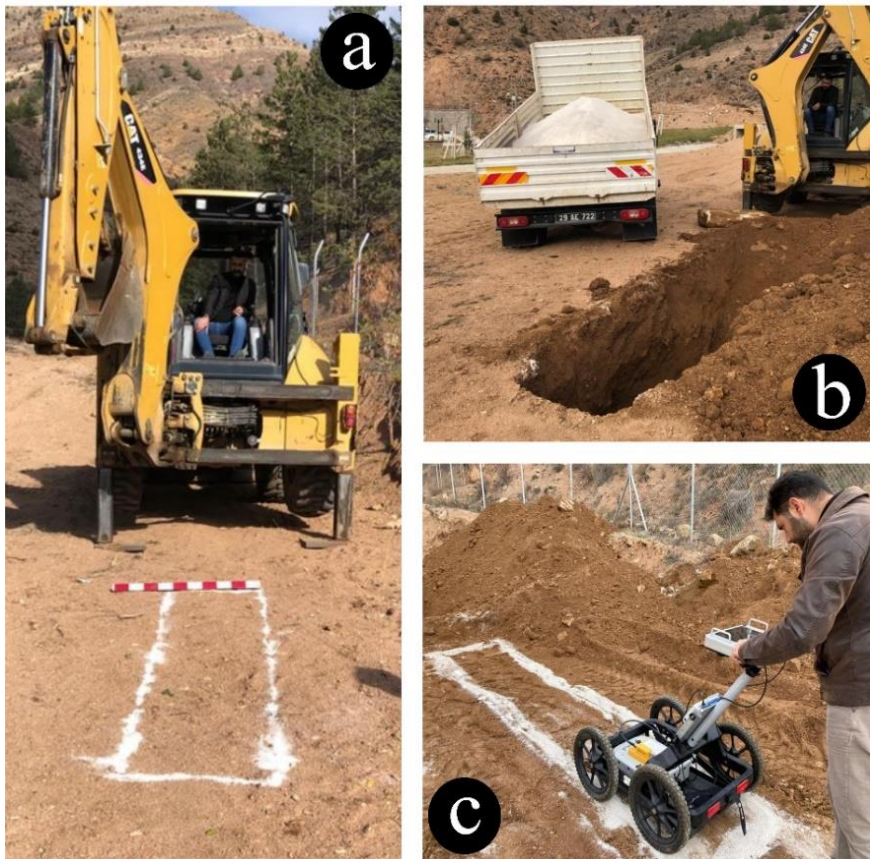


Figure 4. a) Excavation of the limited test area with the help of ladle, b) pouring sand into the interlayer with a truck, c) reaching the measurement stage of the filled test area with GPR

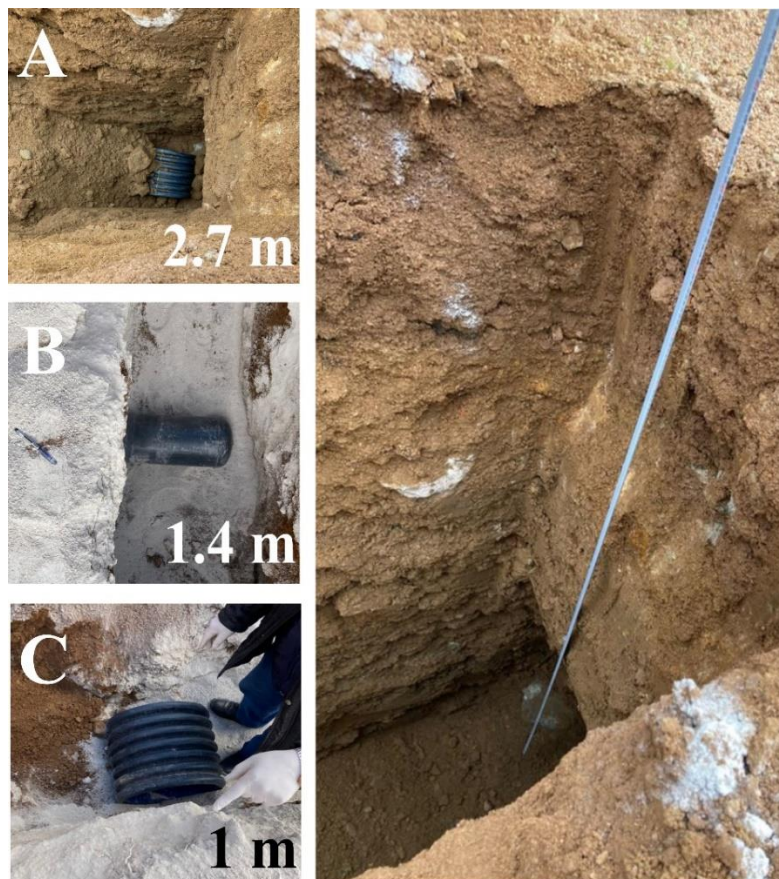


Figure 5. Depths where buried objects with different material properties are placed

GPR measurements were taken in 1 profile (5m long) in a way that cuts the buried objects vertically in the limited test area. The parameters used in GPR measurements are given in Table 2. Data processing steps applied to the obtained GPR raw data are given in Table 3.

Table 2. GPR measurement parameters used during field studies

Measurement parameters	
Antenna freq	500 MHz
Trace interval	1 cm
Samples	512
Sampling freq.	5862 MHz
Time window	60.24 ns
Profile intervals	50 cm

Table 3. Filter processing steps and parameters of the GPR data

Filter name	Parameters
Time-zero correction	-4.5 ns
Subtract-mean (dewow)	2 ns
Energy decay	0.512
Subtracting average	31 trace – 0 to 60.24 ns
Band-pass filter	200-400-600-800 MHz
Velocity analysis	0.1 m ns^{-1}
Diffraction stack migration	31 trace/ 0.1 m ns^{-1} /0-60.24 ns

4. Results and discussion

The working test area was determined to be 5m in length, 5m in depth and 80 cm in width, and ground radar measurements were started by burying objects selected from plastic and iron materials (Figure 6). The two-dimensional ground radar section of the ground radar method reveals the position, size, amplitude, hyperbola, and scattering states of the buried items (Figure 7).

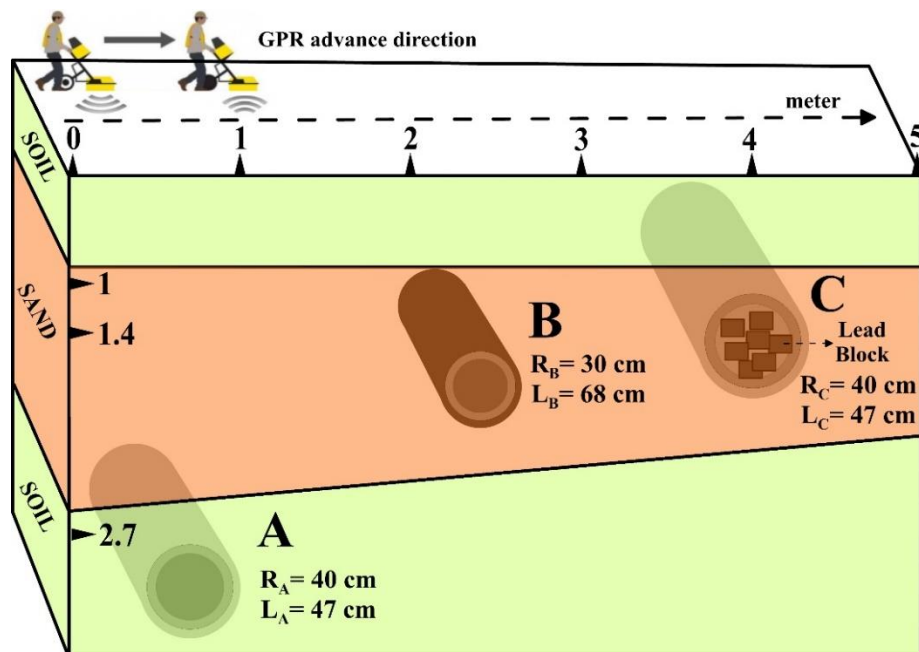


Figure 6. Subterranean states of buried objects with different material properties

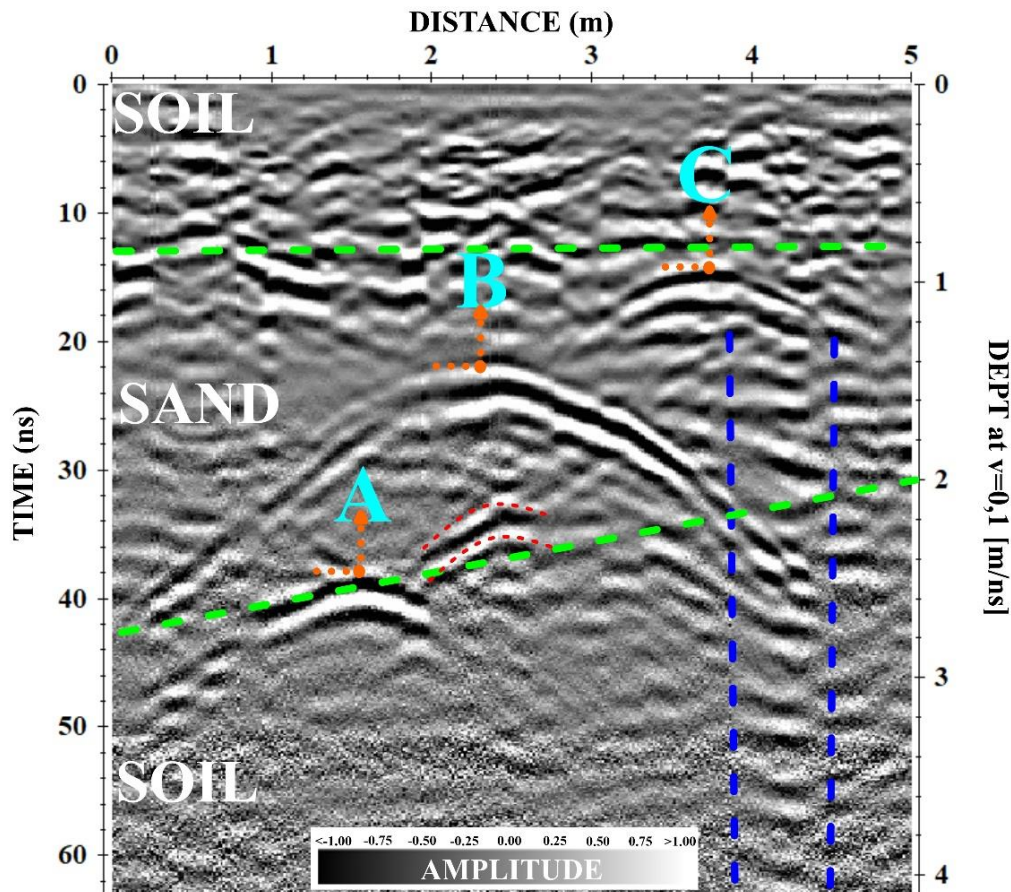


Figure 7. Two-dimensional radar cross section of buried objects with different material properties

The positions of the objects with various material properties buried underneath were clearly shown by the GPR measurement findings obtained in the research region. Hyperbola peaks of buried objects are marked with an orange circle and marked A, B, and C on the figure. A hyperbola peak is 2.7m, B hyperbola peak is 1.4 and C hyperbola peak is 1m in radargram sections and it has been determined that they are exactly the same as the measurements in their buried state. Since the filling materials of the two-dimensional radar cross-section are known, the depth information and layer conditions determined by the simple “depth=velocity x time / 2” approach can be determined by using the velocity and time information. In Figure 7, the upper green line indicates the upper soil boundary, and the sand material boundary between the two green lines. Since the sand area is homogeneous, it gives us a clearer image on the radargram. It is seen that the reflections of the lead blocks we put in the plastic pipe in the C hyperbola peak region continue to the lowest depth (The region indicated by the blue dashed line in Figure 7). The amplitude and polarity of the reflected/scattered wave fields are effective in determining the type of pipe (Kurt et al., 2009). The EM wave velocities of the metals iron and plastic, which we utilize as buried objects in this work, are known to be 0.017 m/ns and 0.16 m/ns, respectively (Zeng & McMechan, 1997). Accordingly, under normal conditions, the scattered wave fields from the iron pipe are of negative polarity and the wave fields from the very high amplitude plastic pipe are of positive polarity and low amplitude. Also, due to the high amplitude, repeated scattered wave field hyperbolas can be seen inside the hollow large diameter pipe (Shown with red lines in Figure 7). Additionally, the dry EM wave velocities of sandy soil and sand are 0.13 m/ns and 0.19 m/ns, respectively (Leckebusch, 2003). Dry sand and plastic pipes EM wave velocities being relatively close to one another, the reflection coefficient value of the plastic pipe is lower than that of the iron pipe. Therefore, the scattered wave field hyperbolas of the plastic pipe attenuate faster than the scattered wave field hyperbolas of the smaller diameter iron pipe (In Figure 7, A and C are damped faster than B amplitude). Also, absent from the scattering hyperbolas of the plastic pipe are in-pipe repetitions (ringing) (Figure 7).

5. Conclusions

In the study, it is carried out to detect buried objects with different material properties by ground radar method. The results obtained by examining the GPR measurement are given below.

- The positions of buried objects with different material properties are clearly identified.
- It is known that the amplitudes of the scattered wave fields coming from the iron pipe are significantly larger than those coming from the plastic pipe.
- It has been discovered that the magnitudes of the amplitudes depend on the EM wave field velocities of the medium and pipes as well as the associated reflection coefficients.
- The scattered wave field hyperbolas of the plastic pipe have been shown to attenuate more quickly than those of the smaller diameter iron pipe. It has been determined that intra-pipe repetitions (ringing) are not seen in the scattering hyperbolas of the plastic pipe, but only in the iron pipe.

Acknowledgement

I would like to thank Gümüşhane University for making us use the construction machines during my field work, Ustaoglu Group Ready-Mixed Concrete for providing us with the necessary sand transport, and Dr. Ersin BÜYÜK for their contributions during the measurement.

Author contribution

The manuscript was written by the corresponding author.

Declaration of ethical code

The author declares that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval or legal-specific permission.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Annan, A. (2005). Ground-penetrating radar. In *Near-surface geophysics* (pp. 357-438). Society of Exploration Geophysicists.
- Annan, A., & Davis, J. (1977). Impulse radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry. *Geological Survey of Canada, Report of Activities Paper, 77*, 117-124.
- Aydın, Z. O., Babacan, A. E., Seren, A., & Gelisli, K. (2022). New historical findings discovery at inner areas of Akçakale Castle (Trabzon, Turkey) with GPR Method. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 40*(2), 344-355.
- Carcione, J. M., Seriani, G., & Gei, D. (2003). Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. *Journal of Applied Geophysics, 52*(4), 177-191. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(03\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(03)00012-0).
- Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar* (Vol. 2nd edition). The Institution of Electrical Engineers.
- Davis, J., & Annan, A. (1986). Machinations: high-resolution sounding using ground-probing radar. *Geoscience Canada*.
- Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1. *Geophysical prospecting, 37*(5), 531-551.

- Hammon III, W. S., McMechan, G. A., & Zeng, X. (2000). Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, 45(3), 171-186. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00027-6).
- Hugenschmidt, J. (2002). Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and building materials*, 16(3), 147-154.
- Kurt, B., Kadioğlu, S., & Ekincioglu, E. (2009). Determination of the location, size and physical characteristics of buried pipes by ground penetrating radar method Yer radarı yöntemi ile gömülü boruların konum, büyüklük ve fiziksel özellikleri ile belirlenmesi. *Yerbilimleri/Earth Sciences*, 30(1).
- Kurtulmuş, T. Ö., & Drahor, M. G. (2008). Yer radarı modellemesinde fiziksel ve geometrik parametre etkilerinin araştırılması. *Yerbilimleri*, 29(2), 37-52.
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating radar: a modern three-dimensional prospecting method. *Archaeological prospection*, 10(4), 213-240.
- Lopera, O., Milisavljević, N., & Lambot, S. (2007). Clutter reduction in GPR measurements for detecting shallow buried landmines: a Colombian case study. *Near Surface Geophysics*, 5(1), 57-64. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006018>.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., & Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: an approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological prospection*, 9(3), 135-156. <https://doi.org/10.1002/arp.183>.
- Ramac/GPR. (n.d). Operating manual version 1. <https://fcc.report/FCC-ID/QLASH1GHZ/375215.pdf>
- Sari, M., & Öztürk, S. (2018). Detection of the complex ground problems by ground penetrating radar: Examples from Gümüşhane University. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(4), 1297-1310.
- Sarıççek, I., & Şeren, A. (2020). In-Situ Wall Concrete Quality Using Velocity Field-Dependent Migration In Zıgana And Torul Tunnels. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(2), 979-993.
- Streich, R., Van der Kruk, J., & Green, A. G. (2006). Three-dimensional multicomponent georadar imaging of sedimentary structures. *Near Surface Geophysics*, 4(1), 39-48. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005030>.
- ULiege & BGS. (n.d). Introduction to Ground Penetrating Radar. https://vb.nweurope.eu/media/12924/5-rawfill-training-days_geophysics_gpr.pdf
- Uyar, Ş. (2017). *Investigation of problems in clean and waste water infrastructure systems with georadar method*. KTU Institute of Science.
- Zeng, X., & McMechan, G. A. (1997). GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics*, 62(3), 797-806. <https://doi.org/10.1190/1.1444189>.

Derin öğrenme tabanlı saklanan kamufle tankların tespiti: son teknoloji YOLO ağlarının karşılaştırmalı analizi

Detection of hidden camouflaged tanks based on deep learning: comparative analysis of state-of-the-art YOLO networks

Ahmet Furkan BAYRAM*¹ , Vasif NABİYEYEV² 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 26.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 18.09.2023

Öz

Düşman hedeflerinin tespiti ve takibi, askeri operasyonlar için hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada, kamufle tankların tespiti için derin öğrenme tekniklerinin kullanılması incelenmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, ormanlık alanlarda gizlenmiş kamufle tankların tespit edilmesini sağlamaktır. Bu sayede, düşman hedeflerinin tespiti ve takibi daha etkili bir şekilde yapılabilmekte ve askerlerin güvenliği sağlanabilmektedir. YOLO mimarisi, nesne tespiti ve sınıflandırma işlemlerini tek bir ağda birleştirerek daha hızlı ve doğru sonuçlar elde etmeyi sağlamaktadır. YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7 ve YOLOv8 mimari tasarımları karşılaştırılmıştır. YOLOv6 mimari tasarımı, diğer tasarımlardan daha iyi performans göstermiştir. Bu tasarım, 2.234 adet tank görüntüsü ve 774 adet otomobil görüntüsü kullanılarak yapılan performans analizi sonucunda 0,983 mAP50 değerini, 0,966 kesinliği, 0,935 anma ve 0,950 F1 skorunu elde etmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, farklı YOLO mimari tasarımlarının nesne tespiti ve sınıflandırma işlemlerinde yüksek performans elde ettiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Kamufle tank tespiti, YOLOv6, Zırhlı araçlar

Abstract

Detection and tracking of enemy targets is vital to military operations. In this study, the use of deep learning techniques to detect camouflaged tanks is examined. The main purpose of this study is to detect camouflaged tanks hidden in forest areas. In this way, the detection and tracking of enemy targets can be done more effectively and the security of the soldiers can be ensured. The YOLO architecture combines object detection and classification into a single network, resulting in faster and more accurate results. YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7 and YOLOv8 architectural designs are compared. The YOLOv6 architectural design outperforms other designs. This design obtained 0,983 mAP50 value, 0,966 precision, 0,935 recall and 0,950 F1 score as a result of performance analysis using 2.234 tank images and 774 car images. The results of this study show that YOLO architectural designs show high performance in object detection and classification.

Keywords: Deep learning, Camouflage tank detection, YOLOv6, Armored vehicles

*Ahmet Furkan BAYRAM; bayramahmet48@gmail.com

1. Giriş

1. Introduction

Gelişen teknoloji ve bilim, hayatın her alanında olduğu gibi askeri operasyonlarda da önemli değişikliklere sebep olmaktadır. Bu değişikliklerin en önemlisi, askeri operasyonlarda yapay zeka ve derin öğrenme tabanlı teknolojilerin kullanılmasıdır. Bu teknolojiler, askeri operasyonların etkinliğini ve hassasiyetini artırmakta, böylece askeri güçlerin stratejik avantajlar elde etmelerini sağlamaktadır. Bu çalışma, derin öğrenme tabanlı teknolojilerin, kamufle tankların tespiti gibi stratejik öneme sahip bir görevdeki faydasını araştırmaktadır. Bu araştırma, askeri operasyonların daha etkin ve hassas bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bilgisayarla görme, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi alanlardaki hızlı gelişmeler, belirli hedeflerin tespiti gibi zorlu görevleri gerçekleştirmek için yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu teknolojiler, askeri amaçlar dahil birçok alanda kullanılabilir. Özellikle, askeri alanda düşman hedeflerinin tespiti, tanıma ve takibi gibi konuların önemi oldukça yüksektir. Bu konular, askeri güçlerin konuşlanma dinamiklerine hakim olmaları, düşman hedeflerine hassas vuruş yapabilmeleri ve stratejik avantajlar elde edebilmeleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Ancak ormanda saklanan kamufle olmuş tankların tespiti gibi konular, bilgisayarla görme araştırmaları alanında oldukça zorlu bir konudur. Orman ortamı, kamufleli araçların görünürlüğünü azaltmak için tasarlanmıştır ve bu nedenle görüntüdeki arka planın karmaşıklığı ve zırhlı araçların şekil ve boyutları gibi faktörler, tespit algoritmaları için büyük zorluklar oluşturmaktadır.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için, You Only Look Once (YOLO) gibi tespit algoritmaları geliştirilmiştir. YOLO yöntemi, görüntüdeki birden fazla nesnenin tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, konvolüsyon sinir ağları (CNN) kullanarak görüntüdeki nesnelere birbirinden ayırt etmektedir. YOLO, görüntüyü küçük parçalara bölmekte, bu parçaları CNN ile tarar ve nesne olarak tanımlanabilecek herhangi bir özellik bulunması durumunda parçayı işaretlemektedir. Bu işaretlenen parçalar birleştirilerek ortaya çıkan alanlar nesnenin yer aldığı bölgeler olarak tanımlanmaktadır.

YOLO yöntemi, ormanda saklanan kamufleli tankların tespiti için oldukça etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, görüntüdeki arka planın karmaşıklığına ve zırhlı araçların şekil ve boyutlarına rağmen, aracın görüntüsünde belirli özellikleri tespit ederek nesneyi işaretlemektedir. YOLO algoritması, hızlı ve doğru bir şekilde çalışmakta ve diğer tespit algoritmalarına göre daha yüksek doğruluk oranları sunmaktadır (Liu et al., 2021).

Bu çalışmada, YOLO tespit algoritmasının güncel sürümlerinin bu sorunun çözümüne katkısı araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, ormanda saklanan kamufle olmuş tankların tespitini yaparak zaman kazanmak ve hata oranını en aza indirmektir.

Önerilen bu çalışmanın katkıları şu şekilde özetlenmiştir:

1. Açık kaynaklı bir veri seti, tank ve otomobil olarak iki sınıfta etiketlenmiştir.
2. Askeri operasyonlarda yapılan sistemin kullanılabilirliği araştırılmıştır.
3. Son teknoloji YOLO algoritmalarının karşılaştırılmalı analizi gerçekleştirilmiştir.

Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de, muharebe araçlarının tespiti için saptamaya dayalı ilgili araştırmalar rapor edilmiştir. Bölüm 3’te, kullanılan metodolojiler detaylandırılmıştır. 4. bölümde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Bölüm 5’te, elde edilen sonuçlar rapor edilmiştir.

2. İlgili çalışmalar

2. Related works

Bu bölümde, askeri ve askeri olmayan araçlar için çeşitli saptama teknikleri ile ilgili literatürdeki başlıca çalışmalar sunulmuştur.

Xiaozhu ve He (Xie & He, 2017), savaş ortamında bulunan zırhlı araçların tespitini gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları bu çalışmada 7.000 adet tank ve tekerlekli muharebe aracı içeren bir veri seti kullanılmıştır. İlgili veri setindeki sınıfların tespiti işlemi için Faster R-CNN tabanlı derin öğrenme ağ

kullanılmıştır. Yapılan çalışmada tank sınıfı için %97,20 tespit oranı ve %89,60 tanıma oranı; tekerlekli muharebe aracı sınıfı için ise %96,70 tespit oranı ve %88,90 tanıma oranı elde edilmiştir.

Böyük vd. (Boyuk vd., 2020), gerçekleştirdikleri çalışmada insansız hava aracından alınan görüntüler ile araç tespiti yapmayı amaçlamışlardır. Model geliştirme aşamasında Stanford ve PSU veri setinde bulunan toplam 8.776 görüntü kullanılmıştır. Araç nesnelerin tespiti için Faster R-CNN, YOLOv3-Tiny ve SSD (single shot detector) algoritmaları analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada Faster R-CNN, SSD ve YOLOv3-Tiny sırasıyla %75,16, %52,80 ve %56,20 mAP (mean average precision) değerlerini elde etmiştir.

Kamran vd. (Kamran vd., 2019), gerçekleştirdikleri çalışmada havadan alınan görüntülerle askeri araç ile sivil araçların tespitini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan tespit işlemi için kullanılan veri seti taraflarınca hazırlanmış olup 15.086 görüntü içermektedir. İlgili nesnelerin tespiti için Faster R-CNN, R-FCN ve SSD algoritmaları kullanılmıştır. Faster R-CNN algoritması askeri araba için %62,79, sivil araba için %58,88 ve araç olmayan nesnelere için %60,72 mAP değerleri ile en iyi sonucu vermiştir.

Gupta vd. (Gupta vd., 2022), gerçekleştirdikleri çalışmada havadan alınan görüntülerle askeri kamyonlar, askeri tanklar, askeri uçaklar, askeri helikopterler, sivil araba ve sivil hava araçları sınıflarının tespitini amaçlamışlardır. Bu çalışma için kendilerince oluşturulan 6.772 görsel içeren veri seti kullanılmıştır. İlgili nesnelerin tespiti için Quantize SSD Mobilenet v2 ve YOLOv3 Tiny derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. Yapılan araştırmada elde edilen gözlemler ve sonuçlara göre, YOLOv3 Tiny'nin diğer modele göre iyi performans gösterdiğini ayrıca oldukça verimli ve hafif olması nedeniyle uç tabanlı cihazlarla bile çalışabileceğini göstermiştir. YOLOv3 Tiny algoritması %79 hassaslık, %76 anma ve %77 F1 Skor değerini elde etmiştir.

Kyrkou vd. (Kyrkou vd., 2018), gerçekleştirdikleri çalışmada bir İHA (insansız hava aracı) kullanarak araç tespiti için tek atışlı CNN dedektörleri kullanılmıştır. Eğitim aşamaları, evrişimli bir sinir ağı mimarisi ile birlikte verimli bir şekilde haritalaması için gerekli optimizasyonlar tasarlanmıştır. YOLO algoritmasının, YOLOv3 Tiny, TinyYOLOVoc, TinyYOLONet ve DroNet olmak üzere dört farklı yapıyla uygulanmıştır. Dronet algoritması genel olarak %95 doğruluk sağlamakta ve saniyede 5-6 kare hızında çalışmaktadır.

Sun vd. (Sun vd., 2022), SAR teknolojinin gelişmesiyle birlikte, bu görüntüleri kullanarak askeri araçların tespitini amaçlamışlardır. Bu çalışmada BMP2, BTR70 ve T72 askeri araç türleri kullanılmıştır. İlgili nesnelerin tespiti için Faster RCNN, SSD300_VGG16, SSD512_VGG16, SSD_ResNet_SE_Gaussian_filter, YOLOv5, özelleştirilmiş YOLOv5, özelleştirilmiş YOLOv5 ile Transformer⁴ ve özelleştirilmiş YOLOv5 ile Transformer⁶ karşılaştırılmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Özelleştirilmiş YOLOv5 algoritmasında neck-transformer yöntemi kullanılmıştır. Yapılan araştırmada elde edilen gözlemler ve sonuçlara göre, özelleştirilmiş YOLOv5 ile Transformer⁶ %93,30 mAP değeri ile en iyi sonucu elde etmiştir.

Yong vd. (Yong & Yeong, 2018), gerçekleştirdikleri çalışmada drone görüntülerinden yararlanarak ormanda bulunan insan ve nesnelerin tespitini gerçekleştirmişlerdir. Nesne sınıflandırması için GoogleNet ve MobileNet mimarileri kullanılmıştır. Bu çalışma için kendilerince oluşturulan 650 insan ve 105 ağaç kesen araç görüntüsü içeren veri seti kullanılmıştır. Yapılan çalışmada %77,74 ortalama kesinlik, %77,39 ortalama anma ve %73,06 F-Skor değeri elde etmiştir.

Mansour vd. (Mansour vd., 2019), gerçekleştirdikleri çalışmada uydu görüntülerini kullanarak araç tespitini gerçekleştirmişlerdir. Uydu görüntülerinde araç gibi küçük nesnelerin tespiti arka planın karmaşıklığı, araç renkleri, uydu görüntüleri için büyük boyutlu olması sebebiyle zorlu bir görevdir. Bu görev için Inception-V2 tabanlı Faster R-CNN ve SSD tespit algoritmaları kullanılmıştır. Çalışmada Google Earth, JF-2 ve WORLD-VIEW uydularından toplanan görüntüler kullanılmıştır. Eğitim için 324 görüntü ve test için 73 görüntüden oluşan toplam 8.447 araç etiketinden yararlanılmıştır. Gerçekleştirilen araştırmada elde edilen gözlemler ve sonuçlara göre, Faster R-CNN Inception V2 algoritması %89,21, SSD Inception V2 algoritması ise %84,21 mAP değeri ile daha yüksek başarı oranı elde etmiştir. Doğruluk değeri açısından Faster R-CNN Inception V2 algoritması daha yüksek değer elde etmesine rağmen SSD Inception V2 algoritmasından daha uzun sürede eğitim gerçekleştirmiştir.

Tablo 1. Literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma
Table 1. Comparison with other studies in the literature

Yazarlar	Veri setleri	Görüntü adeti	Mimari	Sonuç
(Xie & He, 2017)	Kendi veri setini oluşturmuşlardır.	7.000	Faster R-CNN	%97,20 mAP
(Boyuk vd., 2020)	Standford ve PSU	8.776	Faster R-CNN	%75,16 mAP
(Kamran vd., 2019)	Kendi veri setini oluşturmuşlardır.	15.086	Faster R-CNN	%60,72 mAP
(Gupta vd., 2022)	Kendi veri setini oluşturmuşlardır.	6.772	YOLOv3-Tiny	%77,00 F1 Skor
(Kyrkou vd., 2018)	Kendi veri setini oluşturmuşlardır.	350	DroNet	%95,00 Doğruluk
(Sun vd., 2022)	MSTAR	32	YOLOv5-Transformer ⁶	%93,30 mAP
(Yong & Yeong, 2018)	Kendi veri setini oluşturmuşlardır.	755	GoogleNet	%73,06 F1 Skor
(Mansour vd., 2019)	Kendi veri setini oluşturmuşlardır.	397	Faster R-CNN InceptionV2	%89,21 mAP
Bu çalışma	Özgün veri seti	3.008	YOLOv6	%98,30 mAP



Şekil 1. Veri setinde kullanılan örnek görseller
Figure 1. Sample images used in the dataset

3.2. Veri ön işleme

3.2. Data preprocessing

Görüntüler YOLO algoritmalarına girdi olarak verilmeden önce ön işleme adımları uygulanmıştır. Tüm görüntüler 640x640 boyutlarında yeniden ölçeklendirilmiştir. Son olarak, veri setindeki görüntülere ve 0 ile 1 aralığında ölçeklenen piksel değerlerine normalizasyon uygulanmıştır.

3.3. Tespit algoritmaları

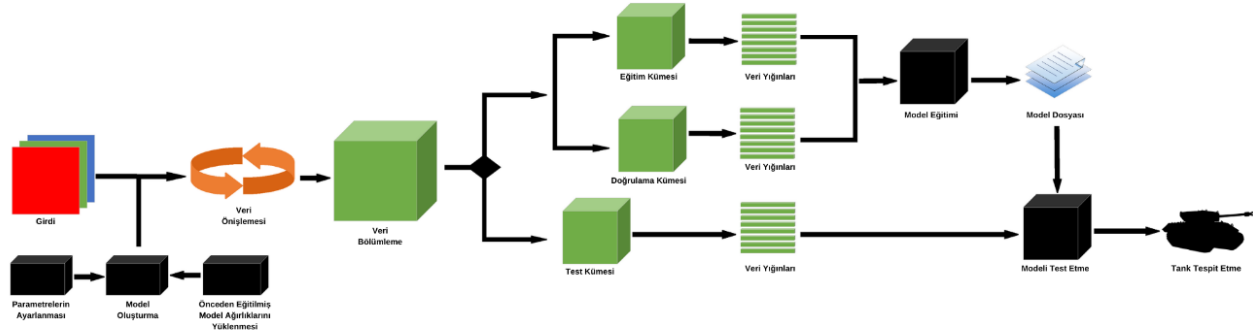
3.3. Detection Algorithms

Bu çalışmada ormanda saklanan kamuflejli takların tespitindeki performansları karşılaştırmak için YOLOv5 (Haque et al., 2022), YOLOv6 (Li vd., 2022), YOLOv7 (Wang vd., 2022) ve YOLOv8 (Reis et al., n.d.) mimarisi tasarımları kullanılmıştır.

YOLO mimarisi tasarımları, görüntüdeki bazı bölgeleri seçmek yerine, görüntüdeki bölgeleri algılamakta ve etrafına sınırlayıcı kutular çizmek için görüntünün tamamına bir sinir ağı uygulamaktadır. YOLO mimarilerinin tasarımları, girdi görüntüsünü $S \times S$ ızgaralara bölen tek bir derin evrişimli sinir ağıdır. Her ızgara alanı, güven derecesine karşılık gelen ortalanmış hedef sınırlama kutusunu tahmin etmekten sorumludur. Her ızgara hücresi olasılık sınırlarını tahmin edilmektedir. Güven oranını veren formüle denklem (1)'de yer verilmiştir.

$$\text{Güven oranı} = pr(\text{sınıf}|\text{nesne}).pr(\text{nesne}).IoU = pr(\text{sınıf}).IoU \quad (1)$$

Mimari tasarımlar, bu ızgarada istenen herhangi bir nesnenin olup olmadığını bildiren ilişkili bir vektöre sahiptir. Öte yandan, bu modeller aşamalı yapısından dolayı zaman içinde daha iyi öğrenmekte ve daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu tasarımların çalışma mekanizması, ilgili bölgede tespit edilen objeler içerisinde doğruluk oranı en yüksek olan objenin korunmasına dayalıdır.



Şekil 2. YOLO mimarisinin akış diyagramı

Figure 2. Flowchart of YOLO architecture

YOLOv5 nesne algılama algoritması, tek aşamalı bir çapa tabanlı (anchor-based) nesne algılama yöntemidir ve CSPNet (cross stage partial network), PANet (pyramid attention network) ve FPN (feature pyramid network) gibi özellikleri içeren bir mimariye sahiptir. YOLO katmanı ile çok ölçekli nesne tahmini yapılabilmekte ve Pascal VOC ve Microsoft COCO gibi veri kümelerinde başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. YOLOv5, eğitim sırasında parametre sayısını azaltarak hız ve doğruluk artışı sağlayabilen CSPNet kullanmaktadır. Ayrıca yol toplama ağı (PANet) gibi mimari özellikler, bilgi aktarımının verimliliğini artırmaktadır. FPN özelliği alt katmanlardan özellik aktarımına odaklanarak nesne yerleştirme görevlerini iyileştirmektedir (Haque et al., 2022).

YOLOv6, daha fazla özellik haritası ve daha fazla sınıflandırma katmanı kullanarak mAP oranını artırmayı başarmıştır. Ayrıca daha fazla çapa kutusu ve daha fazla özellik haritası kullanımı sayesinde daha fazla nesne tespit etmiştir. YOLOv7 ise bu özellikleri daha da genişleterek, özellik haritalarını ve sınıflandırma katmanlarını artırarak nesne algılama kabiliyetini daha da geliştirmiştir (Li vd., 2022).

YOLO serisinin en son versiyonu olan YOLOv8, bir dizi önemli yenilik getirmiştir. Yeni bir mimari tasarıma sahip olan YOLOv8, FPN ve PAN modüllerini birleştirmektedir. FPN, giriş görüntüsünün çözünürlüğünü kademeli olarak azaltırken özellik kanallarının sayısını artırmaktadır. Bu, farklı ölçeklerde ve çözünürlüklerde nesnelere algılayabilen özellik haritalarının oluşturulmasını sağlamaktadır. PAN mimarisi, ağı farklı seviyelerinden özellikleri toplayarak, farklı boyut ve şekillerdeki nesnelere doğru bir şekilde algılama yeteneğini artırmaktadır (Reis et al., n.d.).

YOLOv8, önceki versiyonlarına göre daha gelişmiş son işlem teknikleriyle donatılmıştır. Sinir ağı tarafından üretilen tahmini sınırlayıcı kutular ve nesne skorları üzerinde uygulanan bu teknikler, algılama sonuçlarını rafine etmekte, gereksiz algılamaları kaldırmakta ve tahminlerin genel doğruluğunu artırmaktadır. Bu teknikler arasında, YOLOv5'te kullanılan NMS (non-maximum suppression) tekniğinin bir varyantı olan Soft-NMS bulunmaktadır. Soft-NMS, örtüşen sınırlayıcı kutuları tamamen silmek yerine, onlara yumuşak bir eşik uygulamaktadır (Reis et al., n.d.).

YOLOv6 ve YOLOv7 algoritmaları yakın zamanda sırasıyla Haziran ve Temmuz 2022'de yayınlanmıştır. YOLOv6-L, COCO veri setinde %52.8'lik bir mAP değeri elde ederek mAP değeri %49 olan YOLOv5-L algoritmasını geride bırakmıştır. YOLOv8-L algoritması ise %52.9 değeri ile YOLOv6-L algoritmasını az bir farkla geride bırakmıştır. Tablo 2'de YOLO modelleri ile ilgili çoklu derinlik, çoklu genişlik, mAP, parametre sayısı ve FLOPs (floating point operations) değerlerine yer verilmiştir.

Tablo 2. YOLO modellerinin değerlerinin karşılaştırılması**Table 2.** Comparison of values of YOLO models

Model	Çoklu derinlik	Çoklu genişlik	mAP50-95	Parametre sayısı (M)	FLOPs (G)
YOLOv5	1,33	1,25	50,7	86,7	205,7
YOLOv6	1,0	1,0	52,8	59,6	150,7
YOLOv7	1,0	1,0	53,1	71,3	189,9
YOLOv8	1,0	1,25	53,9	68,2	257,8

3.4. Performans değerlendirme metrikleri

3.4. Performance evaluation metrics

Çalışmada kullanılan modelin performansının analizi için mean average precision (mAP), kesinlik, anma ve F1 skor performans değerlendirme metriği kullanılmıştır.

True Positive (TP): Test sırasında elde edilen IoU (intersection over union) değeri 0,5'ten büyükse TP olarak değerlendirilmektedir.

False Positive (FP): Test sırasında elde edilen IoU değeri 0,5'ten küçükse veya sınırlayıcı kutular birden fazla oluşmuş ise FP olarak değerlendirilmektedir.

False Negative (FN): Nesne tespit edilmesi gereken durumda herhangi bir nesne tespit edilmediyse veya IoU değeri 0,5'ten büyükken sınıfı yanlış ise FN olarak değerlendirilmektedir.

TP, FP ve FN parametrelerinin kullanımı ile Kesinlik ve Anma parametreleri hesaplanmaktadır. Bu parametrelere ait formüller denklem (2), denklem (3) ve denklem (4)'de gösterilmiştir;

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

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

$$\text{F1 Skor} = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Anma}}{\text{Kesinlik} + \text{Anma}} \quad (4)$$

4. Deneysel analizler

4. Experimental Analysis

YOLO mimarisi tasarımları için eğitim aşaması şu şekildedir:

Ağırlık güncellemeleri için Adam optimizyer, kayıp fonksiyonu olarak çapraz entropi kullanılmış ve öğrenme oranı 1e-3 olarak seçilmiştir. YOLO mimari tasarımları 50 epoch boyunca eğitilmiş ve parti boyutu 8 olarak belirlenmiştir. Deney sırasında ilgili modellerin önceden eğitilmiş modelleri kullanılarak öğrenme aktarımı yapılmıştır. Tüm deneyler PyTorch kütüphanesinde ve Google Colab entegre geliştirme ortamında (IDE) NVIDIA Tesla A100 ekran kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3, YOLOv5 ile elde edilen sonuçları göstermektedir. YOLOv5 ile tüm sınıfların ortalaması için %92,2 kesinlik, %94,1 anma, %93,1 F1 skor, %97,3 mAP50 ve %76,1 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Tank sınıfı için YOLOv5 ile %94,7 kesinlik, %93,5 anma, %94,1 F1 skor, %96,9 mAP50 ve %68,5 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Otomobil sınıfı için YOLOv5 ile %89,8 kesinlik, %94,7 anma, %92,1 F1 skor, %97,8 mAP50 ve %83,7 mAP50-95 değeri elde edilmiştir.

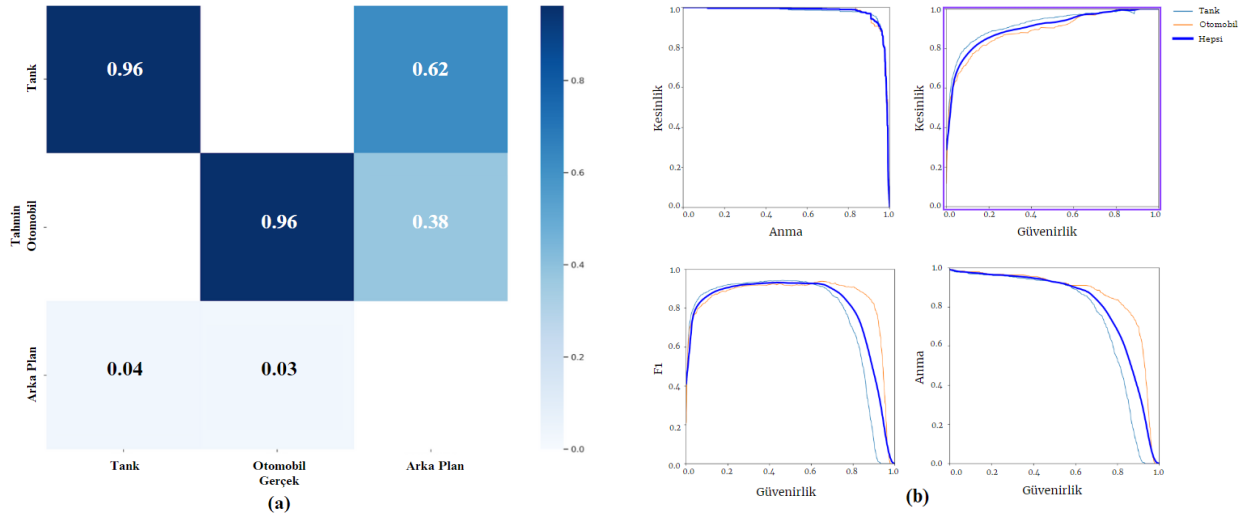
Karmaşıklık matrisi, eğitilen modelin iki farklı nesne sınıfı için nesne sınıflandırma görevi yapma performansını özetlemektedir. Her bir hücre, belirli bir gerçek ve tahmin sınıf çifti için gözlemlenen olay sayısını göstermektedir. Matrisin ana çaprazı gerçek sınıfların model tarafından doğru bir şekilde tahmin edildiği durumları temsil etmektedir.

Karmaşıklık matrisi analiz edildiğinde, eğitilen modellerin görüntülerde tank ve otomobillerin varlığını iyi bir doğruluk puanıyla tespit edebildiği görülmektedir. YOLOv5 kullanılarak eğitilen modelde, tank ve otomobil için sırasıyla %96 ve %96 doğruluk puanlarıyla ilgili nesnenin varlığını tespit edebilmektedir.

Tablo 3. YOLOv5 mimarisi ile doğrulama veri setinden elde edilen performans sonuçları

Table 3. Performance results from validation dataset with YOLOv5 architecture

Sınıf	Kesinlik	Anma	F1 skor	mAP50	mAP50-95
Hepsi	0,922	0,941	0,931	0,973	0,761
Tank	0,947	0,935	0,941	0,969	0,685
Otomobil	0,898	0,947	0,921	0,978	0,837



Şekil 3. (a) YOLOv5 tarafından elde edilen karmaşıklık matrisi (b) YOLOv5 modelinin algılama performansı ölçümleri

Figure 3. (a) The confusion matrix obtained by YOLOv5 (b) Detection performance measurements of the YOLOv5 model

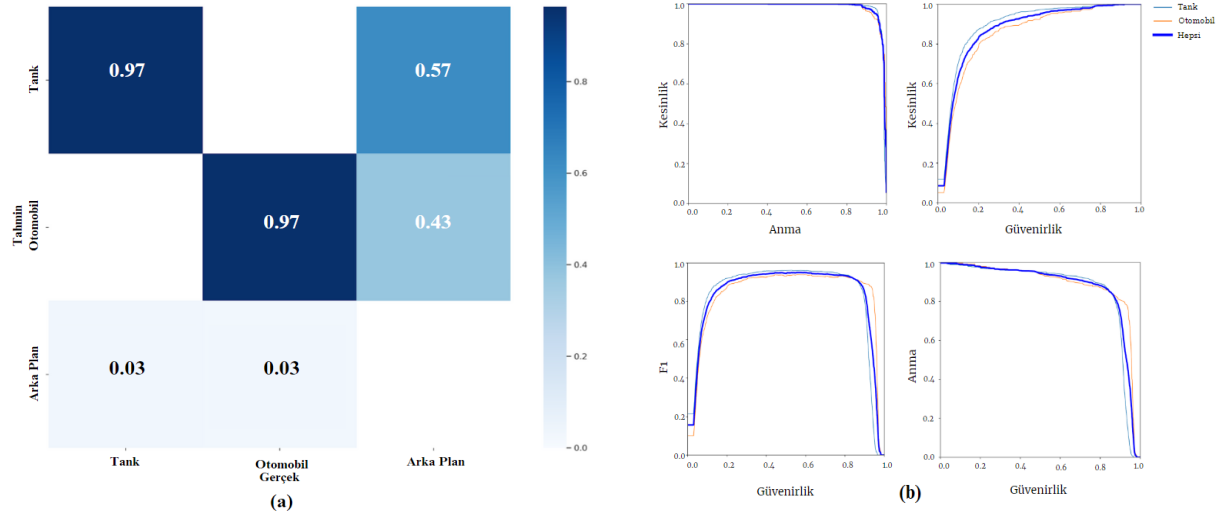
Tablo 4, YOLOv6 kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. YOLOv6 ile tüm sınıfların ortalaması için %96,6 kesinlik, %93,5 anma, %95 F1 skor, %98,3 mAP50 ve %79,4 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Tank sınıfı için YOLOv6 ile %97,9 kesinlik, %94,4 anma, %96,1 F1 skor, %98,2 mAP50 ve %72,7 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Otomobil sınıfı için YOLOv6 ile %95,4 kesinlik, %92,5 anma, %93,9 F1 skor, %98,4 mAP50 ve %86,1 mAP50-95 değeri elde edilmiştir.

YOLOv6 kullanılarak eğitilen modelde, tank ve otomobil için sırasıyla %97 ve %97 doğruluk puanlarıyla ilgili nesnenin varlığını tespit edebilmektedir. İlgili nesnelere tespit etme başarısının diğer tüm modellere göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. YOLOv6 mimarisi ile doğrulama veri setinden elde edilen performans sonuçları

Table 4. Performance results from validation dataset with YOLOv6 architecture

Sınıf	Kesinlik	Anma	F1 skor	mAP50	mAP50-95
Hepsi	0,966	0,935	0,950	0,983	0,794
Tank	0,979	0,944	0,961	0,982	0,727
Otomobil	0,954	0,925	0,939	0,984	0,861



Şekil 4. (a) YOLOv6 tarafından elde edilen karmaşıklık matrisi (b) YOLOv6 modelinin algılama performansı ölçümleri

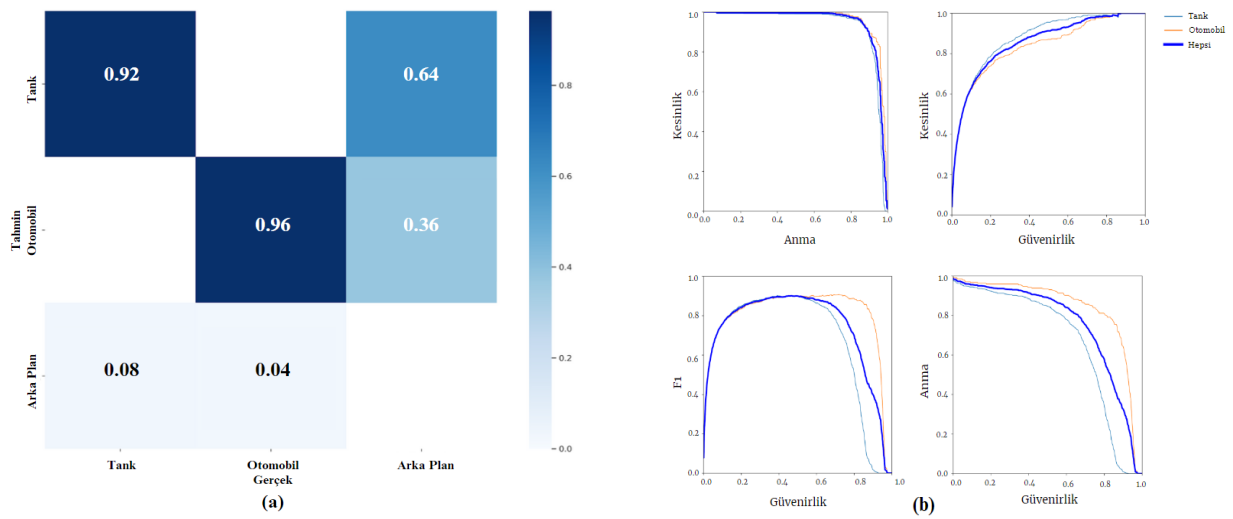
Figure 4. (a) The confusion matrix obtained by YOLOv6 (b) Detection performance measurements of the YOLOv6 model

Tablo 5, YOLOv7 kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. YOLOv7 ile tüm sınıfların ortalaması için %90,7 kesinlik, %89,8 anma, %90,2 F1 skor, %94,9 mAP50 ve %71,2 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Tank sınıfı için YOLOv7 ile %94,6 kesinlik, %85,9 anma, %90 F1 skor, %93,5 mAP50 ve %62,4 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Otomobil sınıfı için YOLOv7 ile %86,7 kesinlik, %93,8 anma, %90,1 F1 skor, %96,4 mAP50 ve %80,1 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. YOLOv7 kullanılarak eğitilen modelde, tank ve otomobil için sırasıyla %92 ve %96 doğruluk puanlarıyla ilgili nesnenin varlığını tespit edebilmektedir.

Tablo 5. YOLOv7 mimarisi ile doğrulama veri setinden elde edilen performans sonuçları

Table 5. Performance results from validation dataset with YOLOv7 architecture

Sınıf	Kesinlik	Anma	F1 skor	mAP50	mAP50-95
Hepsi	0,907	0,898	0,902	0,949	0,712
Tank	0,946	0,859	0,900	0,935	0,624
Otomobil	0,867	0,938	0,901	0,964	0,801



Şekil 5. (a) YOLOv7 tarafından elde edilen karmaşıklık matrisi (b) YOLOv7 modelinin algılama performansı ölçümleri

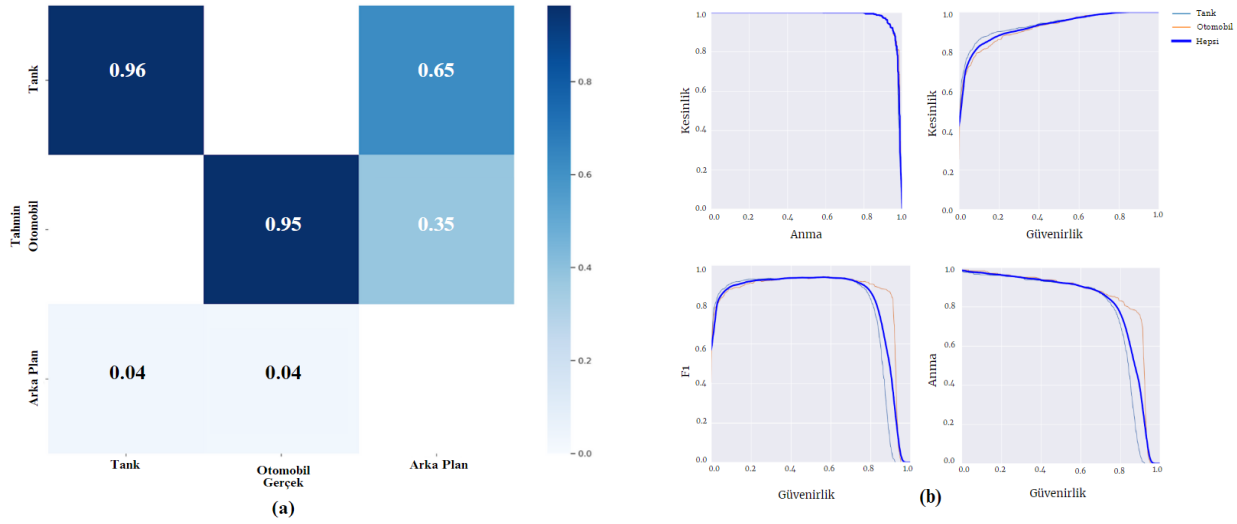
Figure 5. (a) The confusion matrix obtained by YOLOv7 (b) Detection performance measurements of the YOLOv7 model

Tablo 6, YOLOv8 kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. YOLOv8 ile tüm sınıfların ortalaması için %97,9 kesinlik, %90,3 anma, %93,9 F1 skor, %97,7 mAP50 ve %78,8 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Tank sınıfı için YOLOv8 ile %97,2 kesinlik, %91,3 anma, %94,1 F1 skor, %97,3 mAP50 ve %71,7 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. Otomobil sınıfı için YOLOv8 ile %98,6 kesinlik, %89,3 anma, %93,7 F1 skor, %98 mAP50 ve %85,9 mAP50-95 değeri elde edilmiştir. YOLOv8 kullanılarak eğitilen modelde, tank ve otomobil için sırasıyla %96 ve %96 doğruluk puanlarıyla ilgili nesnenin varlığını tespit edebilmektedir.

Tablo 6. YOLOv8 mimarisi ile doğrulama veri setinden elde edilen performans sonuçları

Table 6. Performance results from validation dataset with YOLOv8 architecture

Sınıf	Kesinlik	Anma	F1 skor	mAP50	mAP50-95
Hepsi	0,979	0,903	0,939	0,977	0,788
Tank	0,972	0,913	0,941	0,973	0,717
Otomobil	0,986	0,893	0,937	0,980	0,859



Şekil 6. (a) YOLOv8 tarafından elde edilen karmaşıklık matrisi (b) YOLOv8 modelinin algılama performansı ölçümleri

Figure 6. (a) The confusion matrix obtained by YOLOv8 (b) Detection performance measurements of the YOLOv8 model

Test örnekleri Şekil 7'de gösterilmektedir. YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7 ve YOLOv8 modellerinin eğitimi sonrasında elde edilen test sonuçlarının bazı örnekleri Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8'de YOLOv6 modelinin diğer modellere göre daha yüksek güven skoru ile nesneyi tahmin ettiği görülmektedir. YOLOv6 modeli aynı zamanda kamufle olmuş tankların tespitini ve kutu sınırlarını daha iyi bir şekilde belirlediği görülmektedir. Şekil 8'deki sonuçlar incelendiğinde, test verisindeki sol üstte yer alan görselde tankların hepsi YOLOv6 tarafından tespit edildiği görülmektedir. YOLOv7 modelinin sadece önde yer alan tankı, YOLOv5 ile YOLOv8 modelleri ise önde bulunan tankı ve arka kısımda bulunan üç tanktan sadece birini tespit edebilmiştir. Sağ üstteki görselde ağaçların arkasında bulunan tankı ise sadece YOLOv6 modelinin %60 güven skoru ile tespit edildiği görülmektedir. Sol altta yer alan görseli YOLOv6 modeli %80, YOLOv8 modeli ise %50 güven skoru ile tespit ettiğini, diğer modellerin ise tespit edemediği görülmektedir. Sağ altta bulunan görselde ise tamamen kamufle olan bir tankı YOLOv6 modeli %57 güven skoru ile tespit ederken YOLOv8 modeli ise %86 güven skoru ile tespit edilmiştir.



Şekil 7. Test Görüntüleri
Figure 7. Test Images



Şekil 8. Test görüntülerinden elde edilen sonuçlar (a) YOLOv5 (b) YOLOv6 (c) YOLOv7 (d) YOLOv8
Figure 8. Results from test images (a) YOLOv5 (b) YOLOv6 (c) YOLOv7 (d) YOLOv8

5. Sonuç

5. Conclusion

Bu çalışmada, YOLO tabanlı kamufajlı tanklar için bilgisayar destekli tespit sistemi önerilmektedir. Bu bağlamda, yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti üzerinde eğitim için YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7 ve YOLOv8 algoritmaları test edilmiştir. İlgili algoritmalarda Adam optimizör, kayıp fonksiyonu için çapraz entropi kullanılmış ve öğrenme oranı $1e-3$ olarak ayarlanmıştır. En iyi tespit sonucunu 0,983 mAP50 değerini, 0,966 kesinlik, 0,935 anma ve 0,950 F1 skoru ile en yüksek değerleri ile YOLOv6 mimari tasarımı elde etmiştir. Bu çalışma, kamufajlı tankların tespiti alanında yapılan ilk araştırma olduğundan dolayı, modelin

başarımı doğrudan bir karşılaştırmaya tabi tutulamamıştır. Bunun yerine, modelin potansiyel güçlü ve zayıf yönleri üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak, kamuflajlı tankların tespitine yönelik olarak bilgisayarlı görü destekli bir karar destek mekanizması oluşturulmuştur. Gelecek çalışmalarda ise tespit edilen tankların gerçeklik sınıflandırma sistemi geliştirilecektir.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Boyuk, M., Duvar, R., & Urhan, O. (2020). Deep learning based vehicle detection with images taken from unmanned air vehicle. *Proceedings 2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference, ASYU 2020*. <https://doi.org/10.1109/ASYU50717.2020.9259868>
- Gupta, P., Pareek, B., Singal, G., & Rao, D. V. (2022). Edge device based military vehicle detection and classification from UAV. *Multimedia Tools and Applications, 81*(14), 19813–19834. <https://doi.org/10.1007/S11042-021-11242-Y/FIGURES/12>
- Haque, E., Rahman, A., Junaid, I., Hoque, S. U., & Paul, M. (2022). Rice Leaf Disease Classification And Detection Using YOLOv5.
- Kaggle (t.y.). Military Tanks Dataset (Images). <https://www.kaggle.com/datasets/antoreepjana/military-tanks-dataset-images>
- Kaggle (t.y.). War Tank Images Dataset. <https://www.kaggle.com/datasets/icanerdogan/war-tank-images-dataset>
- Kamran, F., Shahzad, M., & Shafait, F. (2019). Automated military vehicle detection from low-altitude aerial images. *2018 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, DICTA 2018*. <https://doi.org/10.1109/DICTA.2018.8615865>
- Kyrkou, C., Plastiras, G., Theocharides, T., Venieris, S. I., & Bouganis, C. S. (2018). DroNet: Efficient convolutional neural network detector for real-time UAV applications. *Proceedings of the 2018 Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, 967–972*. <https://doi.org/10.23919/DATE.2018.8342149>
- Li, C., Li, L., Jiang, H., Weng, K., Geng, Y., Li, L., Ke, Z., Li, Q., Cheng, M., Nie, W., Li, Y., Zhang, B., Liang, Y., Zhou, L., Xu, X., Chu, X., Wei, X., & Wei, X. (2022). YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications. *Arxiv.Org*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2209.02976>
- Liu, K., Tang, H., He, S., Yu, Q., Xiong, Y., & Wang, N. (2021). Performance validation of YOLO variants for object detection. *Proceedings of the 2021 International Conference on Bioinformatics and Intelligent Computing, BIC 2021, 239–243*. <https://doi.org/10.1145/3448748.3448786>
- Mansour, A., Hassan, A., Hussein, W. M., & Said, E. (2019). Automated vehicle detection in satellite images using deep learning. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 610*(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/610/1/012027>

- Reis, D., Kupec, J., Hong, J., & Daoudi, A. (n.d.). *Real-Time Flying Object Detection with YOLOv8*.
- Sun, Y., Wang, W., Zhang, Q., Ni, H., & Zhang, X. (2022). Improved YOLOv5 with transformer for large scene military vehicle detection on SAR image. *2022 7th International Conference on Image, Vision and Computing, ICIVC 2022*, 87–93. <https://doi.org/10.1109/ICIVC55077.2022.9887095>
- Wang, C.-Y., Bochkovskiy, A., & Liao, H.-Y. M. (2022). YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. *Arxiv.Org*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2207.02696>
- Xie, X., & He, C. (2017). Object detection of armored vehicles based on deep learning in battlefield environment. *Proceedings - 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering, ICISCE 2017*, 1568–1570. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.327>
- Yong, S. P., & Yeong, Y. C. (2018). Human object detection in forest with deep learning based on drone's vision. *2018 4th International Conference on Computer and Information Sciences: Revolutionising Digital Landscape for Sustainable Smart Society, ICCOINS 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICCOINS.2018.8510564>

Derin öğrenme ile pencere ayarlı görüntüler kullanılarak beyin inme segmentasyon performansının geliştirilmesi

Improving the performance of brain stroke segmentation using window-adjusted images with deep learning

Özlem POLAT*¹ , Mustafa Said KARTAL² 

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Tıp Fakültesi, 58140, Sivas

• Geliş tarihi / Received: 23.06.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 18.09.2023

Öz

İnme çeşitli nedenlerle beyne kan akışının yavaşladığı veya kesildiği durumlarda ortaya çıkan serebrovasküler bir sağlık sorunudur. Beyin dokusu yeterli besin ve oksijeni alamadığı için beyin hücreleri dakikalar içinde ölmeye başlar ve inmenin olduğu bölgedeki fonksiyonlarda geçici ya da kalıcı hasarlar meydana gelir. Beyin inmesi çok ciddi tıbbi bir durumdur ve acil müdahale gerektirmektedir. İnmenin erken tespiti ve inme bölgesinin segmente edilmesi kalıcı hasarların önlenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada Res2Net omurgalı U-Net derin öğrenme modeli kullanılarak beyin inme segmentasyonu yapılmıştır. Veri seti olarak 1093 hemorajik ve 1130 iskemik inme tipini içeren toplamda 2223 BT görüntüsü kullanılmıştır. Görüntüler pencereleme yöntemi ile ön işlemeden geçirilip sonrasında önerilen model ile eğitilip test edilmişlerdir. Pencereleme ayarı yapılmadan kullanılan görüntülerde ortalama IoU oranı 0.82 olarak elde edilmiş, ön işlemeden sonra bu oran 0.87'ye yükselmiştir; veri çoğaltma yönteminin de uygulanmasından sonra ortalama IoU 0.92'ye ulaşmıştır. Elde edilen test sonuçları görüntülerde uygun pencere ayarlarının kullanılmasının segmentasyon performansını artırdığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Beyin inme segmentasyonu, Derin öğrenme, Görüntü pencereleme, U-Net

Abstract

Stroke is a cerebrovascular health problem that occurs when blood flow to the brain is slowed or interrupted for various reasons. Since the brain tissue cannot receive enough nutrients and oxygen, brain cells begin to die within minutes and temporary or permanent damage occurs in the functions in the area where the stroke occurred. Brain stroke is a very serious medical condition and requires urgent intervention. Early detection of stroke and segmentation of the stroke site are of great importance in terms of preventing permanent damage. In this study, brain stroke segmentation was performed using U-Net deep learning model with Res2Net backbone. A total of 2223 CT images including 1093 hemorrhagic and 1130 ischemic stroke types were used as dataset. The images were preprocessed with the windowing method and then trained and tested with the proposed model. While the IoU rate was 0.82 in the images used without windowing adjustment, this rate increased to 0.87 after preprocessing, when the data duplication method was added, the average IoU reached 0.92. The test results obtained showed that the use of appropriate window settings in the images increased the segmentation performance.

Keywords: Brain stroke segmentation, Deep learning, Image windowing, U-Net

* Özlem POLAT; ozlem.polat@cumhuriyet.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Halk arasında inme ya da felç olarak bilinen hemipleji, ölüm nedenleri arasında ikinci sırada yer almaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde hastalık olguları nüfusa oranla hızla artış göstermektedir. Ayrıca inmenin önde gelen etkileri sakatlık ve felçtir (Campbell vd., 2019a). İnme, bir hastalığa atfedilen nörolojik bir eksiklik olarak tanımlanır. Beyin, retina veya omurilik kordonunun vasküler bir nedenden dolayı akut fokal yaralanmasıdır (Campbell & Khatri, 2020). Çoğu inme genellikle arteriyel tıkanıklığından kaynaklanır. Arteriyel tıkanıklığından kaynaklanan inme, kan akışının azalması nedeniyle gelişen iskemik (tıkayıcı) inme tipidir. Diğer bir inme tipi, beyinde damar (serebral arter) yırtılmasından kaynaklanan hemorajik (kanayıcı) inmedir. Bölgesel epidemiyolojiye bağlı olarak inmelerin %10-40'ı hemorajik tip inmedir (Sacco vd., 2013). Sigara, diyabet, hiperlipidemi ve fiziksel hareketsizlik inmeye sebep olabilecek önemli risklerdir. 2019'da yayınlanan 2016 Küresel Hastalık Yüğü (Global Burden of Disease) verileri, her dört kişiden birinin felç geçirebileceğini göstermektedir (GBD Stroke Collaborators, 2019). Bu anlamda sakatlık ve ölümün önüne geçmek için inmede erken tanı çok önemlidir. Beyin dokusunun kurtarılabilmesi için hastada inmenin gelişimi ardından en geç 5-9 saat arasında teşhis konulmalıdır (Campbell vd., 2019b). İnme hastalarının değerlendirilmesinde radyolojik beyin görüntüleme bulguları çok önemli bir rol oynamaktadır. Beyin görüntülemeye daha çok bilgisayarlı tomografi (BT) tekniklerinden kontrastsız BT tercih edilir. Bununla beraber BT anjiyografi, BT perfüzyon ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) teknikleri de tercih edilmektedir. MRG giderek daha erişilebilir hale gelmesine rağmen, BT tabanlı tekniklerin uygulanması daha hızlıdır (Pulli vd., 2021). Ayrıca BT görüntüleme MRG'ye göre daha az maliyetli ve erişilebilirliğinin kolay olması dolayısıyla kullanımı daha yaygındır. Dolayısıyla erişilebilirliği ve kolaylığı açısından inme şüphesi olan hastalarda da kontrastsız beyin BT'si, başvuru ilk görüntüleme yöntemi olmaya devam etmektedir (Hollist vd., 2021). İnme tedavisinde radyolojik görüntüleme yöntemleri, inme tipinin belirlenmesi, arteriyel hemoraji ve iskemik bölgesinin tayini, inme nedeni ve mekanizmasının teşhisi için kullanılır. Dolayısıyla inme bulgusu gözlemlenen hastaların tedavi sürecinde BT ve MRG büyük rol oynar (Vilela & Rowley, 2017).

Yapay zekâ, bilgisayarların işlem kabiliyetinin artmasıyla son zamanlarda her alanda kullanılmaktadır. Yapay zekânın bir uygulama yöntemi olan derin öğrenme modellerinin geliştirilmesinin tıbbi görüntüleme için önemli etkileri vardır. Literatürde çeşitli organ ve doku türlerinde lezyon sınıflandırması, tespiti ve segmentasyonunun yapay zekâ ile yapıldığı çeşitli çalışmalar mevcuttur. Yapay zekânın radyolojide kullanımına yönelik araştırmalarda tedavi sürecinin hızlandığı görülmüştür (Zhou, 2020). İnme görüntülemeye de sonuç tahmini açısından başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Abuzaid vd., 2021). Hızlı klinik tanı ve görüntüleme, inmelerle ilişkili morbidite ve mortaliteyi en aza indirmek için kritik öneme sahiptir.

İNme teşhisinde yapay zekâ araştırmaları yaygındır. Yapılan bir araştırmada yapay zekâ tekniklerinin, görüntü tabanlı teşhis ve tedavi süreci için çok önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir (Yedavalli vd., 2021). Yapay zekâ yöntemlerinden özellikle transfer öğrenme ve derin öğrenme metotları sayesinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bazı araştırmalarda radyologlar ile yapay zekânın başarı oranları karşılaştırılmıştır. Bu araştırmalardan birinde yapay zekânın kıdemli radyologlara eş değer başarı verdiği görülmüştür (Li vd., 2020). Akut iskemik inme hastalarında BT perfüzyon kullanılarak tanı sürecinde yapay zekâ başarısı test edilmiştir. Bu araştırmada konvolüsyonel sinir ağları (convolutional neural networks-CNN) kullanılmıştır (Cleriques vd., 2019). Medikal görüntü segmentasyonu için geliştirilen U-Net modellemesi ile segmentasyon yapılmıştır. Modele verilen BT perfüzyon iskemik inme görüntüleri bazı ön işleme ve veri çoğaltma tekniklerine başvurularak geliştirilmiştir. Sonuçta yüksek bir başarı oranıyla inme bölgesinin segmente edildiği görülmüştür. MRG ve BT anjiyografinin de yapay zekâ destekli çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre radyologlara eş değer bir doğruluğun yanında daha hızlı teşhis konulması sağlanmaktadır (Winzeck vd., 2018). İnmede yapay zekâ araştırmaları gün geçtikçe artmaktadır ayrıca BT görüntülerinde farklı ön işlemler ile daha yüksek başarılar elde etmek mümkündür.

2. Literatür özeti

2. Literature review

Son yıllarda popüler olan ve günden güne yeni modeller oluşturulan derin öğrenme yüksek başarımlı sonuçlar elde edilmesinden dolayı farklı bilim alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıp alanında beyinde inmenin tespit edilmesi, inme tipinin belirlenmesi ve inme bölgesinin segmente edilmesi gibi çalışmalarda da kullanımı tercih edilmektedir.

Yahiaoui ve Bessaid (2016) iskemik inme içeren BT görüntülerini öncelikle ön işlemeden geçirmişler ve sonrasında çok ölçekli dönüşümlerden biri olan Laplace Piramitlerini kullanarak geliştirmişlerdir. Sonrasında Bulanık C-Ortalama kümeleme algoritmasını kullanarak iskemik lezyon bölgesini segmente etmişlerdir.

Bu çalışmada yeni geliştirilmiş bir derin öğrenme modeli olan Res2Net (Gao vd., 2019) omurgalı U-Net (Ronneberger vd., 2015) modeli kullanılarak beyin inme segmentasyonu yapılmıştır. Veriseti olarak 1093 hemorajik ve 1130 iskemik inme tipini içeren toplamda 2223 beyin BT görüntüsü kullanılmıştır. Çalışma görüntüye uygulanan görüntü pencereleme ön işlemi açısından yeniliğe sahiptir. BT cihazları tarafından oluşturulan DICOM görüntüler beyin dokusunu gösterecek şekilde sabit pencere aralıklarında oluşturulmaktadır. Bu çalışmada beyin dokusunu, kemik dokusunu ve yumuşak dokuyu gösterecek şekilde pencere aralıkları ayarlanmış ve oluşturulan bu üç görüntü birleştirilerek kullanılmıştır. Ön işlemeden geçirilen görüntüler sonrasında önerilen model ile eğitilip test edilmişlerdir. Pencereleme ayarı yapılmadan kullanılan görüntülerde IoU oranı 0.82 olarak elde edilmiş, ön işlemeden sonra bu oran 0.87'ye yükselmiştir. Elde edilen test sonuçları görüntülerde uygun pencere ayarlarının kullanılmasının ve üç kanallı görüntülerin birleştirilmesinin segmentasyon performansını artırdığını göstermiştir. Veri çoğaltma tekniklerinin kullanılmasından sonra yapılan testlerde ise 0.92 IoU değerine ulaşılmıştır.

Ajam vd. (2019) BT beyin görüntülerinden iskemik inmeyi saptamak ve segmentlere ayırmak için bir algoritma önermişlerdir. Önerdikleri yöntemde öncelikle BT görüntülerinden kafatası kemiği sıyırma ve metin çıkarma içeren bir ön işleme adımı uygulanmış ardından da görüntüler medyan filtre ve histogram eşitleme kullanılarak geliştirilmiştir. Sonrasında iskemik inmeyi saptamak için havza segmentasyonu ve İşaretçi Kontrollü havza yöntemleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler BT görüntüsünün gürültüsünden kaynaklanan aşırı segmentasyon nedeniyle, İşaretçi kontrollü havza yönteminin havza segmentasyon yönteminden daha iyi olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmada aşırı segmentasyon problemi çözülmüştür.

Subudhi vd. (2020) iskemik inme içeren beyin MR görüntülerini kullanarak parsiyel anteriyor sirkülasyon sendromu, laküner sendrom ve total anteriyor sirkülasyon infarktı olmak üzere üç sınıfa ayırmışlardır. Önce görüntülerdeki inme içeren kısımlar beklenti maksimizasyon algoritması kullanılarak segmente edilmiş ve Fraksiyonel Düzen Darwinci Parçacık Sürü Optimizasyonu ile iyileştirme sağlanmıştır. Farklı morfolojik ve istatistiksel özellikler çıkarılarak öznelik kümesi oluşturulmuş, Destek Vektör Makinaları (SVM) ve Rasgele Orman (RF) yöntemleri ile sınıflama yapılmış ve RF ile %93.4 başarımla elde edilmiştir.

Gautam ve Raman (2021) beyin BT görüntülerini kullanarak önce iskemik inme ve hemorajik inme olarak ikili sınıflama sonra da normal, iskemik ve hemorajik olarak çoklu sınıflama yapmışlardır. BT görüntülerinin kalitesini artırmak amacıyla Dörtlü Ağaç tabanlı görüntü füzyonu ön işleme aşamasını gerçekleştirmişlerdir. 13 katmanlı CNN modeli oluşturup bu modeli ön işleme yapılmış görüntüler üzerinde eğitip test etmişlerdir. Deneyler sonucunda ikili sınıflandırmada %98.77 ve üçlü sınıflandırmada % 93.33 başarımla ulaşılmıştır.

Yalçın ve Vural (2022) beyinde inmenin tespit edilmesi, inme tipinin belirlenmesi ve inme bölgelerinin segmentasyonu için, geliştirilmiş bir U-Net modeli önermişlerdir ve modeli D-UNet (developed U-Net) olarak isimlendirmişlerdir. Yapılan çalışmada önce beyinde inme olup olmadığı tespit edilmiş, inme olması durumunda ise inmenin hemorajik mi yoksa iskemik mi olduğu belirlenmiş ve sonrasında ise inme bölgesinin segmentasyonu gerçekleştirilmiştir. Veri seti olarak Türkiye Sağlık Bakanlığı tarafından paylaşılan ve 6650 BT görüntüsünden oluşan bir veri seti kullanılmışlardır. Veri çoğaltma ile görüntü sayısı artırılan çalışmada önerilen model ile inmenin varlığının tespitinde ve inme tipinin sınıflandırılmasında sırasıyla %98.9, %98.5 başarımla ve inme bölgesinin segmente edilmesinde %95.2 IoU değeri elde etmişlerdir.

Alhatemi ve Savaş (2022) beyin MR görüntülerini kullanarak inme var ve inme yok şeklinde ikili sınıflama yapmışlardır. Yapılan çalışmada klasik derin transfer öğrenme modellerinden DenseNet121, ResNet50, Xception, VGG16, MobileNet ve EfficientNetB2'yi önermişlerdir. Kullandıkları MR veri seti üzerinde veri çoğaltma ve ön işleme yapmışlardır ve en iyi sınıflandırma başarımlarını EfficientNetB2 ile elde etmişlerdir.

Aboudi vd. (2022) beyindeki iskemik inme lezyonlarını segmente etmek amacıyla U-Net mimarisini kullanmışlardır. U-Net tabanlı kodlayıcı-kod çözücü mimarisini artık birim ile birleştiren bir yaklaşım önermişlerdir. MR görüntülerinden oluşan ISLES 2015 veri setini veri çoğaltma yaparak kullanmışlar ve önerdikleri bu yaklaşımla ortalama %55.77 dice değerine ve %99.96 doğruluk değerine ulaşılmıştır.

[Alquhayz vd. \(2022\)](#) beyindeki iskemik inme lezyonlarının segmentasyonu için çok seviyeli sınıflama ağı (MCN) ve modifiye edilmiş rezidüel U-Net modelini kullanmışlardır. MCN, kademeli üç ayrı ağdan oluşmaktadır. Birinci ağda tüm dilim seviyesi sınıf dengesizliğini azaltmak amacıyla inme lezyonları MRI görüntülerinden çıkarılır ve yamalar oluşturulur. İkinci ağ oluşturulan yamaları sınıflandırır. Üçüncü ağ olan U-Net ikinci ağdaki yamalardan inme lezyonlarını ayırır. Oluşturulan ağ ATLAS veri seti üzerinde eğitilip test edilmiştir ve deneyler sonucunda ortalama 0.754 dice skoru elde etmişlerdir.

[Karataş vd. \(2022\)](#) çalışmalarında [Koç vd. \(2022\)](#) tarafından oluşturulan normal, iskemik ve hemorajik olarak etiketlenmiş BT görüntüleri içeren veri setini kullanmışlardır. İki aşamalı olarak yaptıkları çalışmanın birinci aşamasında görüntüleri inme yok veya inme var olarak sınıflandırmışlardır. İkinci aşamada ise yalnızca inme içeren görüntüleri kullanarak iskemik ya da hemorajik olarak sınıflama yapmışlardır. Altı farklı transfer öğrenme modeli kullandıkları çalışmada en yüksek başarıyı birinci aşama ve ikinci aşama için sırasıyla %99.72 doğruluk ile ResNet50 modelinden ve %99.51 doğruluk ile Inception-v3 modelinden elde etmişlerdir.

[Yang vd. \(2023\)](#) çalışmalarında kontrastsız BT görüntülerinde otomatik iskemik inme lezyonu segmentasyonu için bir kodlayıcı-kod çözücü evrişimli sınır ağı olan IS-Net'i önermişlerdir. IS-Net yapısı hiyerarşik omurga, omurganın çok aşamalı özelliklerini bir araya getirmek için Piramit Özellik Toplama (PFA) modülü, yerel olmayan paralel kod çözücü, sınır işaretlerini tam olarak çıkarmak için kenar kısıtlama şeması ve segmentasyon kısmından oluşmaktadır. Önerilen IS-Net, 1004 vakadan (toplam 9020 görüntü) oluşan, manuel olarak etiketlenmiş kontrastsız BT veri seti üzerinde değerlendirilmiş ve 56.7 ± 0.5 IoU(%) değerine ulaşılmıştır.

[Kaya ve Önal \(2023\)](#) yaptıkları çalışmada kontrastsız BT görüntüleri kullanarak ilk olarak inme tipini iskemik veya hemorajik olarak sınıflandırmışlardır. İkinci olarak inme bölgesini segmente etmişlerdir. Segmentasyon için derin öğrenme modellerinden U-Net'i kullanmışlardır. Gerçek veri seti üzerinde yaptıkları deneylerde sınıflandırma modeli için % 95.06 doğruluk değeri elde etmişlerdir. Segmentasyon sonucu deneylerden elde ettikleri IoU katsayısı değerleri hemorajik ve iskemik inme için sırasıyla %92.01 ve %82.22'dir.

Beyin inme segmentasyonu ile ilgili en güncel çalışmalardan biri [Uçkun vd. \(2023\)](#) tarafından yapılmıştır. [Uçkun vd. \(2023\)](#), [Koç vd. \(2022\)](#) tarafından oluşturulan veri setinde yalnızca iskemik olarak etiketlenmiş görüntüleri kullanmışlardır. İskemik inme segmentasyonunun yapıldığı çalışmada U-Net, U-Net VGG16, U-Net VGG19, Attention U-Net ve ResU-Net modelleri eğitilip test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %96.95 IoU değeri elde edilmiştir.

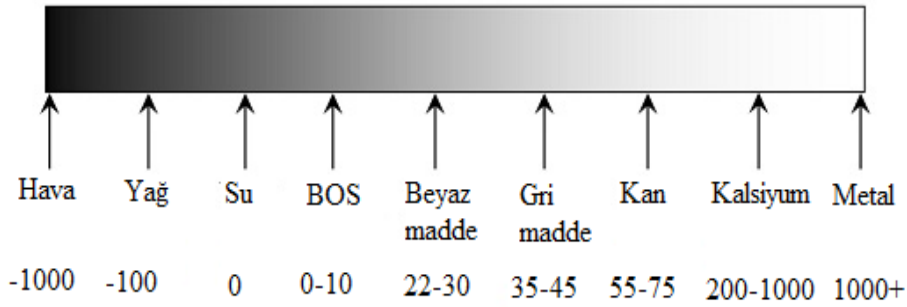
3. Önerilen metodoloji

3. Proposed methodology

3.1 Görüntü pencereleme

3.1 Image windowing

Sir Godfrey Hounsfield tarafından ortaya atılan Hounsfield birimi (HU), BT görüntülerinin yorumlanmasında radyologlar tarafından kullanılan radyo yoğunluğunun göreceli nicel bir ölçü birimidir. Buna göre her bir dokunun farklı HU değeri bulunmaktadır, bu değerlere BT sayısı da denilmektedir. HU değerlerinin bulunduğu Hounsfield skalası da denilen cetvelde damıtılmış su (standart sıcaklık ve basınçta) sıfır noktası olarak tanımlanmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi +1000 ile -1000 arasında uzanan bu skalada hava -1000 HU olarak tanımlanırken yoğun kemikler ve metaller +1000 HU olarak tanımlanır. HU değeri koklea gibi yoğun kemikler için 2000, çelik veya gümüş gibi metaller için 3000'den fazla olabilir ([DenOtter & Schubert, 2023](#)). BT görüntülerinde pencereleme ayarı HU ile yapılır.



Şekil 1. Hounsfield skalası (Osborne vd., 2016)

Figure 1. Hounsfield scale (Osborne vd., 2016)

Gri seviye haritalama, kontrast germe, histogram modifikasyonu veya kontrast geliştirme olarak da bilinen pencereleme, bir BT görüntüsünün gri tonlamalı bileşeninin HU değerleri aracılığıyla manipüle edildiği süreçtir. BT görüntüsünde mevcut olan 4096 gri renk tonunu insan gözünün ayırt edebilmesi imkânsızdır, en iyi ihtimalle 30-40 gri renk tonunu ayırt edebilir (Jung, 2021). İlgilenilen dokunun BT görüntüsünde ayırt edilebilmesi için gri ölçeğin değerlerinin dokunun görüntülediği değerlerin bulunduğu alana dağıtılması gerekmektedir. Pencereleme olarak bilinen bu işlem ile insan gözünün algılayamadığı birçok yapı görünür hale gelmektedir, bu demek oluyor ki belirli yapıları vurgulamak için yapılan pencereleme ile resmin görünümünü değiştirecektir. Pencerelemede görüntünün parlaklığı pencere seviyesi (WL=window level) aracılığıyla ayarlanırken, kontrast pencere genişliği (WW=window width) aracılığıyla ayarlanır.

Pencere genişliği, bir görüntünün içerdiği BT sayıları aralığının ölçüsüdür. Şöyle ki gri renk tonlarının yayılmasını istediğimiz BT sayı aralığı olarak da ifade edilmektedir. Pencere seviyesi ise bu BT sayı aralığının tam orta noktasını ifade etmektedir. Pencereleme ile ortaya çıkarılmak istenen dokuya ilişkin Hounsfield değerleri gri renk tonlarında görünürken bu aralık dışında kalan alanlar BT görüntüsünde siyah ya da beyaz görüntülenecektir.

İlgilenilen dokuya ilişkin WW ve WL değerleri sunulduğunda, gri seviyelerin üst ve alt sınırları Denklem 1 ve 2'deki gibi hesaplanabilir. BT görüntüsünde üst gri seviye üzerindeki değerler beyaz ve alt gri seviye altındaki değerler siyah olacaktır.

$$\text{Üst gri seviye} = WL + \left(\frac{WW}{2}\right) \quad (1)$$

$$\text{Alt gri seviye} = WL - \left(\frac{WW}{2}\right) \quad (2)$$

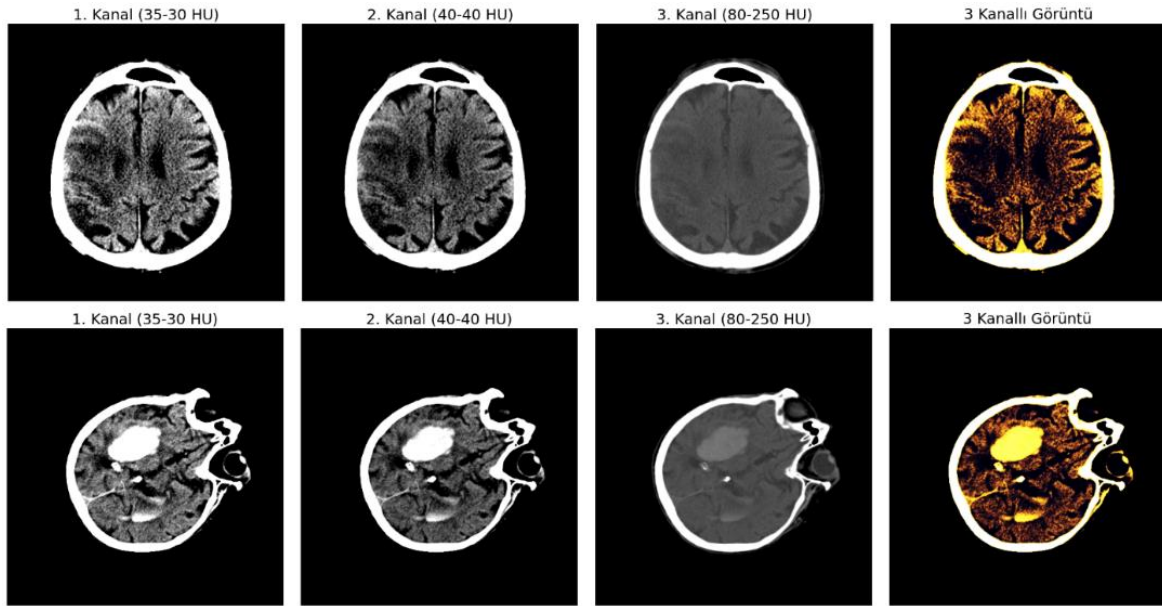
Örneğin, bir beyin W:80 L:40 pencere ayarlarında görüntülenebilmektedir. Beyin için üst gri seviye 80, alt gri seviye de 0 olarak hesaplanır. Bu nedenle 80'in üzerindeki tüm değerler beyaz, 0'ın altındaki tüm değerler ise siyah olacaktır.

Barros vd. (2020) yaptıkları çalışmada pencerelemenin önemi ortaya koymuş ve pencereleme sayesinde kemik bölgesini de segmente etmişlerdir. İskemik tip inme segmentasyonunu amaçladıkları çalışmalarında gözlem sırasında pencere genişliği 30 HU ve pencere seviyesi 30 HU olarak belirlenmiştir. Ayrıca 160 HU üzeri kemik olarak ele alınıp dışlanması sağlanmıştır. Bu ayarlar sonucunda 0.78 dice skoru almayı başarmışlardır. Bir başka çalışmada pencere seviyesi 30 HU, pencere genişliği 60 HU alındıktan sonra normalizasyon işlemi yapılmıştır. İki aşamalı derin öğrenme modelinin kullanıldığı bu çalışmada %42 duyarlık elde edilmiştir (Nishio vd., 2020). İskemik inme segmentasyonu için yapılan bir diğer çalışmada iki farklı pencereleme ile segmentasyon yapılmıştır. Pencere genişliği 100 HU ve pencere seviyesi 35 HU ayarlanan görüntüler ile pencere genişliği 90 HU ve pencere seviyesi 40 HU olarak ayarlanan görüntülerle ayrı ayrı çalışılmıştır (Lo vd., 2021).

Yapılan çalışmalar göz önüne alındığında pencere ayarı yapay zekâ eğitimi için önemlidir. Beyin BT üzerindeki inme bölgesinin daha iyi bir performansla segmente edilebilmesi için yapay zekâ eğitiminde birden fazla pencere ayarı kullanılmış ve bu farklı pencere ayarları ile elde edilen görüntüler birleştirilerek derin öğrenme modelinin beyin dokusundaki değerleri daha iyi öğrenmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada kullandığımız

pencere aralıkları daha önce literatürde inmenin tespit edilmesinde avantaj sağlayan pencere aralıklarının denenmesiyle elde edilmiştir. Yapay zekâ eğitiminde birden fazla farklı pencere aralıklı görüntülerin birleştirilmesiyle elde edilen görüntüler kullanılmış, böylece inme bölgesinin ön plana çıkarılması ve eğitimde başarının artması sağlanmıştır.

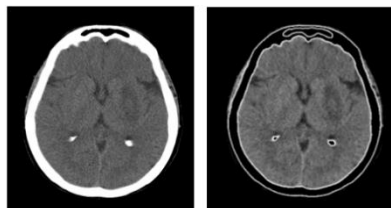
Çalışmada ön işleme olarak görüntülere farklı pencereleme araklıları uygulanmış ve elde edilen farklı pencere ayarlı görüntüler birleştirilerek kullanılmıştır. Buna örnek olarak Şekil 2’de üç kanallı görüntü elde etmek amacıyla pencere ayarı yapılmış üç farklı görüntü ve bunların birleşimi gösterilmektedir. Şekil 2’de WW: 35 HU WL: 30 HU, WW: 40 HU WL: 40 HU ve WW:80 HU WL: 250 HU pencere ayarlarıyla elde edilen görüntüler sırasıyla iskemik tip inme, kanama bölgesi ve yumuşak doku bölgelerinin ön plana çıkarılmasını sağlamaktadır. Farklı pencere ayarlarıyla elde edilen bu üç görüntünün birleşimiyle 3 Kanallı Görüntü oluşturulmuştur.



Şekil 2. Farklı pencere ayarlı görüntüler ve bunların birleşimini içeren BT görüntüsü

Figure 2. Images with different window settings and CT image containing their combination

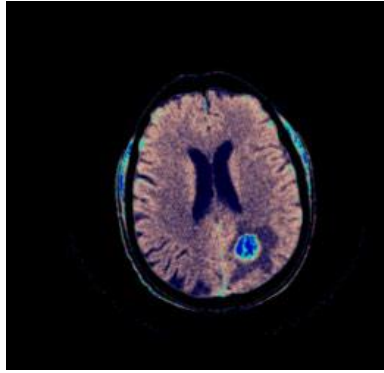
BT üzerinde pencere ayarı ile kemik bölgesi de bulunabilmektedir. Çizdirilen kemik bölgesinin konturları alınarak asıl görüntüden silinmesi sağlanır, bu durum Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Kemik konturlarının silindiği BT görüntüsü

Figure 3. CT image with erasing bone contours

Farklı pencere ayarlarının birleştirilmesi ve kemik bölgesinin çıkarılmasıyla oluşturulan bir diğer görüntü de Şekil 4’te görülmektedir. Görüntüden de anlaşılacağı üzere inme bölgesi ön plana çıkmıştır. Şekil 4’te görülen ön işleme ayarı nihai ön işleme metodu olarak tercih edilmiştir. Burada beyin dokusunun görüntülemesinde tercih edilen WW: 40 HU WL: 80 HU pencere ayarı, iskele ve kanama bölgelerinin daha net seçildiği WW:35 HU WL: 30 HU ve WW: 40 HU WL: 40 HU pencere ayarları kullanılarak üç kanallı görüntü oluşturulmuştur. Ayrıca kemik bölgesinin dışlanması için kemik bölgesini dokudan ayıran pencere ayarları ile ikili maske oluşturularak matris çarpımı ile bölgenin silinmesi sağlanmıştır.



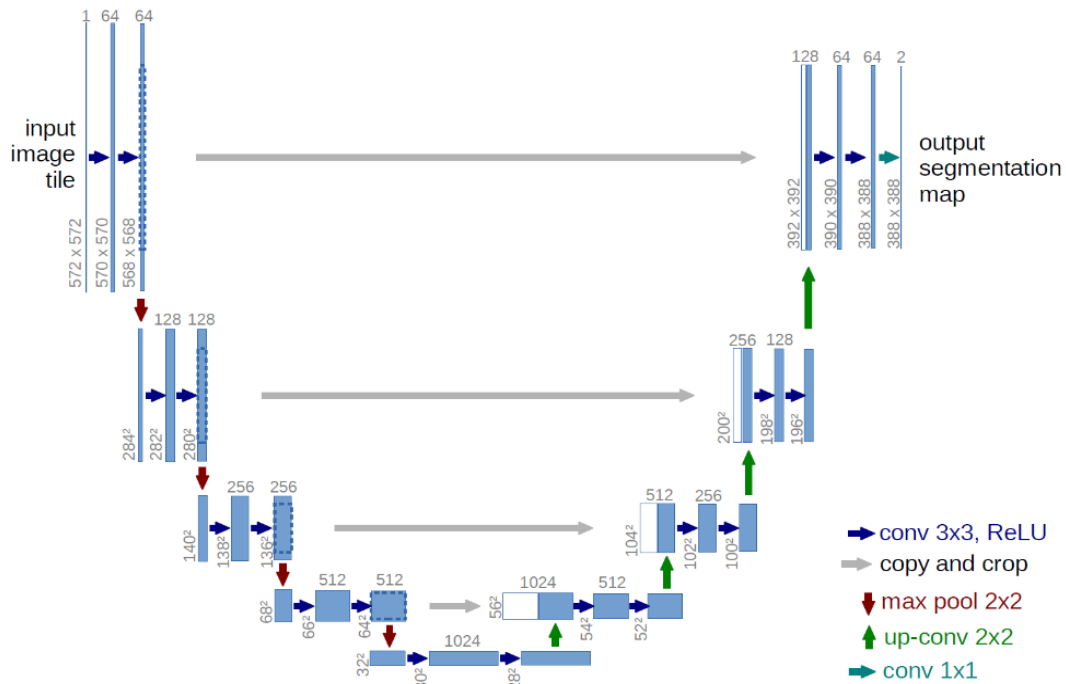
Şekil 4. Farklı pencere ayarlı, kemik dokusu içermeyen ve inme bölgesinin ön plana çıktığı BT görüntüsü

Figure 4. CT image with different window settings, bone tissue-free and stroke area prominent

3.2 Temel U-Net

3.2 Basic U-Net

Segmentasyon (bölütleme) bir görüntüyü farklı özelliklerin tutulduğu anlamlı bölgelere ayırma işlemidir. U-Net derin öğrenme modeli Almanya'daki Freiburg Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Bölümünde, biyomedikal görüntü segmentasyonu için geliştirilen bir konvolüsyonel sinir ağıdır (Ronneberger vd., 2015). U-Net ağına ilişkin mimari Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. U-Net ağ yapısı (Ronneberger vd., 2015)

Figure 5. U-Net network structure (Ronneberger vd., 2015)

U-Net mimarisi, genel olarak bir kodlayıcı ağ ve bir kod çözücü ağ olmak üzere iki temel bölümden oluşmaktadır. Kodlayıcı bölüme küçülme yolu, kod çözücü bölüme genişleme yolu da denilmektedir. Kodlayıcı kısımda standart konvolüsyon işlemleri gerçekleştirilirken kod çözücü kısımda bunun aksine ters konvolüsyon işlemleri gerçekleştirilmektedir. Kod çözücü kısım 4 tane standart konvolüsyon bloğundan oluşmaktadır. Her bir blokta 2 adet 3×3 filtre boyutlu konvolüsyon katmanı + ReLU aktivasyon fonksiyonu ve boyut azaltma amacıyla 2×2 havuzlama katmanı bulunmaktadır. Mimarinin kodlayıcı kısmında özellik haritalarının sayısı havuzlama işleminden sonar ikiye katlanmaktadır. Kodlayıcı kısmında amaç görüntünün uygun bir şekilde segmente edilebilmesi için gerekli olan görüntü içeriği bilgisini tutmaktır. Bu bilgi

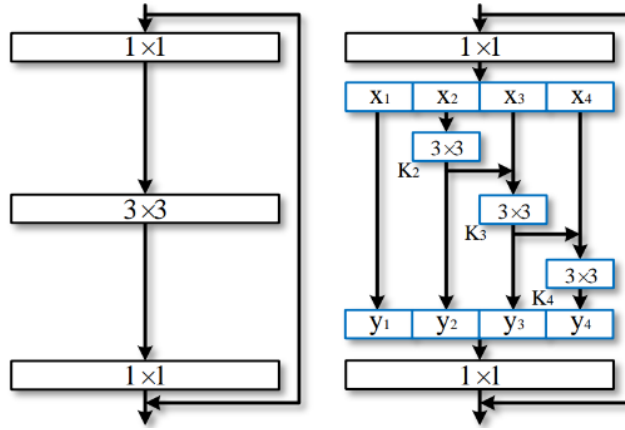
sonrasında kısayol bağlantıları ile kod çözücü kısma aktarılmaktadır. Kod çözücü kısım da kodlayıcı kısım gibi 4 bloktan oluşur ve bu bloklarda sırasıyla ters konvolüsyon katmanı + kodlayıcı kısımda elde edilen özellik haritaları ile birleştirme + adet 3×3 filtre boyutlu konvolüsyon katmanı ve ReLU aktivasyon fonksiyonunu içermektedir. Son kısımda segmente edilmiş görüntüyü elde etmek için 1×1 filtre boyutlu konvolüsyon işlemi uygulanır. Kodlayıcı-kod çözücü mimari U harfine benzediği için U-Net olarak isimlendirilmiştir. Ağın eğitilmesi için çok fazla veriye ihtiyaç duyulmaması U-Net mimarisinin sahip olduğu üstünlüklerden biridir.

3.3 Omurga modeli: Res2Net

3.3 Backbone model: Res2Net

U-Net'in başarısı, büyük ölçüde kullanılan omurga modeline bağlıdır. Omurga modeli, U-Net'in kodlayıcı bölümünü oluşturur ve giriş görüntüsünün özelliklerini öğrenmekten sorumludur. Omurga modeli olarak genellikle önceden eğitilmiş bir derin öğrenme modeli kullanılır. Bu, modelin daha hızlı ve daha etkili bir şekilde eğitilmesini sağlar, çünkü model, önceden eğitilmiş ağırlıklarla başlar ve bu ağırlıklar genellikle genel görüntü özelliklerini öğrenmek için yeterlidir. Önceden eğitilmiş modeller arasında VGG, ResNet, DenseNet ve EfficientNet gibi popüler seçenekler bulunmaktadır. Bu çalışmada omurga model olarak daha güncel bir mimari olan Res2Net (Gao vd., 2019) modeli tercih edilmiştir.

Gao vd. (2019) tarafından önerilen Res2Net modülü basit ama verimli bir ölçekli işleme yaklaşımı içermektedir. Şekil 6'da sol tarafta modern omurga CNN mimarilerinin *örn.* ResNet (He vd., 2016) darboğaz yapısı görülmektedir. Şekil 6'da sağ tarafta ise darboğaz bloğunda 3×3 'lük filtre grupları kullanarak özellikleri çıkarmak yerine benzer hesap yüküne sahip daha güçlü ve çok ölçekli özellik çıkarma yeteneğine sahip olan Res2Net modülü görülmektedir. Mimaride hiyerarşik rezidüel tarzda farklı filtre grupları bağlanırken, 3×3 filtre grupları daha küçük filtre grupları ile değiştirilmektedir. Mimari tek bir rezidüel blokta rezidüel tarzda bağlantılar içerdiğinden dolayı Gao vd. tarafından Res2Net olarak isimlendirilmiştir (Gao vd., 2019). CIFAR-100 ve ImageNet veri setleri üzerinde görüntü sınıflamada son teknoloji mimarilerden daha iyi performans gösteren Res2Net modülü son teknoloji modellere kolaylıkla entegre edilebilmektedir.

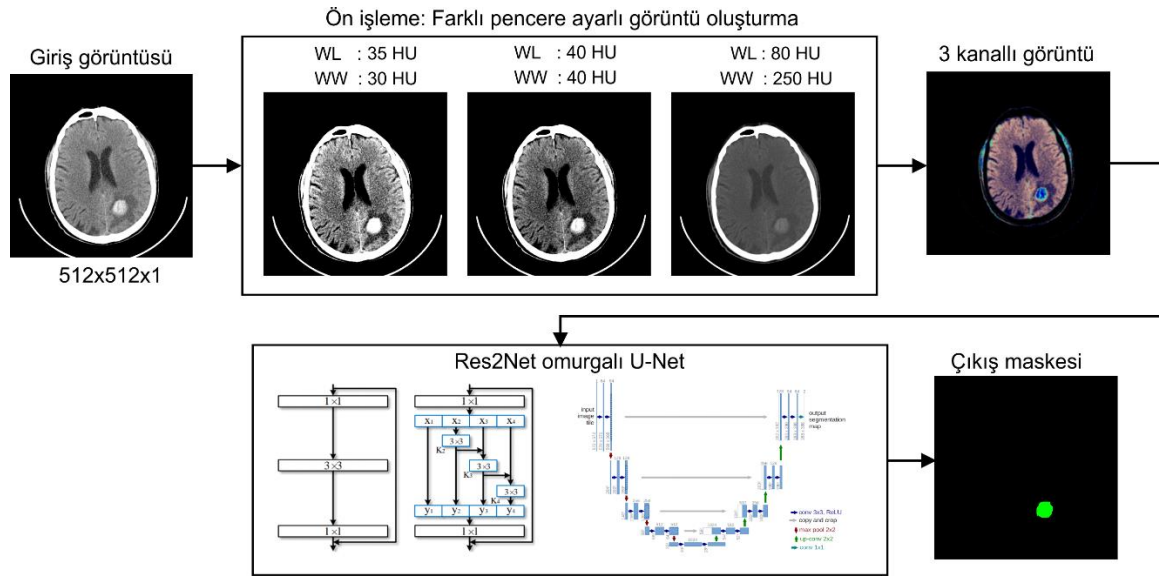


Şekil 6. Darboğaz bloğu ve ölçek boyutu $s = 4$ olan Res2Net modülünün karşılaştırılması (Gao vd., 2019)

Figure 6. Comparison of the bottleneck block and Res2Net module with scale size $s = 4$ (Gao vd., 2019)

Şekil 6 Res2Net bloğu ile darboğaz bloğu arasındaki farkı göstermektedir. Res2Net modülünde 1×1 konvolüsyondan sonra özellik haritaları, ölçek boyutu da denilen s adet x_i ile gösterilen özellik haritası alt kümesine ayrılmıştır. Burada $i \in \{1, 2, \dots, s\}$ olmaktadır. Her x_i özellik alt kümesi giriş özellik haritasıyla karşılaştırıldığında aynı uzamsal boyuta ancak $1/s$ kanal sayısına sahiptir. x_1 dışındaki her x_i , $\mathbf{K}_i()$ ile gösterilen 3×3 konvolüsyona sahiptir. $\mathbf{K}_i()$ konvolüsyon işleminin çıkış y_i ile gösterilmektedir. x_i özellik alt kümesi $\mathbf{K}_i()$ konvolüsyonunun çıkışı ile toplanır ve $\mathbf{K}_i()$ konvolüsyon işlemine giriş olarak verilir. s artarken parametreleri azaltmak amacıyla x_1 için 3×3 konvolüsyon işlemi ihmal edilir. Bu durumda y_i 'nin oluşturulması Denklem 3 ile ifade edilmektedir. Daha detaylı bilgi için referans (Gao vd., 2019) incelenebilir. Çalışmada inme segmentasyonu için kullanılan Res2Net omurgalı U-Net modeline ilişkin akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmektedir.

$$y_i = \begin{cases} x_i & i = 1; \\ K_i(x_i) & i = 2; \\ K_i(x_i + y_{i-1}) & 2 < i \leq s; \end{cases} \quad (3)$$



Şekil 7. BT görüntülerinde inme segmentasyonuna ilişkin blok diyagram
Figure 7. Block diagram of stroke segmentation on CT images

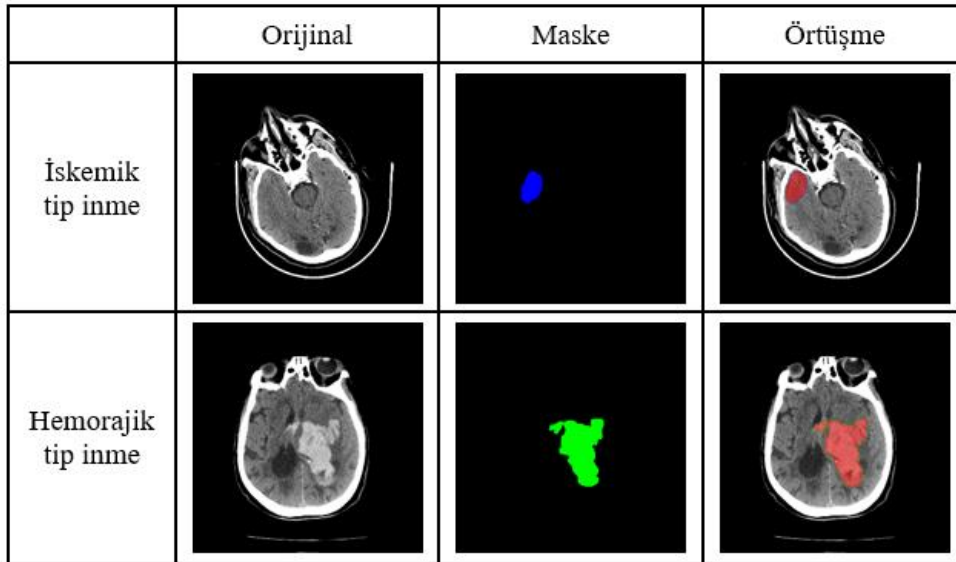
4. Deneysel analiz ve sonuçlar

4. Experimental analysis and results

4.1. Beyin BT Veri Seti

4.1 Brain CT Dataset

Bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığına ait Koç vd. (2022) tarafından derlenen ve BT görüntülerinden oluşan gerçek bir veri seti kullanılmıştır. Veri setinin ticari olmayan amaçlarla kullanımına izin verilmektedir ve kullanılmasında herhangi bir engel bulunmamaktadır. Veri seti 4427 inme içermeyen ve 2223 inme içeren BT görüntüsünden oluşmaktadır. İnme içeren görüntülerin de 1130 tanesi iskemik tip ve 1093 tanesi hemorajik tip inme içermektedir. Bu çalışmada inme bölgelerinin segmentasyon problemi ele alındığı için yalnızca inme içeren BT görüntüleri ile çalışılmıştır. 2019 ve 2020 yıllarında kaydedilen veriler Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı e-Nabız ve Teleradyoloji Sistemlerinden çeşitli kodlama ve filtreleme uygulanarak görselleştirilmiş ve veri seti oluşturulmuştur. Görüntüler 7 radyoloji uzmanı tarafından 6 haftalık bir süre içinde inme yok, iskemik inme ve hemorajik inme olarak etiketlenmiş, inme içeren görüntülerdeki inme bölgeleri işaretlenmiş ve kontrol edilmiştir. Sağlık Bakanlığı Sağlık Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü tarafından paylaşılan veriler 512×512 piksel boyutunda DICOM ve PNG formatında olup orijinal görüntü, maske görüntü ve maske görüntünün orijinal görüntü üzerine bindirilmiş hali olarak paylaşılmaktadır. Çalışmada veri setine ilişkin DICOM görüntüleri 512×512 piksel formatında kullanılmıştır. Veri setine ait iskemi tipi ve hemorajik tip inme içeren görüntüler Şekil 8’de gösterilmektedir. Şekildeki renkli kısımlar inme bölgesini göstermektedir.



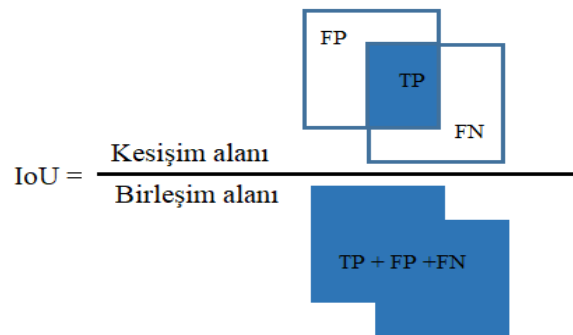
Şekil 8. İskemik ve hemorajik tip inme içeren orijinal BT görüntüleri, bu görüntülere ilişkin maske görüntüleri ve orijinal ile maskelerin örtüşme görüntüleri
Figure 8. Original CT images containing ischemic and hemorrhagic stroke, mask images of these images, and overlap images of the original and masks

4.2 Performans değerlendirme

4.2 Performance evaluation

Bu çalışmada inme bölgelerinin segmentasyon performansının hesaplanması için Jaccard indeksi de denilen IoU (Intersection over Union) metriği kullanılmıştır. Bu metriğin hesaplanabilmesi için öncelikle referans görüntülerin oluşturulması gerekmektedir. Temel gerçek de denilen referans görüntü ya da referans maske uzmanlar tarafından BT görüntüler üzerinde işaretlenmiş inme bölgelerini göstermektedir. Matematiksel ifadesi Denklem 4'teki gibi gösterilen piksel tabanlı metrik olan IoU, temel gerçek ile segmentasyon sonucu tahmin edilen bölgenin örtüşme alanının, temel gerçeğe segmentasyon sonucu tahmin edilen bölgenin birleşme alanına oranını göstermektedir. IoU piksel tabanlı bir metrik olduğu için örtüşme alanı ve birleşme alanı piksel cinsinden ifade edilmektedir. IoU değeri 0-1 arasında değişim gösterir. 0 örtüşme olmadığını ve 1 tahmin edilen ile temel gerçeğin tam olarak örtüştüğünü, sonuç olarak segmentasyon işleminin mükemmel olduğunu göstermektedir. IoU değerinin hesaplanmasına ilişkin görselleştirme Şekil 9'da görülmektedir. Segmentasyon problemlerinde karşılaşılan diğer bir metrik de mIoU'dur. Bu metrik ise çok sınıflı segmentasyon problemlerindeki ortalama IoU değerini belirtmektedir.

$$IoU = \frac{\text{Doğru Pozitif (TP)}}{\text{Doğru Pozitif (TP)} + \text{Yanlış Negatif (FN)} + \text{Yanlış Pozitif (FP)}} \quad (4)$$



Şekil 9. IoU metriğinin hesaplanmasına ilişkin görsel
Figure 9. Visual of calculating the IoU metric

Burada BT görüntülerindeki inme içeren piksellerin ait olduğu sınıf P (pozitif) sınıfı, inme içermeyen arka plandaki piksellerin ait olduğu sınıf da N (negatif) sınıfı olsun. Bu durumda Denklem 4'te ve Şekil 8'de belirtilen

- TP, gerçekte P sınıfından olup modelin de P olarak sınıflandırdığı piksel sayısını,
- TN, gerçekte N sınıfından olup modelin de N olarak sınıflandırdığı piksel sayısını
- FN, gerçekte P sınıfından olup modelin N olarak sınıflandırdığı piksel sayısını
- FP, gerçekte N sınıfından olup modelin P olarak sınıflandırdığı piksel sayısını göstermektedir.

4.3 İnme segmentasyon sonuçları

4.3 Stroke segmentation results

Beyin BT görüntülerinde iskemik ve hemorajik tip inme bölgelerinin segmente edildiği çalışmada Sağlık Bakanlığı Açık Veri Portalında paylaşılan gerçek görüntüler kullanılmıştır. Kullanılan veriseti 1130 iskemik tip ve 1093 hemorajik tip inme bulgusu içeren BT görüntülerinden oluşmaktadır. İnme bölgesi segmentasyonunda nihai sonuçlara ulaşmadan önce, test edilecek modelin farklı hiper parametreler kullanılarak ve BT görüntülerine de farklı ön işlemler uygulanarak eğitildiği bir dizi deney yapılmıştır. Her deneyde, modelin performansını değerlendirmek için IoU metriği kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kombinasyonlar Tablo 1'de gösterilmiştir. Model olarak temel U-Net modeli Res2Net omurgası ile kullanılmış ve BT görüntüleri ile model eğitilip test edilmiştir. Veriseti %90 ve %10 olmak üzere iki parçaya ayrılmış, %90'luk kısmı ile model eğitilirken, kalan kısım ile de model test edilmiştir. Kodlamalar python programlama dili kullanılarak yapılmıştır. Önerilen modelin eğitiminde ve testinde en iyi sonuçlara paket boyutu 16, optimizasyon algoritması Adam ve öğrenme oranı 0.0001 olduğu şartlarda ulaşılmıştır.

Tablo 1. Beyin inme segmentasyonunda kullanılan modellerin performanslarının karşılaştırılması
Table 1. Comparison of the performances of the models used in brain stroke segmentation

Model	Kayıp fonksiyonu	Veri	Ortalama IoU	IoU-0	IoU-1	IoU-2
Temel U-Net	Categorical C.	ham veri	0.67	0.97	0.32	0.72
Temel U-Net	Categorical C.	wset (beyin)	0.73	0.98	0.43	0.80
Temel U-Net	Dice	wset (beyin)	0.76	0.98	0.45	0.83
U-Net + Res2Net	Dice	wset (beyin)	0.82	0.98	0.67	0.84
U-Net + Res2Net	Dice	wset3C	0.87	0.99	0.80	0.88
U-Net + Res2Net	Dice	wset3C + veri çoğaltma	0.92	0.99	0.84	0.94

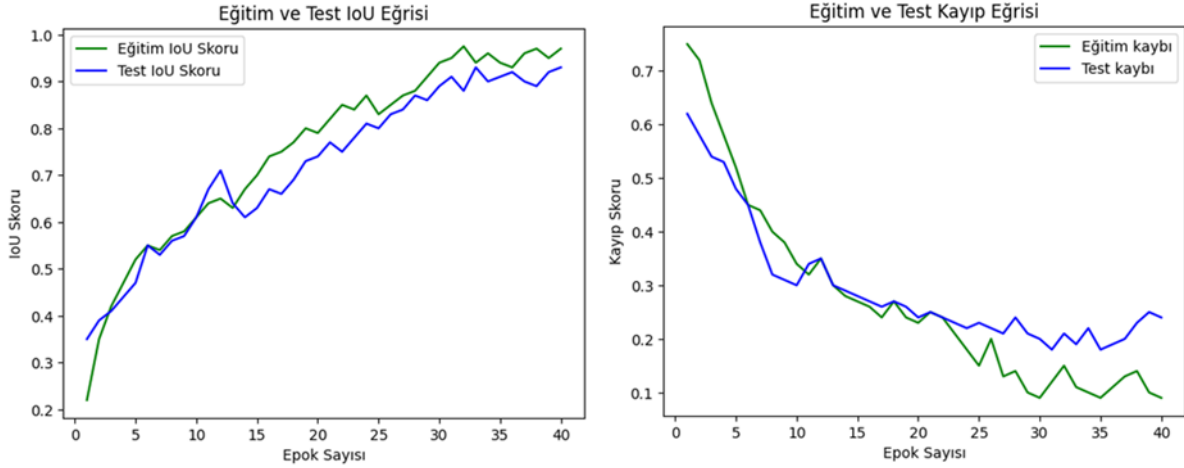
Deneyler yapılırken öncelikle Temel U-Net modeli kullanılmış, kayıp fonksiyonu olarak Categorical Crossentropy tercih edilmiş ve model hem ham görüntülerle hem de beyin pencere ayarlı görüntülerle (wset) test edilmiştir. Tablo 1'in 1. ve 2. satırından görüleceği üzere beyin pencere ayarlı görüntülerin kullanılmasıyla daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. Tabloda IoU-0 görüntüdeki inme dışında kalan arka planın, IoU-1 iskemik tip inme bölgesinin ve IoU-2 hemorajik tip inme bölgesinin segmentasyon başarımını ifade etmektedir. Mean IoU ise ortalama segmentasyon başarımını göstermektedir.

Sonraki deneyde Temel U-Net modeli Dice kayıp fonksiyonu ile kullanılmış ve beyin pencere ayarlı görüntülerle test edilmiştir. Tablo 1'in 2. ve 3. satırından görüleceği üzere Dice kayıp fonksiyonu Categorical Crossentropy kayıp fonksiyonundan daha iyi sonuçlar vermiştir, bunun üzerine sonraki deneylere Dice kayıp fonksiyonu ile devam edilmiştir.

Segmentasyon başarımını artırmak amacıyla U-Net modeli Res2Net omurgasıyla eğitilip test edilmiştir ve Tablo 1'in 3. ve 4. satırına bakıldığında başarımın arttığı görülmüştür. Sonrasında 3.1 Görüntü Pencereleme kısmında anlatılan ön işleme yöntemi ile oluşturulan görüntüler birleştirilmiş ve BT görüntülerinin üç kanallı

görüntüleri (wset3C) oluşturularak kullanılmıştır. Yapılan deneylerde başarımın daha da arttığı gözlemlenmiştir.

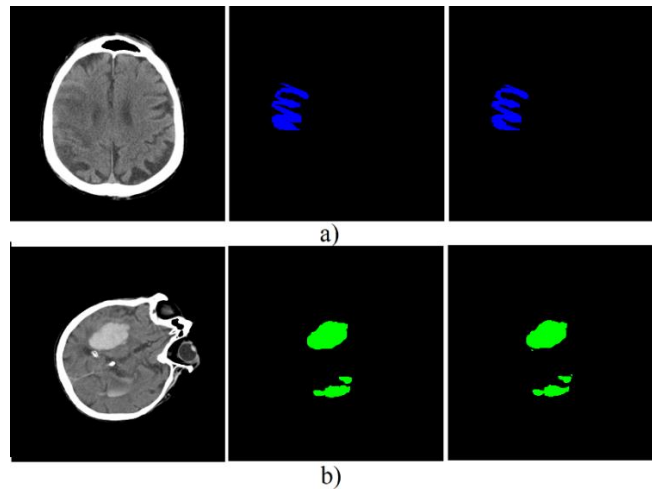
Son olarak üç kanallı görüntü oluşturma ön işleme metoduna ek olarak veri çoğaltma da uygulanarak deneylere dâhil edilmiştir. Veri çoğaltma amacıyla görüntülere rotasyon, iki eksende yansıtma, Gaussian blur, kaydırma ve kırpm gibi çeşitli işlemler uygulanarak eğitim veri setinin dört katına çıkması sağlanmıştır. Buna ilişkin deney sonucu da Tablo 1'in son satırında görülmektedir. En iyi segmentasyon başarımının bu koşullarda elde edilmiştir. En iyi segmentasyon performansı elde edilen modele ilişkin IoU ve kayıp grafiği Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Res2Net omurgalı U-Net segmentasyon modeline ilişkin eğitim ve test kümelerinin IoU ve kayıp eğrileri

Figure 10. IoU and loss curves of training and test sets for U-Net segmentation model with Res2Net backbone

Şekil 10'daki grafiklere bakıldığında IoU değerinin epok süresince arttığı ve öğrenmenin düzgün bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Kayıp grafiğinde ise eğitim ve test kümesi için kayıp beklendiği gibi azalmaktadır. Ayrıca Şekil 11'de iskemik tip ve hemorajik tip inme sınıflarına ait segmentasyon sonucu tahmin edilen maske ile gerçek maskenin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 11. BT görüntüsünde inme bölgesini gösteren gerçek maske ve segmentasyon sonucu tahmin edilen maske a) İskemik tip b) Hemorajik tip

Figure 11. Actual mask showing the stroke area on the CT image and the mask estimated from the segmentation a) Ischemic type b) Hemorrhagic type

Model eğitimi ve testi sırasında AMD Ryzen 9 5900HX işlemcisine sahip NVIDIA GeForce RTX 3080 Mobil GPU kullanılmıştır. Sonuçlar, derin öğrenme modelinin beyin BT görüntülerindeki iskemik ve hemorajik inme

bölgelerini etkili bir şekilde segmente edebildiğini, ayrıca görüntü pencereleme ön işlemi ile de segmentasyon performansının artırıldığını göstermiştir. Elde edilen segmentasyon sonuçları literatürle karşılaştırılabilecek seviyededir.

5. Tartışma ve Sonuçlar

5. Discussions and Conclusions

İnmenin erken tespiti ve inme bölgesinin doğru bir şekilde segmente edilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada iskemik tip ve hemorajik tip inme içeren beyin BT görüntülerinde inme bölgesinin segmentasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde Res2Net omurgalı U-Net modelinin (0.82) Temel U-Net modelinden (0.76) daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca önerilen modelde farklı pencere ayarları ile üç kanallı oluşturulan görüntülerin kullanılmasıyla da segmentasyon başarımı artmıştır (0.87). Üç kanallı görüntülere veri çoğaltma uygulanarak test edildiğinde ise daha iyi bir başarıma ulaşılmıştır (0.92). Sonuçlar, derin öğrenme tabanlı bu yaklaşımın, beyin BT görüntülerinde inme bölgesini otomatik olarak yüksek başarımla segmente edebileceğini göstermektedir. İnme segmentasyonu için önerilen model, geniş ve çeşitli bir veri setinde başarılı bir şekilde eğitilmiş ve test edilmiştir. Model, hem iskemik hem de hemorajik inmeleri etkili bir şekilde belirlemiştir.

Bu çalışmada kullanılan veri seti literatürde farklı araştırmacılar tarafından da kullanılmıştır (Karataş vd., 2022; Yalçın & Vural, 2022; Uçkun vd., 2023). Karataş vd. (2022) BT görüntülerini inme var veya inme yok ve hemorajik veya iskemik olarak sınıflandırma üzerine çalışmışlardır. Yalçın ve Vural (2022) veri seti üzerinde hem sınıflama hem de segmentasyon yapmışlardır ve inme segmentasyonundan %95.2 IoU değeri elde etmişlerdir. Bu değer önerilen çalışmada elde edilen değerden daha yüksektir. Yalçın ve Vural çalışmalarında ön işleme, standartlaştırma, normalizasyon ve veri çoğaltma tekniklerini uygulayarak başarımlarını artırmışlardır. Ön işleme olarak giriş görüntüsünün iki kopyası üzerinde kontrast ayarı ve görüntü filtreleme yaparak iki farklı görüntü elde etmiş ve bu görüntüleri birleştirerek kullanmışlardır. Hemorajik ve iskemik sınıftaki verileri yatay çevirme ve %20 döndürme tekniklerini kullanarak iki katına çıkarmışlardır. Yapılan tüm bu işlemler görüntülerden daha anlamlı özellikler çıkarılmasını sağlayarak başarımları artırmıştır. Uçkun vd. (2023) iskemik inme bölgesinin segmentasyonunda %96.95 IoU değeri elde etmiştir. Bu değer önerilen çalışmada iskemik inme segmentasyonu için elde edilen %84 IoU değerinden yüksektir. Uçkun vd. (2023) inme bölgelerinin segmentasyonunda yüksek başarımla elde etmek amacıyla görüntü üzerinde hem ön işleme hem de veri çoğaltma teknikleri uygulamışlardır. Ön işleme olarak parlaklık değiştirme, Gaussian ve bulanıklık filtreleri uygulama, tuz&karabiber ve Gauss gürültüsü ekleme gibi yaklaşımlar kullanmışlardır. Ayrıca segmentasyon başarımını yükseltmek amacıyla kullandıkları mimarinin son katmanından sonra genişletme evrişim katmanı eklemiştirler. İskemik BT görüntü sayısını 1130'dan 5628'e yükselterek kullanmışlar, ancak veri çoğaltmayı hangi küme (eğitim-test) üzerinde yaptıklarını belirtmemişlerdir. Veri çoğaltma tekniklerinin yalnızca eğitim kümesi üzerinde uygulanması modelin segmentasyon doğruluğunun güvenilirliğini göstermektedir.

Kaya ve Önal (2023) gerçek CT görüntülerinden oluşan farklı bir veri seti üzerinde yaptıkları segmentasyon çalışmasında iskemik ve hemorajik inme için sırasıyla %82.22 ve %92.01 IoU değeri elde etmişlerdir. Önerilen çalışmada ise elde edilen IoU değerleri iskemik ve hemorajik inme için sırasıyla %84 ve %94 olarak elde edilmiş ve daha iyi bir segmentasyon başarımına ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, Res2Net omurgalı temel U-Net derin öğrenme modeli, beyin BT görüntülerinden otomatik inme segmentasyonu için etkili yöntemdir. Ayrıca görüntülere uygulanan pencereleme yönteminin istenilen dokuları ön plana çıkarmasından dolayı, farklı pencere ayarlı görüntülerin birleştirilmesiyle oluşan üç kanallı görüntüler model başarımını artırmıştır. Başarımın daha da artırılması için pencereleme işlemi yapıldıktan sonra oluşan üç kanallı görüntüye Uçkun vd. (2023) ve Yalçın ve Vural (2022) tarafından kullanılan ön işleme teknikleri uygulanabilir. Bu çalışmanın sonuçları, otomatik inme segmentasyonunun tıbbi görüntü analizi alanında önemli bir uygulama olduğunu doğrulamaktadır. Bu tür bir sistem, radyologların inme vakalarını daha hızlı ve daha etkin bir şekilde belirlemesine yardımcı olabilir. Böylece, hastaların hızlı ve doğru bir şekilde tedaviye yönlendirilmesi sağlanabilir.

Yazar katkısı*Author contribution*

Tüm yazarlar makaleye eşit katkıda bulunmuşlardır. Çalışmanın planlanması, verilerin analize hazır hale getirilmesi, analizlerin yapılması, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazılmasında her iki yazar da eşit katkı sunmuşlardır.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Aboudi, F., Drissi, C., & Kraiem, T. (2022). Efficient U-Net CNN with data augmentation for MRI ischemic stroke brain segmentation. *In 2022 8th IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (ss. 724-728), İstanbul.
- Abuzaid, M.M., Elshami, W., Tekin, H., & Issa, B. (2021). Assessment of the willingness of radiologists and radiographers to accept the integration of artificial intelligence into radiology practice. *Academic Radiology*, 29(1), 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.09.014>
- Ajam, M., Kanaan, H., Ayache, M., & el Khansa, L. (2019). Segmentation of CT brain stroke image using marker controlled watershed. *In 2019 Fifth IEEE International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME)* (ss. 1-4), Tripoli.
- Alhatemi, R.A.J., & Savaş, S. (2022). Transfer learning-based classification comparison of stroke. *Computer Science, IDAP-2022*, 192-201. <https://doi.org/10.53070/bbd.1172807>
- Alquhayz, H., Tufail, H. Z., & Raza, B. (2022). The multi-level classification network (MCN) with modified residual U-Net for ischemic stroke lesions segmentation from ATLAS. *Computers in Biology and Medicine*, 151, 106332.
- Barros, R.S., Tolhuisen, M.L., Boers, A.M., Jansen, I., Ponomareva, E., Dippel, D.W., van der Lugt, A., van Oostenbrugge, R.J., van Zwam, W.H., Berkhemer, O.A., & Goyal, M. (2020). Automatic segmentation of cerebral infarcts in follow-up computed tomography images with convolutional neural networks. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, 12(9), 848-852. <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2019-015471>
- Campbell, B.C.V., De Silva, D.A., Macleod, M.R., Coutts, S.B., Schwamm, L.H., Davis, S.M., & Donnan, G.A. (2019a). Ischaemic stroke. *Nature Reviews Disease Primers*, 5(1), 70. <https://doi.org/10.1038/s41572-019-0118-8>
- Campbell, B.C.V., & Khatri, P. (2020). Stroke. *The Lancet*, 396, 129-142. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31179-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31179-X)
- Campbell, B.C.V., Ma, H., Ringleb, P.A., Parsons, M.W., Churilov, L., Bendszus, M., Levi, C.R., Hsu, C., Kleinig, T.J., Fatar, M., Leys, D., Molina, C., Wijeratne, T., Curtze, S., Dewey, H.M., Barber, P.A., Butcher, K.S., De Silva, D.A., Bladin, C.F., Yassi, N., Pfaff, J. A. R., Sharma, G., Bivard, A., Desmond, P.M., Schwab, S., Schellinger, P.D., Yan, B., Mitchell, P.J., Serena, J., Toni, D., Thijs, V., Hacke, W., Davis, S.M., & Donnan, G.A. (2019b). Extending thrombolysis to 4·5-9 h and wake-up stroke using perfusion imaging: a systematic review and meta-analysis of individual patient data. *The Lancet*, 394(10193), 139-147. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)31053-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)31053-0)
- Clérigues, A., Valverde, S., Bernal, J., Freixenet, J., Oliver, A., & Lladó, X. (2019). Acute ischemic stroke lesion core segmentation in CT perfusion images using fully convolutional neural networks. *Computers in Biology and Medicine*, 115, 103487. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2019.103487>

- DenOtter, T.D., & Schubert, J. (2023). Hounsfield unit. [Updated 2023 Mar 6]. In: *StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing*; 2023 Jan-. Erişim adresi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547721/>
- Gao, S. H., Cheng, M. M., Zhao, K., Zhang, X. Y., Yang, M. H., & Torr, P. (2019). Res2net: A new multi-scale backbone architecture. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 43(2), 652-662.
- Gautam, A. & Raman, B. (2021). Towards effective classification of brain hemorrhagic and ischemic stroke using CNN. *Biomedical Signal Processing and Control*, 63, 102178. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102178>
- GBD (Global Burden of Diseases) 2016 Stroke Collaborators, 2019, Global, regional, and national burden of stroke, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet, Neurology*, 18(5), 439-458, [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(19\)30034-1](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30034-1)
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (ss. 770-778), Las Vegas.
- Hollist, M., Morgan, L., Cabatbat, R., Au, K., Kirmani, M.F., & Kirmani, B.F. (2021). Acute stroke management: Overview and recent updates. *Aging and Disease*, 12(4), 1000-1009. <https://doi.org/10.14336/AD.2021.0311>
- Jung, H. (2021). Basic physical principles and clinical applications of computed tomography. *Progress in Medical Physics*, 32(1), 1-17.
- Karataş, A. F., Doğan, V., & Kılıç, V. (2022). Artificial Intelligence-based Cerebrovascular Disease Detection on Brain Computed Tomography Images. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 175-182.
- Kaya, B., & Önal, M. (2023). A CNN transfer learning-based approach for segmentation and classification of brain stroke from noncontrast CT images. *International Journal of Imaging Systems and Technology*.
- Koç, U., Sezer, E.A., Özkaya, Y.A., Yarbay, Y., Taydaş, O., Ayyıldız, V.A., Kızıloğlu, H.A., Kesimal, U., Çankaya, İ., Beşler, M.S., & Karakaş, E. (2022). Artificial intelligence in healthcare competition (Teknofest-2021): Stroke data set. *The Eurasian Journal of Medicine*, 54(3), 248. <https://doi.org/10.5152/eurasianjmed.2022.22096>
- Li, L., Chen, Y., Bao, Y., Jia, X., Wang, Y., Zuo, T., & Zhu, F. (2020). Comparison of the performance between Frontier ASPECTS software and different levels of radiologists on assessing CT examinations of acute ischaemic stroke patients. *Clinical Radiology*, 75(5), 358-365. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2019.12.010>
- Lo, C.M., Hung, P.H., & Lin, D.T. (2021). Rapid assessment of acute ischemic stroke by computed tomography using deep convolutional neural networks. *Journal of Digital Imaging*, 34(3), 637-646. <https://doi.org/10.1007/s10278-021-00457-y>
- Nishio, M., Koyasu, S., Noguchi, S., Kiguchi, T., Nakatsu, K., Akasaka, T., Yamada, H., & Itoh, K. (2020). Automatic detection of acute ischemic stroke using non-contrast computed tomography and two-stage deep learning model. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 196, 105711. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105711>
- Osborne, T., Tang, C., Sabarwal, K., & Prakash, V. (2016). How to interpret an unenhanced CT brain scan. Part 1: Basic principles of computed tomography and relevant neuroanatomy. *South Sudan Medical Journal*, 9(3), 67-69.
- Pulli, B., Heit, J.J., & Wintermark, M. (2021). Computed tomography-based imaging algorithms for patient selection in acute ischemic stroke. *Neuroimaging Clinics of North America*, 31(2), 235-250. <https://doi.org/10.1016/j.nic.2020.12.002>
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III 18* (s. 234-241). Springer International Publishing.
- Sacco, R.L., Kasner, S.E., Broderick, J.P., Caplan, L.R., Connors, J.J., Culebras, A., Elkind, M.S., George, M.G., Hamdan, A.D., Higashida, R.T., Hoh, B.L., Janis, L.S., Kase, C.S., Kleindorfer, D.O., Lee, J.M., Moseley, M.E., Peterson, E.D., Turan, T.N., Valderrama, A.L., & Vinters, H.V. (2013). An updated definition of stroke for the 21st century: A statement for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*, 44(7), 2064-2089. <https://doi.org/10.1161/STR.0b013e318296aeca>

- Subudhi, A., Dash, M., & Sabut, S. (2020). Automated segmentation and classification of brain stroke using expectation-maximization and random forest classifier. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40(1), 277-289. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2019.04.004>
- Uçkun, S., Açarlı, M., & Kılıç, V. (2023). Deep Learning-Based Ischemic Stroke Segmentation on Brain Computed Tomography Images. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (50), 105-112.
- Vilela, P., & Rowley, H.A. (2017). Brain ischemia: CT and MRI techniques in acute ischemic stroke. *European Journal of Radiology*, 96, 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.08>
- Winzeck, S., Hakim, A., McKinley, R., Pinto, J.A.A.D.S.R., Alves, V., Silva, C., Pisov, M., Krivov, E., Belyaev, M., Monteiro, M., Oliveira, A., Choi, Y., Paik, M.C., Kwon, Y., Lee, H., Kim, B.J., Won, J.H., Islam, M., Ren, H., Robben, D., Suetens, P., Gong, E., Niu, Y., Xu, J., Pauly, J.M., Lucas, C., Heinrich, M.P., Rivera, L.C., Castillo, L.S., Daza, L.A., Beers, A.L., Arbelaez, P., Maier, O., Chang, K., Brown, J.M., Kalpathy-Cramer, J., Zaharchuk, G., Wiest, R., & Reyes, M. (2018). ISLES 2016 and 2017-Benchmarking ischemic stroke lesion outcome prediction based on multispectral MRI. *Frontiers in Neurology*, 9, 679. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00679>
- Yahiaoui, A. F. Z., & Bessaid, A. (2016). Segmentation of ischemic stroke area from CT brain images. *In 2016 IEEE International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC)* (ss. 13-17), Tunus.
- Yalçın, S. & Vural, H. (2022). Brain stroke classification and segmentation using encoder-decoder based deep convolutional neural networks. *Computers in Biology and Medicine*, 149, 105941. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2022.105941>
- Yang, H., Huang, C., Nie, X., Wang, L., Liu, X., Luo, X., & Liu, L. (2023). IS-Net: Automatic Ischemic Stroke Lesion Segmentation on CT Images. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 7(5), 483-493.
- Yedavalli, V.S., Tong E., Martin, D., Yeom, K.W., & Forkert, N.D. (2021). Artificial intelligence in stroke imaging: Current and future perspectives. *Clinical Imaging*, 69, 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2020.09.005>
- Zhou, X. (2020). Automatic segmentation of multiple organs on 3D CT images by using deep learning approaches. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1213, 135-147. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33128-3_9

Tarihi çevrede eski-yeni yapı uyumunun 3 boyutlu fraktal analiz yöntemi ile incelenmesi: Safranbolu örneği

Examination of old-new building harmony in the historical environment with 3D fractal analysis method: Safranbolu example

Selim KARTAL*¹ , Ahmet Emre DİNÇER² 

¹ Iğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Iğdır

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mimarlık ve Güzel Sanatlar Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Ankara

• Geliş tarihi / Received: 27.02.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 25.09.2023

Öz

Geleneksel dokular toplumların kültürlerinin somut yansımalarıdır. Toplumların-sürdürülebilirlik açısından- bu dokuları korumak, gelecek kuşaklara aktarmak ve onlardan çıkarımlar yapmak gibi sorumlulukları vardır. Ancak ilerleyen zamana karşın değişen yaşam koşulları ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda yeni mekânlara ve binalara gereksinim duyulmaktadır. İki unsur arasındaki dengeyi kurabilmek için geleneksel dokuların çevresinde onlara uyumlu, sürdürülebilir yapıları planlamak, inşa etmek gereklidir. Bu amaç doğrultusunda geçmişten bugüne tabi ki nitel ve nicel çeşitli yöntemler ve kurallar geliştirilmiştir. Dolayısıyla uygulanan yöntem ve kuralların sonuçlarının nesnel değerlendirilmesine de her zaman ihtiyaç duyulmuştur. Buna karşılık olarak kullanılabilir değerlendirmeye araçlarından birisi de doğadaki çeşitli dokuların analizinde kullanılan, mimari analizlerde de değerlendirilen ve somut çıkarımlar sunan fraktal boyut uygulamalarıdır. Bu çalışmada da bu yöntemle, tarihi çevre içinde ya da çevresinde uygulanan yapıların çevresiyle uyumluluklarının sınanması amaçlanmıştır. Bunun için, diğer çalışmalardan farklı olarak üç boyutlu fraktal yaklaşımla, kültürel miras kenti Safranbolu'da Babasultan Mahallesi'nde seçilen tescilli eski ve yeni inşa edilen binaların doku analizleri yapılarak ve birbirleriyle tutarlılıkları ölçülmüştür. Bu şekilde, hem bu tarihi çevredeki yeni yapı yaklaşımlarıyla ilgili bir durum tespiti hem de bu tekniğin sayısal çıktıları üzerinden eski ve yeni yapıların yorumlaması yapılmıştır. Analizlerde yeni yapılarda farklı yaklaşımlarla birlikte, özellikle biçimsel doku bakımından, bir dil birliğinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: 3 boyutlu fraktal analiz, Fraktal boyut, Fraktal geometri, Safranbolu

Abstract

Traditional textures are concrete reflections of the cultures of societies. Societies have responsibilities in terms of sustainability, such as preserving these textures, transferring them to future generations, and making inferences from them. However, despite the advancing time, new spaces and buildings are needed in line with changing living conditions and increasing needs. In order to establish the balance between the two elements, it is necessary to plan and build sustainable structures around traditional textures that are compatible with them. For this purpose, from past to present, of course, various qualitative and quantitative methods and rules have been developed. Therefore, there has always been a need for an objective evaluation of the results of the applied methods and rules. One of the evaluation tools that can be used in response to this is fractal dimension applications that are used in the analysis of various textures in nature, are also evaluated in architectural analyzes, and offer concrete inferences. In this study, it is aimed to test the compatibility of the structures applied in or around the historical environment with their surroundings. For this purpose, different from other studies, texture analyses of the registered old and newly built buildings selected in the Babasultan District of the cultural heritage city Safranbolu were made with a three-dimensional fractal approach and their consistency with each other was measured. In this way, both due diligence regarding the new building approaches in this historical environment and an interpretation of the old and new buildings were made on the digital outputs of this technique. In the analysis, it has been determined that there is a linguistic unity, especially in terms of formal texture, with different approaches to new structures.

Keywords: 3d Fractal analyses, Fractal dimension, Fractal Geometry, Safranbolu

* Selim KARTAL; selmkartal@yahoo.com

1. Giriş

1. Introduction

Tarihi dokular; kültürel miras timsali olarak geçmiş dönemlerin sosyo-kültürel, ekonomik, teknolojik yapısıyla birlikte dönemin yaşam biçimlerini de yansıtan mekânlardır (Büyükmihçi vd., 2019). Bu mekânlar farklı dönem ve kuşakların, farklı imkân ve koşullarına bağlı olarak tasarlanıp üretilmiştir. Tarihi dokular; yapıldığı dönemin birbirinden farklı birçok özelliğine rağmen, tekil yapıdan kent ölçeğine kadar, bu farklılıkların arasındaki uyumun bütün fiziksel mekâna yansıtılmasında da başarılı yapılar (Arabacıoğlu & Aydemir, 2007). Aynı zamanda bu mekânlar, kentsel kimlik bakımından geçmişten günümüze kadarki süreçte taşıdıkları izlerle buldukları yerlere büyük değer kazandırmakta ve geçmişten referans alınan bu değer gelecek kuşaklara bir birikim olarak aktarılmaktadır (Demirkol, 2021).

Sahip oldukları özgün kimlikleri ile içinde yaşanılan çağın kültürel ve mimari özelliklerini günümüze kadar taşıyan tarihi dokularda, insanların değişen gereksinimlerine bağlı olarak, yeni yapılara ihtiyaç duyulup zamanla bu yapılar inşa edilmiştir. İnşa edilen her yapı aynı zamanda çevrenin değişimine neden olmaktadır (Temel vd., 2020). Bu sebeptendir ki tarihi dokuda günümüz ihtiyaçları doğrultusunda tasarlanan ve inşa edilen yeni yapılaşmalar üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Tarihi doku aracılığı ile geçmişten gelen ve ait olduğu dönemin kültürel ve mimari özelliklerini yansıtan değerlerin doğru bir şekilde saptanabilmesi için tasarımcı, tarihi çevrenin fiziksel ve sosyal özelliklerini dikkatli bir şekilde analiz ederek kendi yorumunu da katarak tasarlayacağı yeni yapıda başarılı bir şekilde kullanılmalıdır (Ateş Can & Uyguralp, 2022). Günümüz modern toplumları; tarihi dokudaki geçmişe ait değerleri korumakla beraber, çağın ihtiyaç ve şartlarına göre, sosyal yaşama uyum sağlamaya da gereksinim duymaktadır (Tan & Arabacıoğlu, 2020). Bu amaç doğrultusunda, tarihi dokuda yapılacak yeni yapı tasarımlarında hem günün ihtiyaç ve koşulları göz önünde bulundurulmalı hem de tarihi dokunun bütünlüğünü bozacak müdahalelerden kaçınılmalıdır. Dolayısıyla tarihi dokuda ortaya konacak yeni yapı tasarımında uygulanacak yaklaşımlar büyük önem arz etmektedir.

Tarihi dokuda inşa edilecek yeni yapının; tasarım kriterleri bakımından içinde bulunduğu çevrenin ölçeğine, oranına ve karakteristik özelliklerine uyumlu olması gerekmektedir. Buna göre tarihi dokunun özellikleri göz önünde bulundurularak, çevresi ile uyumlu yeni yapı tasarımları yapılmalıdır (Tanaç Zeren, 2010). Tarihi dokunun özelliklerine göre bu tasarımlar farklılıklar göstermesine rağmen, oluşturulacak yeni yapı tasarımlarında dikkate alınan başlıca yaklaşımlar tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Tarihi çevrede yeni yapı tasarım yaklaşımları

Table 1. New building design approaches in the historical environment

Yazar	Yaklaşım
Velioğlu (1992)	Tarihi Çevrede uyum/benzer yaklaşımı (Tarihsel biçimlerin yorumu, Tarihsel biçimlerin taklit edilmesi), Tarihi çevrede karşıt/zıt yaklaşım, Tarihi çevrede serbest yaklaşım
Güler (2004)	Taklit Etme, Zıtlık oluşturma yaklaşımı, Yorumlama yaklaşımı
Kanat Duralı (2007)	Uyumlu yapma yöntemi (Benzetme yöntemi, Etkisizleştirme (Nötrleştirme) Yöntemi, Yorumlama yöntemi), Karşıtlık (Zıttını yapma) yöntemi
Enç (2009)	Uyum/benzer yaklaşım (Tarihsel biçimlerin taklidi, Tarihsel biçimlerin yorumu), Karşıt/zıt yaklaşım, Rastlantısal yaklaşım
Düzgün (2010)	Uygunluk/uyumlu yapma (Benzetme/benzeşim, Nötrlük/etkisizleştirme), Zıtlık, Taklit (aynısını yapma)
Tanaç Zeren (2010)	Üslup taklidi, Geleneksele Öykünme, Saygılı yaklaşım ve Aykırı yaklaşımı
Kılıç (2015)	Uyum/Benzer Yaklaşım (Taklit/Tekrar, Yorum), Zıt/Karşıtlık Yaklaşım
Yetiş (2016)	Uyumlu yapma yöntemi (Benzetme/ Üslup Taklidi yöntemi, Yorumlama/ Geleneksele Öykünme Yöntemi, Etkisizleştirme Yöntemi), Karşıtlık/Zıt yapma Yöntemi
Ateş Can ve Uyguralp (2022)	Tarihi çevrede uyum/benzer yaklaşımı (Tarihsel biçimlerin taklidi/tekrarı, Tarihsel biçimlerin yorumu), Tarihi çevrede zıt/karşıtlık yaklaşımı

Tarihi çevredeki yeni tasarım uygulamalarında, bu yaklaşımlardan genel olarak “uyumlu yapma yaklaşımı” (Taklit etme/aynısını yapma, yorumlama/geleneksel öykünme) ve “zıtlık oluşturma yaklaşımları”nın ön plana çıktığı görülmektedir. Ancak bu uygulamaların hepsinde çevreyle uyumluluk dereceleri tartışma konusu olmaktadır.

Tarihi çevrede yeni yapı tasarımlarının mevcut dokuyla uyum içinde olması önemlidir. Bu yüzden mevcut ve yeni yapı tasarımlarının bütünleştirilmesinde tarihi çevreyi her yönüyle anlayıp yorumlamak gerekmektedir. Bu konu üzerine ilgili literatür araştırmalarında da bu uygulamaların ölçülebilirliğine ve değerlendirme koşullarına dikkat çekilmektedir (Arslan vd., 2020; Akbıyık, 2013; Bahadır, 2020; Çalışkan & Karakuş, 2022; Ateş Can & Uyguralp, 2022; Düzgün, 2010; Ediz & Çağdaş, 2007).

Bu yüzden öznelde ziyade nesnel/nicel değerlendirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada da tarihi çevre yakınlarında inşa edilen yapıların tarihi dokuyla uyumluluk derecelerini belirlemek amacıyla sayısal bir yöntem olan fraktal boyut yaklaşımı esas alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Bunun için alan çalışması olarak tarihi kent dokusuna sahip olan ve bu dokudan yoğun bir şekilde etkilenen Safranbolu kenti seçilmiş ve buradaki yapılar incelenmiştir.

2. Fraktaller, fraktal geometri ve fraktal boyut:

2. *Fractals, fractal geometry and fractal dimension:*

“Fraktal” kelimesinin kökeni, parçalanma ve kırılma anlamına gelen Latince bir kelime olan “frangere” kelimesine dayanır (Ostwald & Vaughan, 2016). Kelimenin bugünkü anlamı hem bu orijinal Latince kelimeye hem de matematiksel değışkene işaret eder. Genelde düzensiz boyutluluğu ya da sonsuz derinlikte geometrik dizileri tanımlamada kullanılan fraktal geometri, öklid geometrisinin rijitliği ve tamlığından farklı olarak karmaşıklık teorisiyle ilgili belirsizlik ve düzensizlik gibi kavramları içerir (Ediz & Çağdaş, 2005). Basit formlarla tanımlamak veya genel formu daha basit bileşenlere ayırarak indirgemek yerine, temel yapıyı kullanarak, doğa benzeri nesnelere doğrudan tanımlamaya ve üretmeye yönelik yöntemler sunar (Lorenz, 2011).

Tanımlamalarda fraktal boyut ve geometri arasındaki farklılığa Mandelbrot açıklık getirmiştir. Buna göre fraktal geometri yalnızca topolojik uzayda var olan ve üst seviyede öz benzerliğe sahip belirli geometrik dizileri ifade etmektedir. Bunun tipik örneği de ideal fraktal olarak bilinen Koch’un kar tanesidir. Kar tanesi bir üçgenle başlar. Üçgenin her bir kenarının ortasına, kenar uzunluğunun üçte biri boyutunda yeni üçgenler eklenir. Oluşan yeni şekle bu kuralın uygulanması ve tekrarlanmasıyla kar tanesine benzer şekil elde edilir. Fraktal boyut ise topolojik ya da maddi evrende düzensiz nesnelere boşluk doldurma özelliklerini tarifleyen daha genel bir terimdir. Bir başka ifadeyle fraktal boyut, bir öz-benzer şeklin karmaşıklık düzeyinin ölçümüdür (El-Darwish, 2019) ve farklı ölçeklerde fraktal kırılmaların ve düzensizliklerin derecesini belirler (Zmeřkal vd., 2001). Aynı zamanda bir nesnenin ne kadar dokulu olduğunu ya da pürüzlülük derecesini ifade eder. Fraktal hesaplamalar, bir tekrarlardan diğere artış hızını da gösterdiği için herhangi bir formun fraktal boyutu aslında ayrıntıların ilerlemesinin ölçüsünü de verir. Matematiksel olarak, fraktal boyut şekiller için 1 ve 2; nesnelere için 2 ve 3 arasındadır. Fraktal boyut= log (öz benzer parçalar) /log (büyüme faktörü) şeklinde formüle edilir. Örneğin, kar tanesinin karakteristik düzensizliği onun fraktal boyutudur. Matematiksel olarak boyut değeri de 1.26’dır.

Fraktal boyut hesaplamaları için Mandelbrot üç farklı yöntem sunmuştur. İlki ve en yaygın olanı “kutu sayma yöntemi”dir. Farklı ölçeklerde ızgaraları üst üste bindirmeye ve her birinde bulunan ayrıntı miktarını karşılaştırmaya dayalıdır. İkinci bir yöntem, farklı yarıçaplarda üst üste binen dairelerin kullanımıyla ve bu dairelerin bir görüntünün an çerçevesini örtme potansiyelleri arasında karşılaştırmayla bir görüntünün yaklaşık fraktal boyutunun hesaplanabileceğini göstermiştir. Üçüncü yöntem ise bir dizi dairenin bir görüntü etrafındaki düzensiz çizgileri örtme potansiyelini temel alan “paketleme boyutu”dur. Bu yöntemde giderek boyutları küçülen bir dizi dairenin ilgili görüntü içinde yinelemeli olarak paketlenmesi düşünülür. Sonrasında nesneyi kaplamak için gerekli farklı ölçeklerdeki daireler arasında karşılaştırma yapılır.

Mandelbrot’la beraber fraktal boyut hesaplamaları için yedi yaklaşım daha geliştirilmiştir (Ostwald & Vaughan, 2016). Bunlar; “sayma yöntemi (box-counting), diferansiyel kutu sayma yöntemi (differential box-counting), kuvvet farklılaştırma yöntemi (power differentiation method), fark istatistikleri yöntemi (the

difference statistics method), K'ninci en yakın komşu yöntem (the Kth nearest neighbour method) ve kapsayan örtü yöntemi (the covering blanket approach) dir. Mimari çalışmalarda bu yöntemlerden en çok tercih edileni kutu sayma yöntemidir.

Mimari literatürdeki fraktal boyut analiz örneklerinden ve yaklaşımlarından bazıları ise şu şekilde özetlenebilir: [Ediz ve Çağdaş \(2007\)](#) Fethiye-Kayaköy yerleşmesinin dokusunu inceleyerek, fraktal geometriye dayalı yeni tasarım türetimleri sağlayan bir yaklaşım önerisi sunmuştur. Çalışmada öncelikle kentsel yerleşim, daha sonra cadde ve konut ölçeğinde kutu sayma yöntemiyle kentsel yerleşimin fraktal değerleri belirlemiştir. Bu değerler üretken modelin verisi olmuştur. [El-Darwish \(2019\)](#) son zamanlarda Mısır'da değişen kentsel dokulara işaret ederek karmaşıklık olgusunun kullanıcılar üzerindeki etkisine değinmiştir. Üç farklı kente ait merkez caddelerindeki cephe dokularını incelemiştir. Yazarlar, fraktal boyut değerleri oldukça yüksek çıkan bu dokuları kullanıcıların, görsellik açısından estetik-çirkinlik ölçeğinde nötr olarak yorumladıklarını belirtmiştir. Ancak yine de fraktal değeri en yüksek olan doku ile ilgili değerlendirmeler çirkin değere yakın sonuçlanmıştır. Buna bağlı olarak, estetik değerlendirmelerde az karmaşık yapıların öncelikli olduğu ve önemli rol aldığını ifade etmişlerdir. [Atak Doğan ve Çağdaş \(2017\)](#) tarihi bir birikime sahip Kayseri-Germir bölgesindeki yerleşim dokusunu vaziyet planı, sokak silüeti, tekil bina cephesi ve yapı detaylarıyla farklı ölçeklerde çözümlenmişlerdir. Çalışmada, bu ölçekler arası değerlendirmelerde benzer fraktal boyut değerlerine ulaşarak değerler arasındaki tutarlılığa dikkat çekmişlerdir. Benzer şekilde [Topbaş ve Arslan \(2022\)](#), Mersin ve Tarsus bölgelerinde yöresel özellikleri yansıtan eşit sayıda seçilen tekil yapıların cephelerini değerlendirerek, yerleşimlerin birbirine yakınlıklarını ve etkileşim düzeylerini tespit etmişlerdir. Bu çalışmalardan farklı olarak [Lorenz \(2016\)](#), Le Corbusier'in yapıtlarını irdelemiştir. Çalışmada yapılan analizlerde mimarın öncülük ettiği akımın ölçütlerinden biri olan "süsleme yoktur" ilkesinin mimarı pürüzsüz cephelere yönlendirmediği, mimarın eserleri arasında tam olarak dönemsel ayrımların oluşmadığı sonucuna ulaşmıştır. Benzer şekilde, [Vaughan ve Ostwald \(2011\)](#), Frank Lloyd Wright'ın çalışmalarını üç farklı tarzda (Prairie evleri, Tekstil blok evleri ve Usonian evleri) gruplamışlardır. Hem grup içinde hem de gruplar arasında binaların plan ve cephelerinden elde edilen fraktal değerleri karşılaştırmışlardır. Çalışmada öncelikle plan ve cephelerdeki fraktal boyut farklılıklarını vurgulamışlardır. Ayrıca Prairie ve Usonian evlerinde analiz sonuçlarının mimarın tarzını oluşturan biçimsel uyumluluğu yansıttığı ancak bu durumun Tekstil blok evlerinde gerçekleşmediği sonucuna ulaşmışlardır. Bundan başka [Ediz ve Ostwald \(2012\)](#), literatürde Sinan'ın tasarımlarındaki süsleme yaklaşımını sayısal olarak sınamak amacıyla, Süleymaniye Camii'nin cepheleri üzerinden bir fraktal analiz yapmışlardır. Analizler; kitle hareketleri, kitle-süsleme ve kitle-süsleme-malzeme olmak üzere üç aşamalı olmuştur. Çalışmalarıyla daha önceki araştırmacıların Sinan ve eserlerinde bütün görsel kompozisyonda süslemenin geri planda kaldığı, strüktürel form düzenlemelerinin ise temel görsel belirleyici olduğu önermesini teyit etmişlerdir. [Kartal \(2022\)](#), Lefkoşa Suriçi'nin geleneksel dokusunu en iyi yansıtan Arabahmet mahallesinde belirlenen sokak ve tekil konutları üç boyutlu fraktal analiz yöntemi ile incelemiştir. Çalışmasında altı sokağı ve bu sokaklardan seçilen on dokuz tekil konutu değerlendirmiştir. Sokaktaki konutları bir bütün olarak değerlendirip modelledikten sonra temeli küp sayım yöntemine dayanan üç boyutlu fraktal analiz yöntemi ile fraktal boyut hesaplamalarını yapmıştır. Ulaştığı fraktal analiz sonuçları ile hem sokakların kendi içinde değerlendirmesini hem de birbiri ile karşılaştırmasını yapmıştır. Buna göre karmaşıklık derecesi yüksek çıkan sokakların fraktal boyut değerlerinin birbirine yakınlık gösterdiğini fark etmiştir. Bu yakın değerlere bağlı olarak aynı mahallede bulunan farklı sokakların, mekânsal ve kütleli olarak birbiriyle tutarlı oldukları sonucuna ulaşmıştır.

Görüldüğü üzere kutu sayma yöntemi, mimari yapıtlardaki dokusal değişimlerin, farklılıkların ya da ortaklıkların belirlenmesinde ve kıyaslanmasında çoğunlukla iki boyutlu olarak, plan ve cephe veya detay analizlerinde parçalı bir şekilde kullanılmıştır. Yalnız bu yöntemin üç boyutlu uygulamaları çok azdır ve sadece son örnekte yer almaktadır. Bununla birlikte yapıların kentsel ölçekte kütleli hareketliliği, bütüncül değerlendirmeleri açısından, yöntemin üç boyutlu uygulamaları ile ölçülebilir. Bundan dolayı kentsel doku uyumunun nesnel ölçülebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada üç boyutlu fraktal analiz yaklaşımı yöntem olarak seçilmiştir.

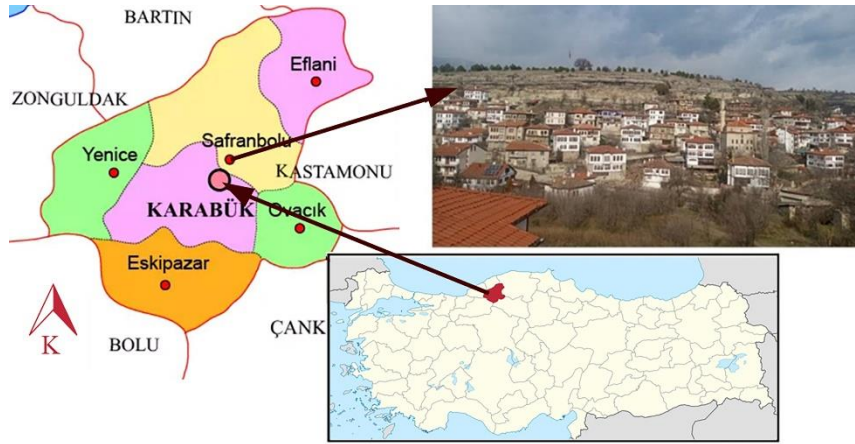
3. Materyal ve yöntem

3. Material and method

3.1. Materyal

3.1.1. Material

Karadeniz Bölgesi'nin batısında yer alan Safranbolu; kuzeyde Bartın, kuzeydoğu ve doğuda Kastamonu, güneydoğuda Çankırı, güneybatıda Bolu, batıda ise Zonguldak illeriyle çevrelenen Karabük iline bağlı bir ilçedir (Karabük Belediyesi, t.y.). Tarihsel ve kültürel değerlerini koruyan ender yerleşimlerden biri olan Safranbolu'nun yerleşim tarihi de çok eskilere dayanmaktadır (Hacısalıhoğlu, 1995). Safranbolu tarih boyunca çok sık yönetim değiştirmiştir. 1423'te Osmanlı imparatorluğu döneminde Padişah II. Murad'la birlikte, bölgede hakimiyet sağlanmıştır. Bu süreçte Safranbolu; önce kaza olarak Bolu sancağına, sonra 1870 yılında Osmanlı'da idari yapıda yeni düzenlemeler yapılarak, Kastamonu sancağına bağlanmıştır. Cumhuriyet döneminde ise Safranbolu, 1927 yılında Zonguldak iline dahil edilmiştir.



Şekil 1. Safranbolu'nun konumu ve genel görünümü
Figure 1. Location and general view of Safranbolu

Türkiye'de Karabük bölgesinde 1937 yılında ilk demir-çelik fabrikası kurulmuş ve buna bağlı olarak Karabük hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir. Önceleri köy olan bu yerleşim mekânı, sonrasında ilçe ve 1995 yılında da il statüsü kazanmıştır. Safranbolu da bu zamanda komşu olduğu Karabük'e bağlanmıştır (Şekil 1) (Safranbolu Kaymakamlığı, t.y.).

Geleneksel Türk toplum yaşantısının mimari özelliklerini yansıtan Safranbolu tarihi geçmişini ve kültürel mirasını kentsel dokusu içinde başarılı bir şekilde koruyan örnek bir şehirdir. Kentin genel yapısı Osmanlı dönemini yansıtırken günümüze aktarılan tarihi doku daha çok 18. ve 19. yüzyıl geleneksel Türk kent izlerini taşımaktadır (Koçan & Çorbacı, 2012). Kentin genel yapısı içinde iki farklı özellik gösteren yerleşme alanı dikkat çekmektedir. Bir yanda Geleneksel Türk şehir özelliklerini yansıtan eski Safranbolu yer alırken diğer yanda ise Cumhuriyet sonrası gelişen yeni yerleşim alanları bulunmaktadır. Eski Safranbolu, Gümüş ve Akçasu derelerinin birleşmesiyle oluşan tabakhane deresinin oluşturduğu derin ve dik yamaçların meydana getirdiği vadi içinde yer almaktadır. Bu alandaki yerleşme vadinin topografyasına bağlı olarak gelişmiştir. Eğimin fazla olduğu yerlerde seyrek bir yapılaşma dokusu görülürken eğimin azaldığı alanlarda ise yerleşme dokusunun sıklaştığı görülmektedir. Arazinin topografyasına göre şekillenen yapıların ön ve arka cephelerinde bir yükseklik farkı bulunmaktadır (Hacısalıhoğlu, 1995).

Eski yerleşim alanlarında konutlar sosyal sınıf farklılaşmasından uzak biçim ve simetri kaygısı olmadan büyük bir çeşitlilik göstermektedir. İçeride dönük bir yapısı olan konutların sokakla bütünleşmesi çıkma ve pencereler ile sağlanmaktadır. Konutların manzaraya yönelme ve topografyaya göre şekillenmesi sokaklara büyük bir hareketlilik kazandırmıştır (Aktüre & Şenyapılı, 1976). Genellikle ayırık düzende ve bahçeleri olan evlerin zemin katları taş duvar, üst katları ise ahşap karkas olarak inşa edilmiştir. Arsa sınırlarına göre şekillenen konutların zemin katları tamamıyla dışa kapalıdır. Yaşam alanları üst katta yer alan konutlar genellikle zemin üzerine bir ya da iki kat olarak inşa edilmektedir. Bunların dışında nadiren zemin üstüne üç kat olarak inşa

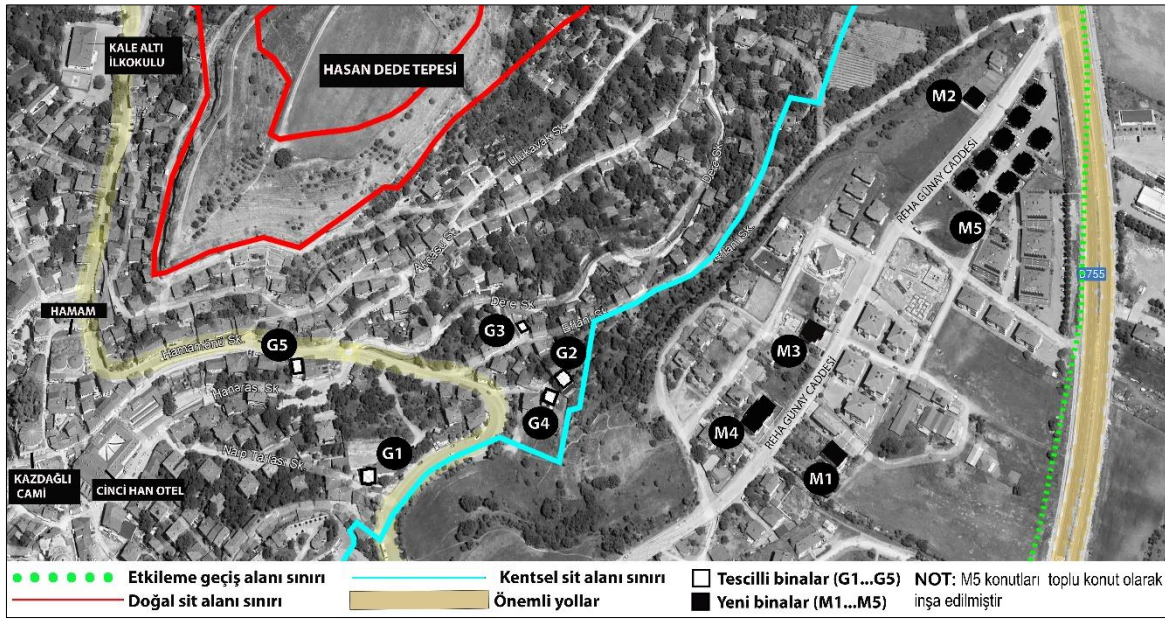
edilen konutlarda bulunmaktadır. Bu konutların çatıları genellikle dört yöne eğimli kırma çatıdır (Bayazıt, 2014).

Safranbolu'nun 1994 yılında UNESCO Dünya Kültür Mirası Listesi'ne girmesiyle birlikte, ilçede yeni bir koruma ve yapılaşma süreci başlamıştır. Bu süreçte ilk olarak günümüzde eski çarşı olarak bilinen tarihi Safranbolu koruma altına alınmıştır. Bu karar ile yerli ve yabancı turistlerin ilgisini çeken kent, uluslararası düzeyde bir turizm kentine dönüşmüştür. Kente gelen turistler sayesinde ekonomik gelir yükselişine bağlı olarak kentte restorasyon çalışmalarına ivme kazandırılarak özgün mimari doku korunabilmiştir. Kentte geleneksel mimariye bağlılık 2000'li yıllardan sonra artarak yeni yapılarda da belirgin bir şekilde görülmeye başlanmış, birçok geleneksel mimari özellik yeni yapılara da taşınmıştır. Geleneksel dokunun etkisi ile ortaya çıkan yeni yapılaşma tipleri özellikle Eski Çarşı, Kıranköy, Bağlarbaşı, Aşağı tokatlı mahallelerine yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır (Oral, 2019). Geleneksel mimari özelliklerin taşındığı bina tiplerinden bazıları şekil'2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çimkent apartmanı ve Akçasu evleri
Figure 2. Çimkent apartment and Akçasu houses

Tarihi çevre içinde yer alan eski yapı örnekleri ve etkileşimli geçiş alanında bulunan yeni yapı örnekleri bu çalışmanın verilerini oluşturmaktadır. Buna göre, çalışmada Safranbolu'nun belirli bir mahallesinde (Babasultan Mah.) yer alan ve birbirlerine yakın olan (aynı bölgede) eski ve yeni konut tiplerinin seçilmesine özen gösterilmiştir. Aynı zamanda seçilen binaların kütleli olarak birbirlerine yakın boyutlarda olmalarına dikkat edilmiştir. Çalışmada öncelikle kapsamlı literatür araştırması yapılarak konuyla ilgili verilere ulaşılmıştır. Proje müelliflerinden gerekli izinler alınarak, yapıların mimari çizimleri temin edilmiştir. Ayrıca yerinde gözlem tekniği ile çalışma alanının ve yapıların fotoğrafları çekilmiştir. Çalışmada incelenecek 10 adet konut belirlenmiştir. Bunların yarısını geleneksel konut türleri, diğer yarısını da modern konut tipleri oluşturmuştur. Seçilen yeni yapıların, etkileşimli geçiş alanı içinde yer almasına özen gösterilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. İncelenen geleneksel ve modern konutların konumları
Figure 3. Locations of the examined traditional and modern houses

3.2. Yöntem

3.2 Method

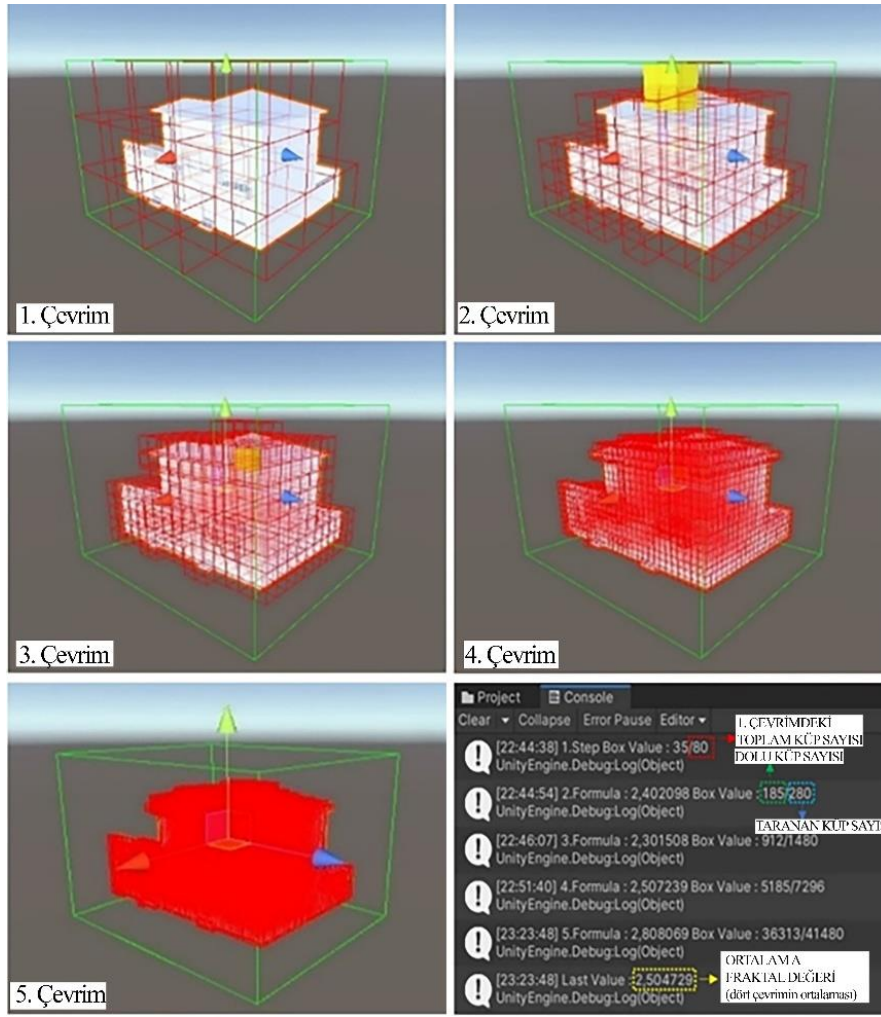
Çalışmada seçilen yapıların değerlendirilmesinde kullanılan yöntem fraktal boyut hesaplama türlerinden üç boyutlu küp sayımıdır. Bu yöntemin aşamaları şu şekilde sıralanabilir (Kartal & İnceoğlu, 2023):

- Hazırlık aşaması
 - İncelenen binalarının üç boyutlu modellerinin oluşturulması.
- Analiz aşaması
 - Binaların hacimlerinin uzayda kapladığı sınırların çerçevesini belirleyen üç boyutlu sınırlayıcı bir küp/kutu tanımlamak.
 - Başlangıç küp sayısını belirlemek (*sınırlayıcı kutu/küp kendi uzamında bu sayıya göre daha küçük küplere bölünür*)
 - Tekrarlama sayısını belirlemek (*Her tekrarda mevcut küpler daha küçük küplere bölünür*)
 - Küpleri Ölçekleme katsayısını tanımlamak (*Mevcut küplerin her birinin sınırları içinde üretilen daha küçük küplerin sayısının belirleme (2^n)*)
 - Hesaplamak: Tanımlanan bilgilere göre aşağıdaki formülle fraktal boyut hesaplanır.

$$D = \frac{\log N_{S_2} - \log N_{S_1}}{\log \frac{1}{S_2} - \log \frac{1}{S_1}} \quad (1)$$

Bu formülde N_{S_2} ve N_{S_1} çevrimlerde incelenen modelin ayrıntısını içeren küp sayılarını; $1/S_2$ ve $1/S_1$ ise çevrimlerdeki x yönünde tabanda yer alan toplam küp sayısını ifade eder.)

- Değerlendirme aşaması
 - Her bir tekrarlama elde edilen fraktal boyut değerlerin ortalaması alınarak her bir binanın fraktal boyutu hesaplanır (Şekil 4).



Şekil 4. Örnek bir binada üç boyutlu fraktal analiz sürecinin gösterimi (Kartal, 2022).

Figure 4. Illustration of the three-dimensional fractal analysis process on a sample building (Kartal, 2022).

4. Bulgular ve tartışma

4. Results and discussion

İlk olarak, fraktal analiz öncesi seçilen binalarla ilgili genel izlenimler Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Bu tablolarda, yeni yapılarla ilgili genel olarak, binaların bazıları hem boyutsal olarak hem de kullanılan malzeme ve cephe düzeni bakımından öykünmeye işaret edilmiştir (Ev3, Ev4, Ev 5). Diğerlerinde ise cephe düzeninde sade yaklaşımıyla nötrleştirme yönteminin kullanıldığı (Ev1 ve Ev2) gözlemlenmiştir. Eski yapıların hemen hemen hepsi kareye yakın formdadır, yükseklikleri ise genel olarak aynıdır. Dört ev dışında diğer evlerin üst katlarında çıkma vardır. Kaplama malzemeleri ve düzeni de diğer Safranbolu konutları gibidir; alt katlar taş malzemedir, üst katlar ise ahşap karkas ve sıvalıdır.

Tablo 2. Tarihi konutların karakteristik özellikleri**Table 2.** Characteristics of historical houses

Bina ile ilgili açıklamalar	Bina görseli ve künyesi
<p>Konut: Ev1</p> <p>Yapı zemin+2 kattan oluşmaktadır. Zemin kat duvarları moloz taş kullanılarak inşa edilmiştir. Üst katlar ise ahşap çatki arası kerpiç dolgu tekniği ile inşa edilmiştir. Yapının ön ve arka cephesinde ahşap çift kanatlı kapısı bulunmaktadır. Odaların cephelerindeki pencereler ikişerli ve üçerli olup bazı odaların cephelerinde ise dört pencere bulunmaktadır. Oda pencereleri çıkmalarda bulunanlar hariç dikdörtgen formda olup ahşap çift kanatlıdır. Ayrıca pencerelerin ahşap korkulukları bulunmaktadır. Çıkmalarda pencereler ise farklı formdadır. Yapının arka cephesinde az da olsa oda çıkması bulunmaktadır. Bunun dışında sol yan cephede son katta bir çıkma bulunmaktadır. Bunun dışında asıl çıkma sağ yan cephede olup manzaraya yönelmiştir. Bu çıkmanın çatısında üçgen alınlık yer almaktadır. Ahşap kat silmeleri, cepheleri çevrelemektedir. Kıрма çatısı alaturka kiremit ile kaplıdır.</p>	<p>Proje sahibi: Akif İlke Ada/parsel no: 379/30</p> 
<p>Konut: Ev2</p> <p>Yapı zemin kat+asma kat+2 üst kattan oluşmaktadır. Bu yapının zemin katı ve asma katı moloz taştan inşa edilmiştir. Üst katları ise ahşap karkas arası dolgu malzemesi olarak bazı bölgelerde taş kullanılırken bazı bölgelerde ise kerpiç kullanılmıştır. Taş ve kerpiç dolgu üzeri sıva ile kaplanarak boyanmıştır. Yapının üç cephesinde çıkma bulunmaktadır. Bunlardan batı ve doğu cephesinde bulunan çıkma dikdörtgen formlu iken kuzey cephesinde bulunan farklı bir formdadır. Batı cephesindeki çıkma manzaraya hâkim olduğu için pencere sayısı daha fazladır. Odaların cephelerinde sıralı şekilde ikişerli ve üçerli pencereler bulunmaktadır. Bu pencereler ahşap ve çift kapalıdır. Ayrıca pencerelerin ahşap korkulukları bulunmaktadır. Yapının üst kat cepheleri yatayda ve dikeyde oluşturulan ahşap kat silmeleriyle çevrelenmiştir. Kıрма çatısı alaturka kiremitle kaplıdır.</p>	<p>Proje sahibi: Mustafa Çevik Ada/parsel no: 575/5</p> 

Tablo 2. Devamı
Table 2. Continuing

Bina ile ilgili açıklamalar	Bina görseli ve künyesi	
<p>Konut: Ev3</p> <p>Günümüzde otel olarak kullanılan yapı zemin+2 kattan oluşmaktadır. Yapının zemin katı moloz taştan inşa edilmiştir. Üst katlar ise ahşap çatkı arası kerpiç dolgu tekniği ile inşa edilerek cephe yüzeyleri sıva+boya ile tamamlanmıştır. Zemin kat dışı kapalı olup üst katlar ise yaşama katlarıdır. Yapı arsa sınırlarına göre şekillenmiş olup dörtgen bir yapıya sahiptir. Üst kat cepheleri yatayda ve dikeyde oluşturulan ahşap kat silmeleriyle çevrelenmiştir. Yapının çıkması bulunmamaktadır. Oda cephelerinde sıralı şekilde ikişerli ve üçerli pencereler bulunmaktadır. Pencereler dikdörtgen formda olup ahşaptır. Pencerelerin ahşap kapağı ve korkulukları vardır. Ayrıca yapının kapısı ahşap ve çift kanatlıdır. Kıрма çatısı alaturka kiremitle kaplıdır.</p>	Proje sahibi: Ergün Avcı	Ada/parsel no: 385/14
		
<p>Konut: Ev4</p> <p>Yapı zemin+asma kat+2 üst kattan oluşmaktadır. Yapı dışardan 4 katlı gibi algılansa da aslında 3 katlıdır. Bu da yapının zemin katına asma katın dahil olmasından kaynaklanmaktadır. Yapının zemin katı moloz taştan inşa edilirken asma katı ve üst katları ise ahşap çatkı arası kerpiç dolgu yöntemi ile inşa edilmiştir. Ahşap karkas arası kerpiç dolgunun olduğu katlar dikeyde ve yatayda kullanılan ahşap kat silmeleri ile çevrelenmiştir. Yapının üç cephesinde çıkması bulunmaktadır. Bunlardan sol yan cephede bulunan çıkma ahşaptır. Bu çıkma lavabo olarak kullanıldığı için küçük pencerelere sahiptir. Ön cephede ve sağ yan cephede bulunan çıkma ise ahşap çatkı arası kerpiç dolgu tekniği ile yapılmıştır. Bu iki çıkmada hem dikdörtgen formlu pencere hem de kemerli ahşap pencereler bulunmaktadır. Odaların cephelerinde ikili pencereler kullanılmıştır. Bu pencereler dikdörtgen formlu ve ahşap kapaklıdır. Ayrıca pencerelerin ahşap korkulukları bulunmaktadır. Evin kıрма çatısı alaturka kiremitle kaplıdır.</p>	Proje sahibi: -	Ada/parsel no: 575/4
		
<p>Konut: Ev5</p> <p>Yan parseldeki bina ile bitişik nizamda olan konut 3 katlıdır. Yapının zemin katı moloz taştan inşa edilmiştir. Ayrıca konutun kuzey cephesinin zemin katında moloz taş kullanılmıştır. Kuzey cephesinin 1. Katında iki adet çıkma bulunup bu çıkmaların bütün yüzeylerinde ahşap kapaklı pencereler bulunmaktadır. Bu çıkmaların sokak cephesinde bulunması sokağa göre şekillendiğini göstermektedir. Ayrıca bütün cepheler içinde kütsel olarak en hareketli cephe bu cephedir. Oda cepheleri ikili ve üçlü pencerelerden oluşmaktadır. Bu pencereler ahşap kapaklıdır. Yatayda ve dikeyde oluşturulan ahşap silmeler cepheleri çevrelemektedir. Yapının zemin katında kuzey ve batı cephesinde çift kanatlı ahşap kapıları bulunmaktadır. Kıрма çatısı alaturka kiremitle kaplıdır.</p>	Proje sahibi: A. Uluçam	Ada/parsel no: 380/6
		

Tablo 3. Modern konutların karakteristik özellikleri
Table 3. Characteristics of modern houses

Bina ile ilgili açıklamalar	Bina görseli ve künyesi
<p>Konut: Ev1</p> <p>Ramazan Çetin evi bodrum, zemin ve 1 kat olmak üzere toplam üç katlı betonarme iskeletli bir apartman binasıdır. Saçaklı, (oluklu kiremitli) kırma çatıya sahiptir. Ön (yol) ve arka cephelerde açık balkonlar bulunur. Bunlar parapet duvarla çevrenir. Bunların bazıları cam balkona dönüşmüştür. Sağ yan cephede kapalı çıkma biçiminde farklı tipte balkonlar vardır. Dikdörtgen formlu binanın kütlelerinde, açık ve kapalı çıkmalı balkonlar dışında, kademeli bir hareketlilik görülür. Ön ve arka cephede kot farkı mevcuttur. Binanın yan cephelerinde giriş ve teraslara çıkış noktaları yer alır. Pencere boşluklarının boyutları ve dizilimi geleneksel konutlardakilerle benzerlik gösterir. Pencere çerçeveleri PVC malzemelidir. Yatay kat silmeleri uygulanmıştır. Balkon ve çıkmalarda farklı dış cephe boyası (kahverengi) kullanılmıştır.</p> <p>Konut: Ev2</p> <p>Günümüz yapı malzemeleri ile inşa edilen betonarme iskeletli tekil konut binası bodrum kat ve zemin kat olmak üzere iki kattan oluşmaktadır. Reha Günay Caddesi'nden yüksek kotta ulaşılan bina kırma çatılıdır. Her yönden çıkma yapan yüksek bir çatı alınlığına sahiptir. Ayrıca yol cephesinde ve arka cephede tarihi alana bakan birer balkon çıkması yer alır. Balkonların olduğu bölümlerde ana kütlede geri çekilmeler vardır. Ön cephedeki balkon sonradan cam balkona dönüşmüştür. Binada yükseklik ve kütle hareketleriyle geleneksel çevreyle uyum arama vardır. Süsleme yoktur. Cephelerde, yüzey oranlarına göre az sayıda kare biçime yakın pencere boşlukları bulunmaktadır.</p>	<p>Proje sahibi: - Ada/parsel no: 1520/58</p>  <p>Proje sahibi:- Ada/parsel no: 679/5</p>  <p>Proje sahibi: - Ada/parsel no: 574/30</p> 
<p>Konut: Ev3</p> <p>Reha güney caddesi üzerinde bulunan bir diğer yapı bodrum+zemin+1. Kattan oluşmaktadır. Yapının bodrum katı depo olarak zemin katı ise dükkân olarak kullanılmaktadır. Zemin kat dükkân olarak tasarlandığı için geniş açıklıkları bulunmaktadır. Bu açıklıklar iki cephede geniş pencereler ile donatılmıştır. Üst kat girişi arka cephede olup kapı üstüne küçük bir sundurma eklenmiştir. Yapının balkon ve oda çıkmaları kütleli hareketliliği en iyi gösteren bölgeleridir. Ayrıca merdiven kulesi de gerek bina cephesinde gerek ise çatıda yarattığı çıkmalar ile kütleli hareketliliği desteklemektedir. Bunların dışında yapının sahip olduğu çıkma ve balkonların yarattığı kütleli hareketlilik çatı formunu da etkilemiştir. Geniş saçaklara sahip olan yapı kırma çatıya sahip olup alaturka kiremit ile kaplıdır.</p>	

Tablo 3. Devamı
Table 3. Continuing

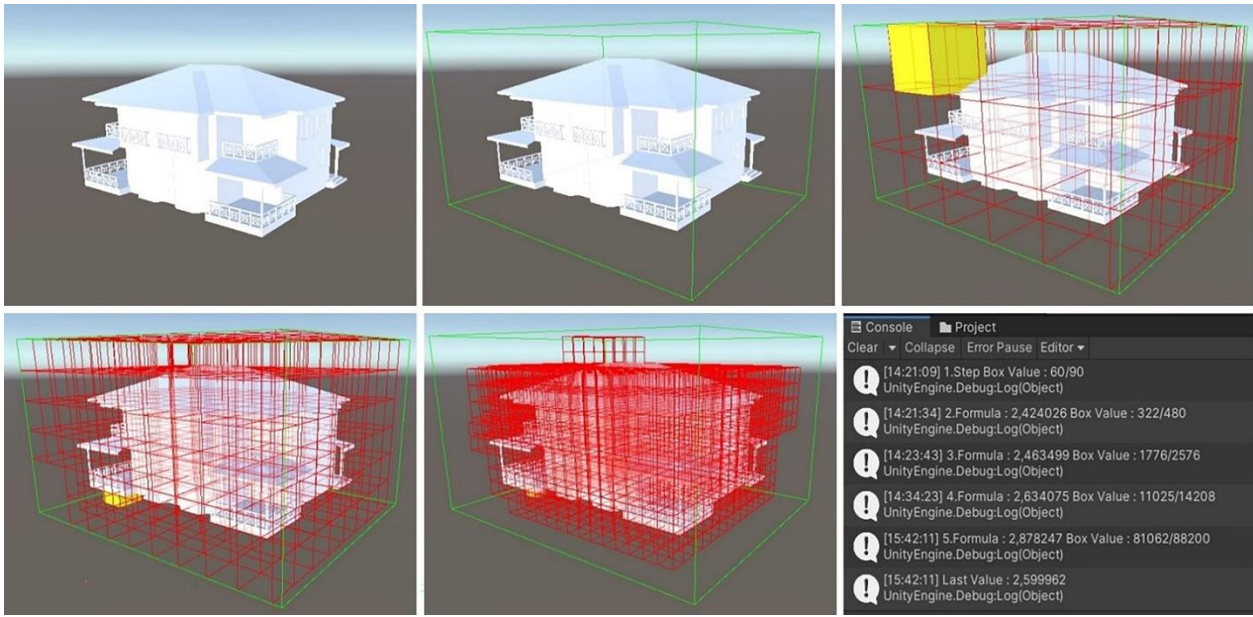
Bina ile ilgili açıklamalar	Bina görseli ve künyesi	
<p>Konut: Ev4</p> <p>Yapı bodrum+zemin+1. Kattan oluşmaktadır. İki ve betonarme olan bu yapı geleneksel ve modern mimarlığın birlikteliğini yansıtmaktadır. Yapıda kullanılan üçgen alınlıklı ve ahşap görünümlü çıkmalar, çıkmaları destekleyen payandalar, ahşap görünümlü pencere ve pervazlar, kırma çatısını kaplayan alaturka kiremitleri geleneksel mimari özellikleri yansıtmaktadır. Ayrıca pencerelerin sıralı ikişerli kullanımı, geniş saçaklar, cephelerde kullanılan yatay ve dikey şeritler ve yapı gövdesinde beyaz rengin kullanımı geleneksel mimari özelliklerden etkilendiğini göstermektedir. Birçok geleneksel mimari özelliği yansıtan yapının geleneksel Safranbolu evlerinden farklı olan yönü ise kullanılan çağdaş malzemelerdir.</p>	<p>Proje sahibi: -</p>	<p>Ada/parsel no: 577/46</p>
<p>Konut: Ev5</p> <p>Zemin+ 1. Kat olarak toplamda 2 kattan oluşan Akçasu konakları site halinde planlanıp inşa edilmiştir. Yapının inşasında günümüz yapı malzemelerinden betonun yanı sıra geleneksel yapı malzemesi ahşabın birlikte kullanımı dikkat çekmektedir. Ahşap malzeme yoğun olarak çıkmalarda kullanılmıştır. Bunun dışında çatı saçaklarında, modern balkon korkuluklarında ve sundurmaların taşıyıcı sistemi ve çatısında ahşap kullanılmıştır. Kırma çatıya sahip olan yapı alaturka kiremit ile kaplıdır. Geniş bir çatı saçağına sahip olan yapının çatı alınlıkları da ahşap malzeme ile kaplanmıştır. Üçgen çatı alınlığına sahip olan çıkmalarda sıralı ikişerli dikdörtgen pencereler bulunmaktadır. Gerek kullanılan malzeme gerek ise kullanılan geleneksel mimari öğelerin kullanımı ile geleneksel ile modernin birlikteliğini en iyi yansıtan konut örneklerinden biridir.</p>	<p>Proje sahibi: -</p>	<p>Ada/parsel no: 371/71</p>



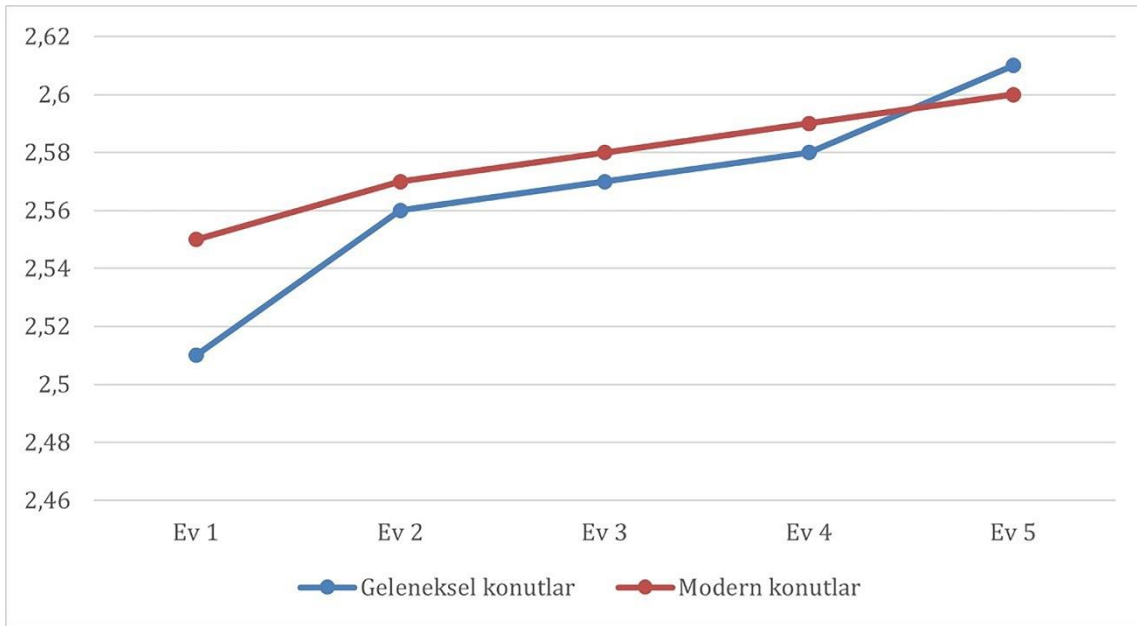
Örneklem alanında incelen Akçasu konaklarının (Ev5) üç boyutlu fraktal analiz sürecinden görünüm Şekil 5'te gösterilmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3'te karakteristik mimari özelliklerinden bahsedilen geleneksel ve modern konutların üç boyutlu fraktal analiz sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Bu tabloda her konut için ayrı ayrı fraktal boyut hesaplamaları gösterilmiştir. Ayrıca geleneksel ve modern konutların kendi içindeki fraktal boyut farkları hem değer olarak hem de yüzdelik olarak verilmiştir. Son olarak da her konut için ayrı ayrı hesaplanan fraktal boyut değerlerinin ortalaması alınarak beş ev için genel bir ortalama değer elde edilmiştir. Geleneksel ve modern konutların fraktal boyut değerleri ayrıca Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 4. Geleneksel ve modern konutların fraktal boyut ilişkisi
Table 4. The fractal dimension relationship of traditional and modern houses

Geleneksel/modern konutlar	Ev1	Ev2	Ev3	Ev4	Ev5	Fark	%	Beş evin ortalaması
Geleneksel konutların fraktal boyutları	2.51	2.56	2.57	2.58	2.61	0.10	% 10	2.57
Modern konutların fraktal boyutları	2.55	2.57	2.58	2.59	2.60	0.05	% 5	2.58
							Fark	0.01
							%	%1



Şekil 5. Akçasu konaklarının üç boyutlu analiz sürecinden görüntümler
Figure 5. Views from the three-dimensional analysis process of Akçasu house



Şekil 6. Geleneksel ve modern konutların fraktal boyutunu gösteren grafik
Figure 6. Graph showing the fractal dimension of traditional and modern houses

Tekil binaların görsel karmaşıklığını sınıflandırmak için [Ostwald ve Vaughan \(2016\)](#) bir değer aralığı belirlemiştir. Bu değer aralığına göre Fraktal boyutu 1.37'nin altında olanlar düşük görsel karmaşıklığa, 1.37 ile 1.51 arasında olanlar orta görsel karmaşıklığa, 1.51'in üzerinde olanlar ise yüksek görsel karmaşıklığa sahiptir. Ancak görsel karmaşıklığı belirlemek için oluşturulan bu değer aralığı fraktal boyutu 1 ile 2 arasında olan iki boyutlu fraktal analiz çalışmaları için oluşturulmuştur. Fraktal analiz çalışmaları ile yapılan değerlendirmelerde 3 boyutlu analiz çalışmaların eksikliği nedeniyle karmaşıklık derecesini sınıflandırmak için bir değer aralığı henüz oluşturulmamıştır. Bu yüzden çalışmada ulaşılan sonuçları değerlendirirken Ostwald ve Vaughan'ın oluşturduğu değer aralığından faydalanılacaktır. Yalnız bu değer aralığı 2 ile 3 arasında yer alacak şekilde oluşturularak üç boyuta uyarlanarak kullanılacaktır. Buna göre fraktal boyutu 2.37'nin altında kalanlar düşük, 2.51'in üstünde kalanlar yüksek, bu iki değer arasında kalanlar ise orta görsel karmaşıklık olarak değerlendirilecektir. Ayrıca yapıların birbirleriyle olan ilişkisi yine [Ostwald ve Vaughan'ın \(2016\)](#) belirlediği tutarlılık derecesi üzerinden yorumlanmıştır. Bu değerlendirmede ise %6.54'ün altında çıkan

sonuçlar yüksek tutarlı, %6.54 ile %15.22 arasında kalan tutarlı ve son olarak da %15.22'nin üzerinde çıkan sonuçlar ise tutarsız olarak belirlenmiştir.

Geleneksel konutlar içinde en yüksek fraktal boyut 2.61 ile Ev2'de hesaplanmıştır. En düşük değer ise 2.51 ile Ev1'de ölçülmüştür. Üç boyutlu fraktal değeri hesaplanan bu beş konut içinde en yüksek değer ile en düşük değere sahip olan konutun arasındaki fraktal boyut farkı 0.10'dur. Bu da fraktal boyut farkının %10 olduğunu göstermektedir. Modern konutlarda ise en yüksek fraktal boyut 2.60 ile Ev1'de ölçülürken en düşük değer ise 2.55 ile Ev5'de hesaplanmıştır. Buradaki fraktal boyut değer aralığı ise 0.05'dir. Bu da beş modern konutun en yüksek fraktal boyutu ile en düşük fraktal boyutu arasındaki farkın %5 olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar göz önüne alındığı zaman geleneksel ve modern konutların üç boyutlu olarak yüksek karmaşıklık seviyesine sahip olduğu görülmektedir. Ulaşılan sonuçlara göre fraktal boyutu en yüksek ve en düşük çıkan konut, geleneksel konutlar içinde yer almaktadır. Geleneksel konutların fraktal boyut farkı 0.10'dur. Bu farkın %6.54 ile %15.22 arasında olması tutarlı bir sonuç ortaya çıkarmaktadır. Modern konutlarda ise fraktal boyut sonuçları arasındaki fark 0.05'dir. Bu oranın %6.54'ün altında olması modern konutların birbirleriyle yüksek tutarlı sonuçlar sergilediğini göstermektedir. Bu sonuçlardan modern konutların fraktal boyutlarının geleneksel konutlara göre birbirine daha yakın ve birbirleriyle daha tutarlı oldukları anlaşılmaktadır.

Ayrıca geleneksel konutların fraktal boyut ortalaması 2.57 iken modern konutların fraktal boyut ortalaması 2,58'dir. Ortalama fraktal boyut farkı ise 0.01'dir. Bu değere göre geleneksel ile modern konutların fraktal boyut ortalaması arasındaki fark 0.01'dir. Geleneksel ve modern konutların ortalama fraktal boyutları arasındaki farkın 0.01 olması, bu iki farklı yaklaşımın birbiri ile etkileşimin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu da yapıların, kütle ve form olarak, birbirine benzerlik gösterdiğine işaret etmektedir.

Son olarak da literatürde yapılan üç boyutlu fraktal analiz çalışmalarına bakıldığında [Kartal \(2022\)](#), Lefkoşa geleneksel dokusunda on dokuz tekil konutu avlulu ve avlusuz olarak değerlendirmiştir. Bu çalışmada konutların on dördü avlusuz olarak incelenmiştir. İncelenen bu konutların fraktal değerleri 2.50 ile 2,69 arasında değişmektedir. Bu on dört konutun fraktal boyut ortalaması 2.60'tır. Safranbolu geleneksel konutlarının fraktal boyut ortalamasının Lefkoşa geleneksel konutlarından daha düşük olduğu görülmektedir. Aradaki fark 0.03 değer aralığındadır. Bu da 0.03'lük bir fraktal boyut farkının olduğunu göstermektedir. Bu değerler iki farklı yerleşimdeki geleneksel konutların fraktal boyutlarının birbirine yakın olduğu göstermektedir.

5. Sonuçlar

5. Conclusions

Tarihi dokusu ile ön plana çıkan Safranbolu kentinde yapılan bu çalışmada, eski ile yeni konutların biçimsel uyumluluğu nicel bir yöntem olan 3 boyutlu fraktal analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında tarihi özelliğe sahip olan konutlar; kentsel sit alanı, modern konutlar ise etkileme geçiş alanı sınırları içinden seçilmiştir. 3 boyutlu fraktal analiz sonuçlarına göre, geleneksel konutların fraktal boyut ortalaması 2.57 modern konutların ise 2,58 olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarından anlaşıldığı üzere aradaki farkın 0.01 olduğu saptanmıştır. Bu bulgular, etkileşimli geçiş alanı sınırları içindeki modern konutlar ile tarihi sit alanındaki konutların fraktal boyut açısından birbirleriyle tutarlı sonuçlar sergilediğini göstermektedir. Modern konutlar her ne kadar başlangıçta sıralanan yaklaşımlar (öykünme, zıtlasma, etkisizleştirme) ile malzeme ve yapım tekniği bakımından gelenekselden farklılık gösterse de fraktal boyut açısından benzerlik göstermektedir. Bu da modern ve geleneksel konutların birbirleriyle etkileşimli, biçimsel olarak da uyumlu olduklarını kanıtlamaktadır.

Bu çalışma, beş geleneksel ve beş modern olmak üzere toplam on konut üzerinden yürütülmüştür. Yapılan bütün hesaplamalar, geleneksel ve modern konutların etkileşimi hakkında ip uçları sunmakla birlikte; hesaplama dahil edilen konut sayısının artırılması ile eski ile yeni konutların uyumu hakkında daha genel sonuçlara ulaşılabileceği saptanmıştır. Gelenekle modernin arasındaki uyumun nicel olarak sorgulandığı bu çalışma, gelecekteki araştırmalara ilham kaynağı olacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda gelecekteki araştırmalar, farklı kültürlerin konutlarının fraktal boyutlarının karşılaştırılması üzerine yapılabilir. Örneğin Safranbolu'da yer alan Geleneksel Türk konutları ile Rum evleri üç boyutlu fraktal analiz yaklaşımı ile karşılaştırılabilir ya da Safranbolu Babasultan mahallesinde yürütülen bu çalışma farklı mahallelerde de

uygulanabilir. Yapılacak böyle bir çalışma farklı mahallelerin fraktal boyut sonuçlarının karşılaştırılması imkânını sağlayacaktır.

Sonuç olarak; literatüre katkı sağlayacağını düşündüğümüz bu çalışmanın, daha fazla konut üzerinde sınanması durumunda, üç boyutlu fraktal analiz hesaplamaları için bir değer aralığı oluşturulabileceği anlaşılmıştır. Bu yöntemin etkileme geçiş alanı sınırlarında yer alan tüm yapılar üzerinde uygulanmasıyla daha açık sonuçlara ulaşılabilir. Böylelikle, tekil konutların 2 ile 3 arasında değişen fraktal boyutlarının düşük ya da yüksek karmaşıklık derecesine sahip olduğu kolayca belirlenebilir.

Teşekkür / Katkı belirtme

Acknowledgement

Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör/editörlere ve hakem/hakemlere ve Mimarlar Elif Hacıoğlu'na, Osman İNCİ'ye ve Begüm CEFAKAR'a teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Makalenin hazırlanması sırasında birinci yazar modelin uygulanması ve sonuçlarının değerlendirilmesi, literatür araştırması ve makale organizasyonu ile mizanpajının hazırlanması; ikinci yazar ise literatür taraması, incelenen bina örnekleriyle ilgili bilgilerin toplanması ve düzenlenmesi, makalenin akışı ile mizanpajının düzenlenmesi aşamalarında katkıda bulunmuştur

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Akbıyık, N. (2013). *Tarihi çevrede yeni yapı olgusu ve bağlam ilişkisinin güncel uygulamalar üzerinden irdelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü].
- Aktüre, S., & Şenyapılı, T. (1976). Safranbolu'da mekânsal yapının gösterdiği nitelikler. *O.D.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2(1), 61-96.
- Arabacıoğlu, F.P., & Aydemir, I. (2007). Tarihi çevrelerde yeniden değerlendirme kavramı. *Megaron*, 2(4), 204-212.
- Arslan, H. D., Orhan, Ş. B., & Dişli, G. (2020). Tarihi çevrede yeni yapı tasarımının müze işlevi özelinde değerlendirilmesi. *Art-e Sanat Dergisi*, 13(25), 71-101. <https://doi.org/10.21602/sduarte.593963>
- Atak Doğan, Ö., & Çağdaş, G. (2017). Karmaşık kentsel oluşumları anlamada fraktaller: Germir. *Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 31(43), 25-44.
- Ateş Can, S., & Uyguralp, Ö. (2022). Tarihi çevrede yeni yapı/ek ve bağlam ilişkisi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 27-39.
- Bahadır, B. (2020). *Tarihi çevre ile yeni yapı etkileşimi üzerinden sürdürülebilirlik*. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Bayazıt, N. (2014). Safranbolu evlerinin plan tipolojisi ve kullanıcı ihtiyaçları hiyerarşisi. *Tasarım+ Kuram*, 10(17), 1-15.

- Büyükmihçı, G., Akşehirlioğlu, A., & Mengüç, K.G. (2019). Tarihi çevrede yeni yapı tasarımında birleşim biçimleri bağlamında modern yaklaşımlar. A. Akdoğan Eker, & A. Dikicioğlu (Ed), *Mühendislik ve Multidisiplinler yaklaşımlar* (ss. 323-351). Güven Plus Grup A.Ş. yayımları, İstanbul
- Çalışkan, E.B., & Karakuş, F. (2022). Study for the traditional houses of the Black Sea Region: implementation of the k-means clustering algorithm. *Gazi University Journal Of Science, Part B: Art, Humanities, Design and Planning*, 10(4), 427-442.
- Demirkol, R.S. (2021). Tarihi çevre koruma bağlamında Kapadokya. *ART/icle: Sanat ve Tasarım Dergisi*, 1(1), 43-63.
- Düzgün, H. (2010). *Tarihi çevrelerde yeni yapı tasarımında kabuk-bağlam ilişkisinin temel ve güncel tasarım kavramları açısından incelenmesi*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Ediz, Ö., & Çağdaş, G. (2005). Mimari tasarımda fraktal kurguya dayalı üretken bir yaklaşım. *İtüdergisi/a, Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 4(1), 71-83.
- Ediz, Ö., & Çağdaş, G. (2007). A computational architectural design model based on fractals. *Open house international*, 32(2), 36-45.
- Ediz, Ö., & Ostwald, M.J. (2012). The Suleymaniye Mosque: a computational fractal analysis of visual complexity and layering in Sinan's masterwork. *ARQ Architectural Research Quarterly*, 16(2), 171-182.
- El-Darwish, I.I. (2019). Fractal design in streetscape: rethinking the visual aesthetics of building elevation composition. *Alexandria Engineering Journal*, 58(3), 957-966.
- Enç, G. (2009). *Tarihi kent dokusunda yeni yapı tasarım ölçütleri ve Fener semti örneğinde uygulanabilirliğinin irdelenmesi*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Güler, Ö. (2004). Tarihi çevrelerde çağdaş bina tasarımı: Ortaköy ve yakın çevresinde yeni bina uygulamalarının değerlendirilmesi. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Hacısalıhoğlu, İ.Y. (1995). Geleneksel Türk şehri: Safranbolu. *Türk Coğrafya Dergisi*. 0(30), 409-434.
- Kanat Duralı, İ. (2007). *Tarihi çevrede yeni yapılaşma uygulamalarının irdelenmesi*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Karabük Belediyesi (t.y.). *Karabük'ün konumu*. https://www.karabuk.bel.tr/icerik.asp?i_id=39
- Kartal, S. (2022). *Kentsel dokunun 3 boyutlu fraktal analiz modeli ile değerlendirilmesi: Lefkoşa örneği*. [Doktora Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kartal, S., & İnceoğlu, M. (2023). Kentsel dokunun 3 boyutlu fraktal analiz modeli ile değerlendirilmesi: Lefkoşa örneği. G. Büyükmihçı, & L. Kaderli (Ed), *Mimarlık: Geçmişten Modernizme* (ss. 311-334). Livre de Lyon. Lyon, France.
- Kılıç, A. (2015). *Tarihi çevrede yeni yapı-yeni ek bağlamında Norman Foster yapıları*. [Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Koçan, N., & Çorbacı, Ö.L. (2012). Tarihi çevreleri koruma sürecinde yeni yaklaşımlar: kongre turizmi, Safranbolu çarşı örneğinde bir araştırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 31-36.
- Lorenz, W.E. (2011). Fractal geometry of architecture. In P. Gruber, D. Bruckner, C. Hellmich, H. B. Stachelberger, & I. C. Gebeshuber (Eds.), *Biomimetics--Materials, Structures and Processes; Examples, Ideas and Case Studies* (pp. 179-200). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lorenz, W.E. (2016). Complexity across scales in the work of Le Corbusier, using box-counting as a method for analysing facades. In *Proceedings of the CAADENCE in Architecture 2016* (pp. 249-255). Faculty of Architecture, Budapest University of Technology and Economics.
- Oral, B. (2019). Geleneksel mimariye öykünme bağlamında günümüz Safranbolu sivil mimarisi. *İnsan ve İnsan*, 6(21), 597-631.

- Ostwald, M.J., & Vaughan, J. (2016). *The fractal dimension of architecture* (Vol. 1). Birkhäuser.
- Safranbolu Kaymakamlığı (t.y.). *Safranbolu tarihçesi*. <http://www.safranbolu.gov.tr/tarihce>
- Tan, B., & Arabacıoğlu, F.P. (2020). Tarihi çevrede mimari tasarım: İstanbul yenileme alanları. *Megaron*, 15(2), 204-216.
- Tanaç Zeren, M. (2010). *Tarihi çevrede yeni ek ve yeni yapı olgusu, çağdaş yaklaşım örnekleri*. İstanbul: Yalın Yayıncılık.
- Temel, S.C., Kuru, R., & Sarıgül, S.S. (2021). Tarihi çevrede eski yeni birlikteliğinin öznel izlenimler üzerinden değerlendirilmesi: Divanyolu Caddesi (Beyazıt-Sirkeci aksı) örneği. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 0(27), 379-405. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1031315>
- Topbaş, D.C., & Arslan, H.D. (2022). Facade evaluation of traditional Mersin and Tarsus houses based on fractal dimension. *GRID Architecture, Planning and Design Journal*, 5(1), 22-52. <https://doi.org/10.37246/grid.903020>
- Vaughan, J., & Ostwald, M.J. (2011). The relationship between the fractal dimension of plans and elevations in the architecture of Frank Lloyd Wright: comparing the Prairie style, textile block and Usonian Periods. *Architecture Science ArS*, 4(Dec), 21-44.
- Velioğlu, A. (1992). *Tarihi çevre içinde mimari tasarım ve süreci üzerine bir araştırma*. [Yayımlanmamış Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Yetiş, R. (2016). *Kentsel sit alanları çevresinde yer alan etkileme geçiş alanlarındaki yeni yapılaşmaların irdelenmesi; Safranbolu örneği*. [Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Zmeškal, O., Veselý, M., Nežádal, M., & Buchniček, M. (2001). Fractal analysis of image structures. *HarFA - Harmonic and Fractal Image Analysis*, 3-5.

The effect of boron amount in the electrolyte on the corrosion properties of Ti45Nb coated by PEO

Elektrolit içerisindeki bor miktarının PEO ile kaplanan Ti45Nb'nin korozyon özelliklerine etkisi

S. Yenal VANGÖLÜ^{1,2,*}, Özgü BAYRAK³

¹Atatürk Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

²University of Leeds, Institute of Functional Surfaces (IFS), Leeds, UK

³Bakırçay Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

• Received: 07.08.2023

• Accepted: 29.09.2023

Abstract

Developing more biocompatible biomaterials with mechanical properties similar to those of cortical bone has long been a challenge for scientists. They are still working on new alloys and coating processes to meet this challenge. Among these biocompatible materials, β -titanium alloys, which will prevent stress-shielding and have a Poisson's ratio very close to the cortical bone, have been attracting the attention of scientists for a long time. In addition to this, the PEO method, which makes it possible to embed ions into the oxide layer, has also come to the fore in recent years as a surface treatment in order to increase the corrosion resistance, wear resistance and biocompatibility of biomaterials and also to provide antibacterial/antimicrobial properties. In this study, Ca and P-containing oxide layers with two different boron content and no boron content were successfully formed on Ti45Nb β -titanium alloy substrate by using the PEO method. Surface characterization and corrosion resistance tests of these layers were carried out. The obtained results were compared with each other and with the uncoated substrate. XRD analysis showed that the coatings are primarily composed of two major polymorphs of TiO_2 , anatase and rutile. Static electrochemical measurements were made in diluted Foetal Bovine Serum (FBS) and hydrogen peroxide added serum. H_2O_2 was added to simulate the inflammatory state in the body. The measurements showed that all the coated samples had lower corrosion current densities compared to the uncoated ones both in serum and H_2O_2 -added serum.

Keywords: Boron, Corrosion, PEO, Ti45Nb

Öz

Kortikal kemiğe benzer mekanik özelliklere sahip daha biyouyumlu biyomalzemeler geliştirmek uzun zamandır bilim adamları için bir zorluk olmuştur. Bu zorluğun üstesinden gelmek için hala yeni alaşımlar ve kaplama süreçleri üzerinde çalışmalar sürmektedir. Bu biyouyumlu malzemeler arasında stres kalkını önleyecek ve kortikal kemiğe çok yakın Poisson oranına sahip β -titanyum alaşımları uzun süredir bilim insanlarının ilgisini çekmektedir. Bunun yanı sıra oksit tabakasına iyon gömmeyi mümkün kılan PEO yöntemi, biyomalzemelerin korozyon direncini, aşınma direncini ve biyouyumluluğunu artırmak aynı zamanda antibakteriyel/antimikrobiyal özellikler sağlamak amacıyla son yıllarda bir yüzey işlemi olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, PEO yöntemi kullanılarak Ti45Nb β -titanyum alaşımlı altlık üzerinde iki farklı bor içeriğine sahip ve bir de bor içermeyen Ca ve P içeren oksit tabakaları başarıyla oluşturulmuştur. Bu tabakaların yüzey karakterizasyonları ve korozyon dayanım testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kendi aralarında ve kaplanmamış numuneler ile karşılaştırılmıştır. XRD analizlerinde kaplamaların temel olarak iki ana TiO_2 polimorfundan, anataz ve rutilden oluştuğu görülmüştür. Seyreltilmiş Fetal Sığır Serumuna (FBS) ve hidrojen peroksit eklenmiş serumda statik elektrokimyasal ölçümler yapılmıştır. H_2O_2 vücuttaki enflamatuar durumu simüle etmek için eklenmiştir. Ölçümler, kaplanmış tüm numunelerin hem serumda hem de H_2O_2 ilaveli serumda kaplanmamış olanlara kıyasla daha düşük korozyon akımı yoğunluklarına sahip olduğunu göstermiştir.

Keywords: Bor, Korozyon, PEO, Ti45Nb

*a S. Yenal Vangözü; yvangolu@atauni.edu.tr

1. Introduction

Nowadays a wide spectrum of materials, which are expected to exhibit specific properties, are used for biomedical applications. The most important properties required from a biomaterial can be said as biocompatibility and corrosion resistance in the order of importance (Elias et al., 2008; Gebert et al., 2016; Long & Rack, 1998; Niinomi, 2003). In terms of biocompatibility and corrosion resistance, titanium alloys are the most attractive among all of the known metallic biomaterials for biomedical applications such as artificial hip and knee joints, bone plates, pacemakers, fracture fixation screws, etc (Niinomi & Boehlert, 2015). Although commercial pure titanium and Ti6Al4V grades are the most widely used metallic biomaterials, the use of β -titanium alloys increased especially in the past two decades. One of the most important motives behind their development is to minimize the stress-shielding effect associated with the relatively high elasticity modulus of α and $\alpha+\beta$ titanium alloys as well as stainless steel and CoCr-based alloys (Chen & Thouas, 2014). A promising and relatively new β -Ti alloy Ti45Nb became prominent with its Young's moduli. The Young's modulus of Ti45Nb is significantly lower compared to both α and $\alpha+\beta$ titanium alloys and it is closer to that of the cortical bone, which reduces the stress-shielding effect commonly associated with other metallic implants (Bai et al., 2016; Ozaki et al., 2004; Valiev et al., 2015). Moreover, according to the scientific literature, it is a fact that Nb, which is known to be unreactive in the body and biocompatible, is beneficial for osteogenesis (Bai et al., 2016; Johansson & Albrektsson, 1991; Matsuno et al., 2001). This means that Ti45Nb implants can better distribute mechanical loads and promote improved bone remodelling and integration. Ti45Nb also has acceptable corrosion resistance, reducing the risk of metallic ion release into the biological system, which is of great importance in terms of ensuring the safety and long-term use of the implant in the body. Ti45Nb is a suitable material for a number of biomedical applications due to its great biocompatibility, advantageous mechanical qualities, and corrosion resistance. It is extensively utilised in the manufacture of orthopaedic implants including hip and knee joint replacements, bone plates, and fracture fixation screws. The aim of using Ti45Nb in biomedical applications is to enhance patient outcomes, mitigate risk and enhance the overall performance and lifespan of the implants.

Nowadays bone implants should acquire not only the above-mentioned features but also some additional properties. For example, it is expected for the new generation of bone implants to have some bioactive agents like growth factors, antibiotics, antibacterial agents, etc. on their surfaces (Yavari et al., 2016). As a result of the corrosion of metallic alloys, the metal ions and particles, which are potentially toxic, can be released into the biological system from the metallic implants (Esfahani et al., 2022). Even though Ti45Nb shows favourable mechanical and corrosion properties, it is expected from these implants in the biomaterials field to exhibit better or enhanced mechanical and corrosion properties in vivo. Surface modification of the implants stands out as one of the most common techniques that can be used to provide these desired properties. Surface modifications have been used as an effective way to form a film layer doped with desired agents and impart protection against the corrosion of metallic implants. Various surface modification techniques such as anodising, plasma spraying, ion implantation, PEO, etc. have been introduced to form such a thin-film layer.

The introduction of boron (B) or boron-doping into the surface of biomaterials has garnered significant interest in the field of biomaterials sciences. Boron, a trace element known to be antibacterial-antifungal, also enhances osseointegration and plays a vital role in bone formation. It is also biocompatible for certain doses (extremely high doses of boron (>20 mg in adults) can be toxic and even lethal). The bactericidal properties of boron make it an attractive option for fighting bacterial infections commonly associated with implantable devices. The research conducted by Sopchenski et al. (2018) revealed that when Cp-Ti samples were doped with a combination of calcium (Ca), phosphorus (P), and boron using PEO, the resulting TiO₂ layer exhibited significant bactericidal effects against *S. aureus* and *P. Aeruginosa*. According to some studies, boron leads to improved bone strength and stability as it promotes calcium mineralization and bone generation. Besides, when used in appropriate amounts, boron on the implant surface is considered to be safe and biocompatible and enhances dental stem cells and osteogenic differentiation, supporting the growth and differentiation of bone marrow stromal cells (Atila et al., 2016; Cheng et al., 2011; Hakki et al., 2010; Taşlı et al., 2013; Vangolu & Kilic, 2022; Ying et al., 2011).

Many researchers have used surface engineering in biomaterials since it was recognised that the surface properties of biomaterials affect the biological response of the host to the implants (Zorn et al., 2005). Surface modifications are now aimed at improving bioactivity, biocompatibility, wear and corrosion resistance, and bactericidal activity. Surface engineering techniques such as plasma spraying, ion implantation, and plasma

electrolytic oxidation have been used to dope biomaterial surfaces with bactericidal elements (boron, silver, copper, etc.) as well as biocompatible and bioactive elements (HA, CaP, etc.). PEO has risen to prominence among these approaches in recent years due to its benefits over other surface modification technologies.

PEO is considered to be a versatile and effective technique for NPs-doping and ionic-doping of elements and surface modification of biomaterials as it has many advantages such as improved coating adhesion, customizable surface properties, enhanced corrosion resistance, increased surface hardness, time and cost efficiency, environmental friendliness and compatibility with complex geometries. A high-voltage electrical discharge is applied to a biomaterial submerged in an electrolyte solution during the PEO process, resulting in a plasma micro-discharge on its surface. Bactericidal and/or bioactive ions or particles can be doped into the resultant oxide layer generated on the biomaterial surface by incorporating bactericidal or bioactive chemicals or particles into the electrolyte.

In this study, different amounts of boron-doped oxide layers were formed on Ti45Nb substrates. The corrosion resistance of these samples in serum and hydrogen peroxide-added serum. Hydrogen peroxide was added to the serum to create the infection conditions. The results were compared with the uncoated substrate. Porous and rough layers containing boron on Ti45Nb substrates were successfully formed using the PEO method.

2. Material and method

2.1. Materials

Commercial wrought Ti45Nb alloy (Grade 36) was used to produce $14 \times 14 \times 3$ mm³ samples. All surfaces were polished using SiC abrasive paper and diamond suspension to the maximum roughness of 80 nm. Then the substrates were cleaned using ethanol and distilled water prior to coating deposition. The electrolyte solution used in the PEO process has consisted of calcium acetate monohydrate ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - Merck), trisodium phosphate dodecahydrate ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ - Merck), disodium tetraborate decahydrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - Merck) and distilled water. The amounts of calcium acetate hydrate and tri-Sodium phosphate dodecahydrate were kept constant while the amount of di-Sodium tetraborate decahydrate was changed in order to evaluate the effect of boron on the coatings. The reagents and the amounts used to prepare the electrolytes for 1000 ml were determined based on our previous studies (Vangolu & Kilic, 2022) and scientific literature (Sopchenski et al., 2018) and are given in Table 1.

Table 1. The reagents and the amounts used to prepare the electrolytes for 1000 ml

Reagents	Electrolyte 1	Electrolyte 2	Electrolyte 3
$\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.06 M	0.06 M	0.06 M
$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0.01 M	0.01 M	0.01 M
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	0.005 M	0.01 M	-

2.2. Method

An AC-pulsed power supply was used in the bipolar mode for plasma electrolytic oxidation. The PEO process was carried out in an electrolytic cell where the stainless-steel bath was used as a counter electrode and the samples served as the anode. The electrolytes were stirred continuously with a stirring speed of 250 rpm. The temperature of the electrolytes was kept constant during the experiments via a circulation pump. Table 2 shows the PEO process parameters that were determined based on past research (Vangolu & Kilic, 2022).

Table 2. PEO process parameters

Process	Frequency (Hz)	Duty cycle (%)	Voltage (V)	Time (min)	Solution stirring speed (rpm)
PEO	300	10	+500 / -100	5	250

2.3. Analysis

2.3.1. Coatings characterisations

Carl Zeiss Sigma 300 scanning electron microscope (SEM) equipped with energy dispersive spectroscopy (EDS) was utilised to analyse and characterise the surface. An incident beam energy of 20 kV was used for both SEM and EDS. A Panalytical Empyrean X-ray diffractometer (XRD) with $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radiation at 45 kV and 40 mA was used in continuous scan mode for the phase analyses. The conventional Bragg-Brentano XRD technique was used in analyses. The measurements were performed from the substrate to the outer layer via distance. The surface roughness of the specimens was evaluated using a MAHR perthometer.

2.3.2. Static corrosion experiments

All electrochemical experiments were performed using a Gamry G750 potentiostat/galvanostat apparatus and a standard three-electrode cell with a platinum electrode as the counter electrode, a saturated Ag/AgCl electrode as the reference electrode, and the samples as the working electrode. The contact area of the samples with the electrolyte was 0.38 cm^2 and the experiments were started after they were immersed in the electrolyte for 7200 seconds to reach the steady state OCP value. The potential data were recorded as a function of time during immersion. The forward scan of the cyclic potentiodynamic polarization studies was performed in the range of -250 mV (vs. OCP) to $+2000 \text{ mV}$ with a scan rate of 1 mV/s . The backward scan was performed from peak to OCP at the same scan rate. The electrochemical impedance spectra were recorded in a frequency range from 10 kHz to 10 MHz . In order to see the effect of polarization experiments on the surface, impedance analysis was performed both before and after polarization. EIS spectra were fitted to experimental data obtained using a suitable equivalent electrical circuit representing the surface conditions. The results are presented normalized by area for comparability with the scientific literature as much as possible. The electrolyte used in corrosion tests was a 25% (v/v) foetal bovine serum (FBS) prepared according to ISO 14242-1 standard. The FBS was diluted by adding phosphate buffer solution (PBS) in order to reach a total protein content which is close to the conditions *in vivo*. Also, sodium azide was added to the solution to retard bacterial growth. For the simulation of inflammatory conditions *in vivo*, hydrogen peroxide (H_2O_2) was supplemented into the serum.

3. Results and discussion

3.1. Structural characterisation

Figure 1 depicts the XRD patterns of the untreated, E1, E2, and E3 samples. Because Ti45Nb is a β titanium alloy, all β -Ti peaks were seen in the patterns as expected. The two primary polymorphs of TiO_2 , rutile and anatase, were found in all treated samples after the oxidation procedure. The rutile and anatase phases were identified using JCPDS 01-087-0710 and JCPDS 01-086-1764 cards, respectively. Despite the fact that the intensity of boron was not noticed in the XRD pictures of the E1 and E2 samples, the scientific literature indicates that it exists in the amorphous TiO_2 layer and sometimes causes a shoulder between $25^\circ - 30^\circ$. Actually, an increase was observed in the rutile phase peaks as the amount of boron in the electrolyte increased. Especially, the rutile peak at 27° increased significantly with increasing boron content. When the XRD graph is examined, decreases in the densities of the peaks achieved from the substrate are observed in the samples subjected to PEO treatment in the boron-containing electrolyte. It can be said that the presence of boron in the structure causes the densities of the peaks measured from the base material to decrease.

Figure 2 shows the surface topography and the EDS analyses of the coated samples. It can be seen from Figure 2 (a, b and c) that the highly porous and rough oxide layer, which are two of the main features of the process, is formed on all surfaces after PEO. The roughness of the layers was measured as 1.693 ± 0.02 , 1.676 ± 0.02 and 1.712 ± 0.02 for E1, E2 and E3 samples respectively. The pores of different dimensions including micro and sub-micro pores, which can mainly be related to frequency and voltage, are homogeneously dispersed over the entire surface. It is known that PEO allows adjusting the pore size and roughness by changing process parameters like voltage, frequency and time (Huang et al., 2005; Wang et al., 2010). Besides a study by Lv et al. (2008) indicated that larger pore diameters and rougher film layers can be obtained with coatings made at lower frequencies. It is obvious that the boron addition (Figure 2a and Figure 2b) had no notable effect on the SEM images of the coated layer.

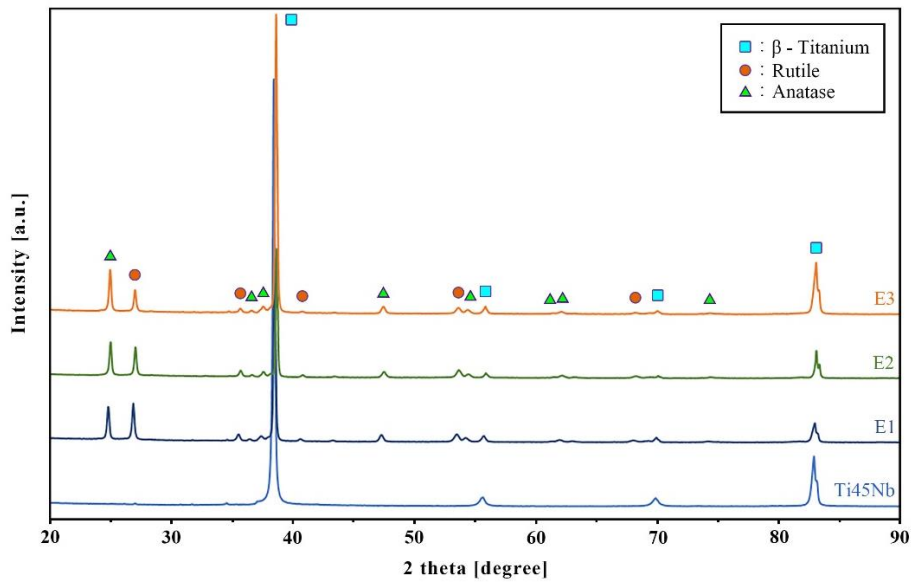


Figure 1. The XRD graphics of untreated, E1, E2, and E3 samples

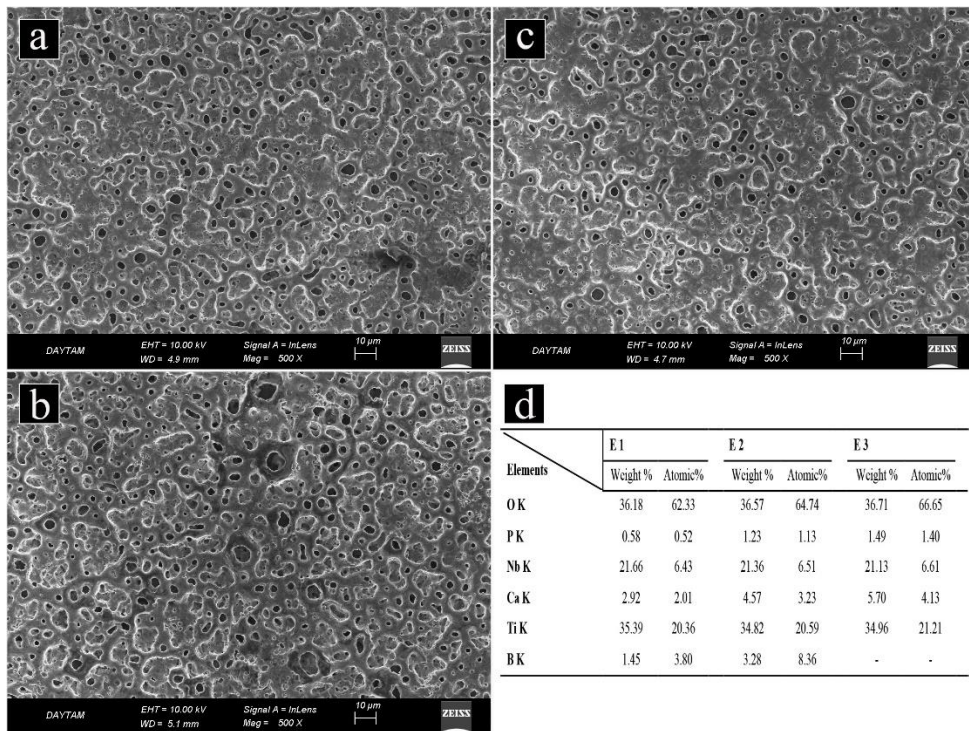


Figure 2. The SEM micrographs of a) E1, b) E2, c) E3 and the EDS results of d) all samples

Although there was no clear peak in XRD analyses regarding the presence of boron in the structure, EDS analyses show that there are certain amounts of boron inside the structure of E1 and E2 samples with atomic ratios of 3.80% and 8.36%, respectively (Figure 2d). According to a scientific study, by optimizing the accelerating voltage boron can be analysed by EDS (Ingemarsson & Halvarsson, 2011). Similarly, Ca and P elements, which are the basis of the electrolytes in this study, were also identified in EDS analyses as expected.

3.2. Corrosion tests

Figure 3 shows the changes in the open circuit potential of the samples in serum. All surface-treated samples had a higher potential than the untreated sample. Under E2 and E3 conditions, the potential values decreased

slightly from the initial values and stabilized, indicating that the activity of the samples increased due to contact with the electrolyte. All treated samples have approximately equal equilibrium potentials.

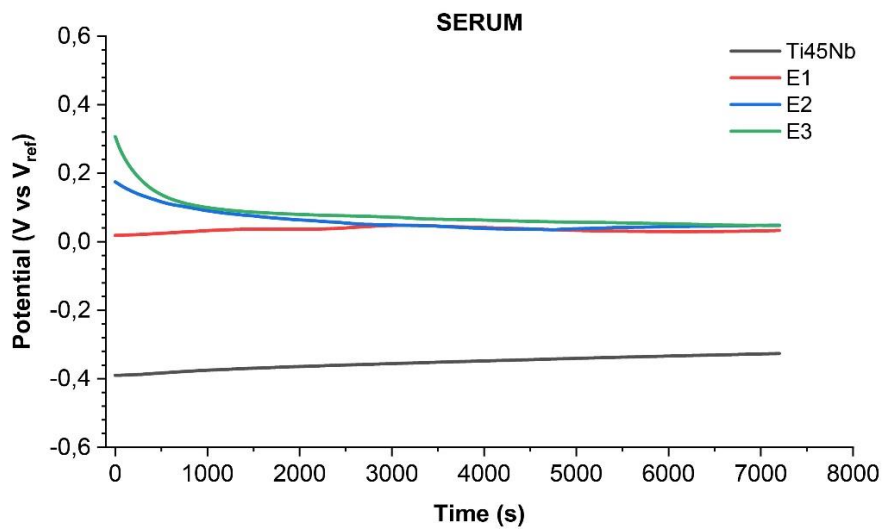


Figure 3. The changes in the open circuit potential of the samples in serum

Open circuit potentials of samples in Serum+H₂O₂ solution are given in Figure 4. In the serum medium to which H₂O₂ was added, the samples exhibited more stable curves. On the other hand, in contrast to the pure serum medium, the treated samples had different values and the equilibrium potential was slightly higher for all samples. Sample E2 had the most inert value.

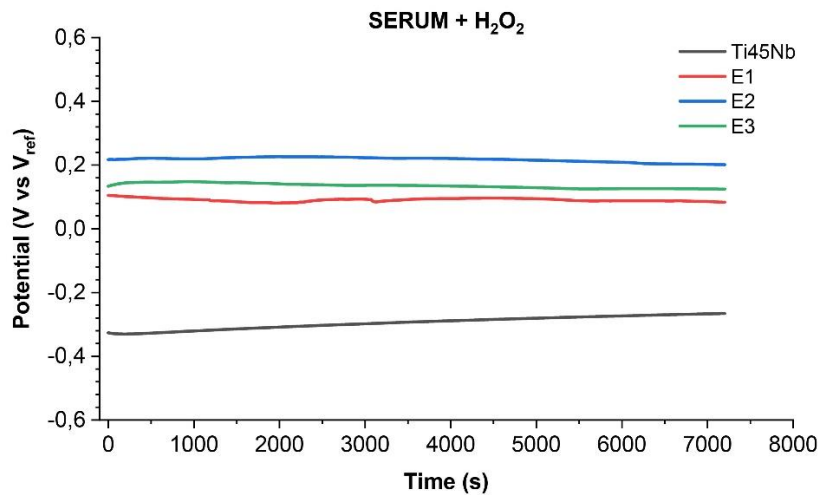


Figure 4. Open circuit potentials of samples in serum+H₂O₂ solution

Cyclic polarization curves in Serum can be seen in Figure 5 and corrosion parameters obtained by Tafel extrapolation are given in Table 3. Although it is noted that the corrosion current density and therefore the corrosion rate of the untreated sample is higher than the other samples, it can be seen that it shows passivation behaviour in the range of approximately 10 mV to 1400 mV, but this behaviour is not a complete passivation due to the slow increase in current density.

As can be seen from Table 3, the beta values of the anodic branch (Beta A) in the curves of the treated specimens were generally quite high. This could be interpreted as diffusion-controlled corrosion. That is, the diffusion of electrochemically active species to the surface was limited due to the surface roughness or, in other words, the stagnation of the solution in the pores. However, no passivation behaviour was observed in the treated samples. Active dissolution continued steadily throughout the experiment, with E2 being slower and E1 being faster. In the reverse scanning curves, the anode-cathode transition was also detected again due to the increase of the open circuit potential due to polarization.

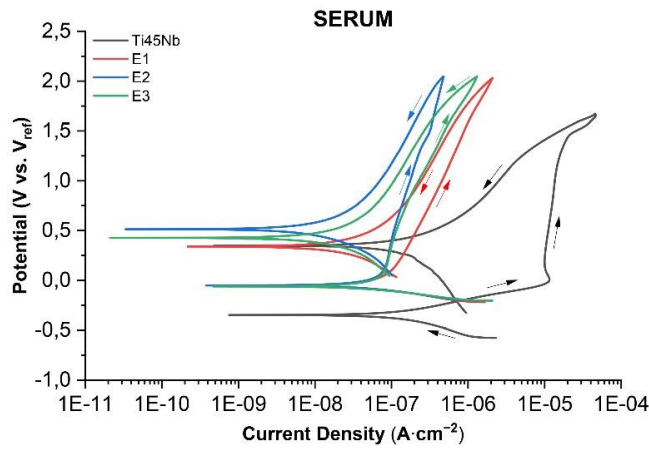


Figure 5. Cyclic polarization curves in serum

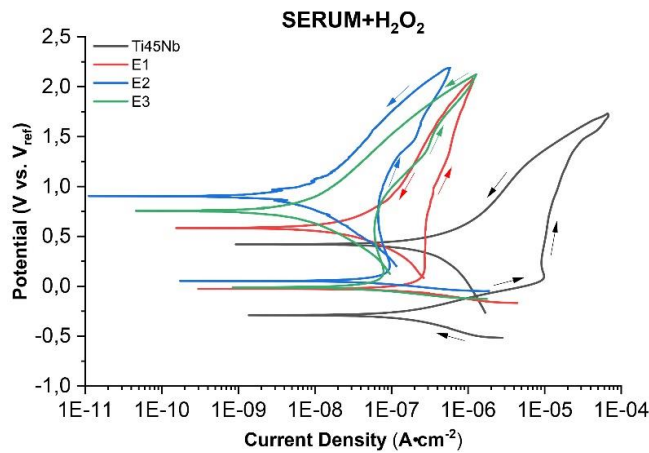


Figure 6. Cyclic polarization curves in H₂O₂-added Serum

Figure 6 shows the cyclic polarization curves in H₂O₂-added serum and Table 3 shows the values obtained by Tafel extrapolation. The untreated sample had an overall higher current density. It exhibited a passivity-like behaviour in the range from 0 to 1500 mV, followed by a trans-passive region. The Tafel regions of the untreated samples were close to each other, and the anodic and cathodic arms were neighbouring. A passive region of approximately 1000 mV was detected in all conditions. This was more pronounced in E2 and E3 conditions. In condition E1, the active dissolution rate after passivity was slightly slower than the others. Anodic beta values were very high in all treated conditions, indicating a diffusion-controlled mechanism.

In none of the samples did the reverse scanning curve intersect the forward scanning curve. Therefore, it could be said that general surface corrosion was present rather than localized corrosion.

Table 3. Tafel coefficients and corrosion parameters

SERUM								
	Ti45Nb		E1		E2		E3	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Beta A (V/decade)	2.26E-01	6.99E-03	2.13E+00	4.47E-01	1.00E+15	0.00E+00	9.06E+00	2.90E+00
Beta C (V/decade)	2.68E-01	2.90E-03	1.71E-01	3.48E-03	1.55E-01	3.09E-04	1.39E-01	9.44E-04
I_{corr} (A·cm⁻²)	1.77E-07	3.86E-09	9.33E-08	3.35E-09	8.84E-08	3.09E-10	8.38E-08	1.02E-09
E_{corr} (mV)	-3.47E+02	0.00E+00	-5.09E+01	0.00E+00	-5.05E+01	0.00E+00	-6.00E+01	0.00E+00
Cor. rate (mpy)	5.58E-02	1.29E-03	2.94E-02	1.96E-03	2.78E-02	1.05E-03	2.64E-02	1.26E-03

Table 3. continues.

SERUM + H ₂ O ₂								
	Ti45Nb		E1		E2		E3	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Beta A (V/decade)	2.57E-01	1.13E-02	6.67E+14	4.71E+14	1.00E+15	0.00E+00	1.00E+15	0.00E+00
Beta C (V/decade)	2.54E-01	1.23E-02	1.51E-01	6.50E-03	1.21E-01	2.32E-03	1.25E-01	1.50E-03
I_{corr} (A·cm⁻²)	2.00E-07	9.42E-09	2.92E-07	2.25E-08	1.09E-07	2.16E-09	8.97E-08	5.00E-11
E_{corr} (mV)	-2.89E+02	0.00E+00	-2.61E+01	3.55E-15	5.33E+01	7.11E-15	-1.06E+01	0.00E+00
Cor. rate (mpy)	6.30E-02	2.96E-03	7.19E-02	7.10E-03	3.43E-02	1.69E-03	2.82E-02	1.12E-03

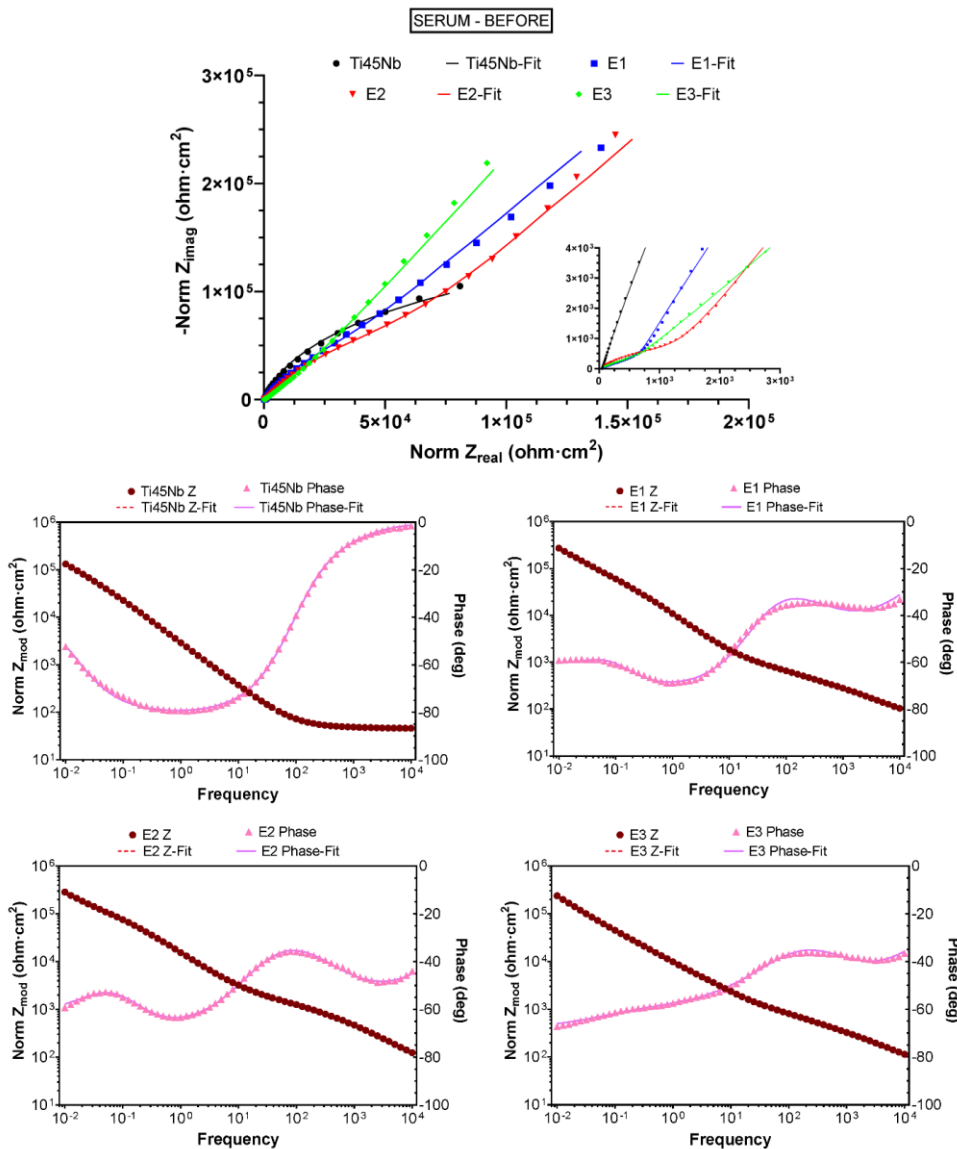
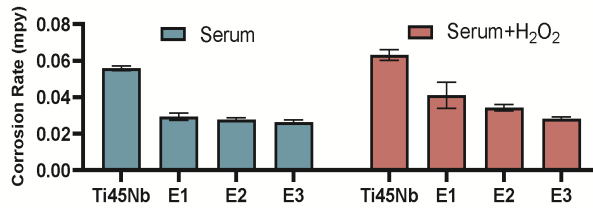


Figure 7. Results obtained from EIS experiments performed on treated and untreated Ti45nb alloy specimens in serum

Results obtained from EIS experiments performed on treated and untreated Ti45Nb alloy specimens in serum are given in Figure 7. As seen in the Bode diagram, the EIS responses of the coatings E1 and E2 showed two distinct time constants, which can be interpreted as the formation of an oxide film consisting of two layers. The first time constant at low frequencies may be associated with a dense and continuous layer in contact with the metal surface, known as the inner layer, and the second time constant (at high frequencies) may be associated with the porous outer layer, formed by the dielectric breakdown of the insulating film. On the other hand, in the case of E3, the second time constant was still present but not very pronounced. It is also noteworthy that while the phase angle of the untreated sample approaches zero at high frequencies, it is around 40 degrees in the surface-treated samples. In addition, the Nyquist diagram showed a linear portion with about 45° angle indicating a diffusion process.

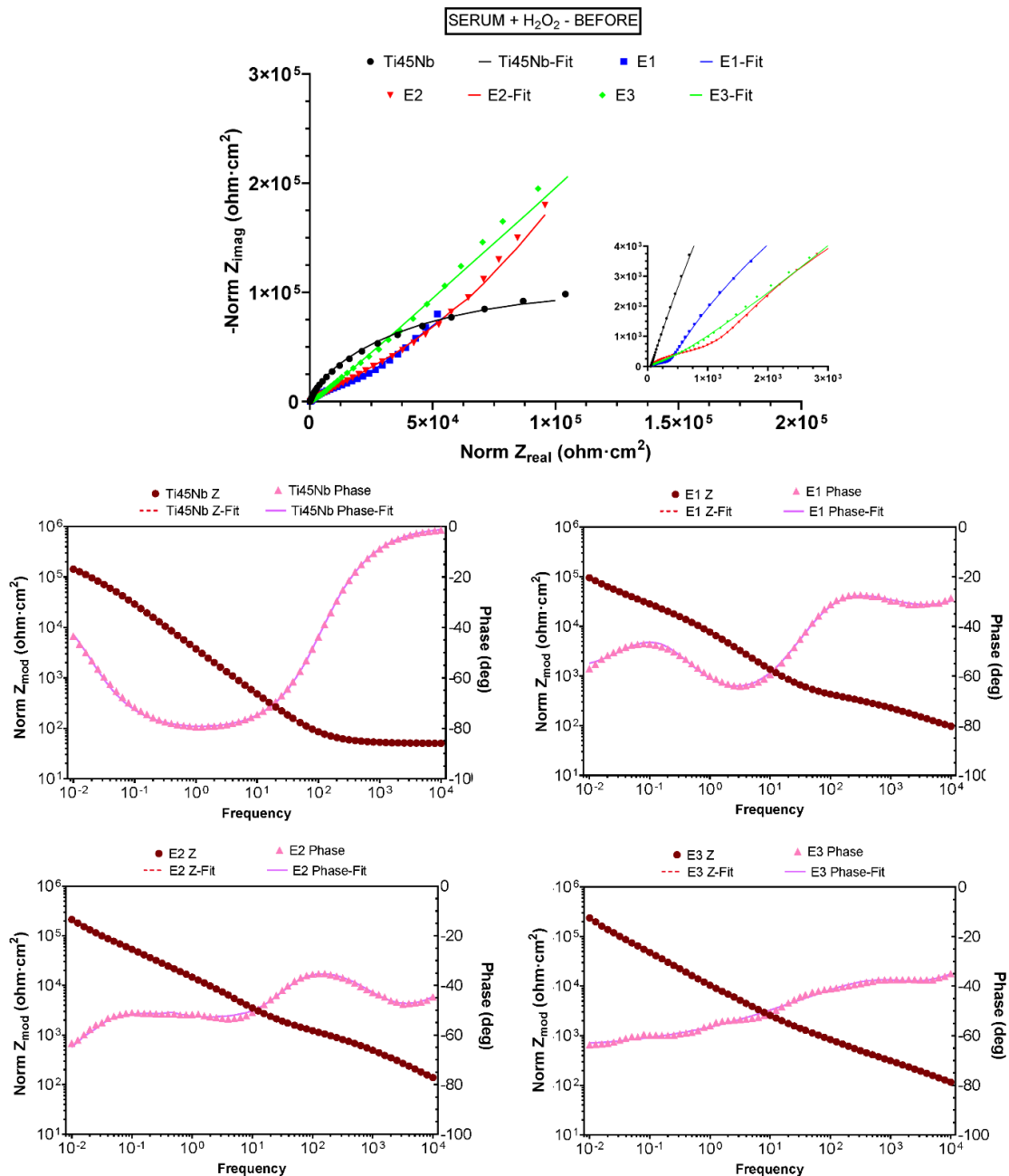


Figure 8. The EIS results of treated and untreated Ti45Nb samples in Serum+H₂O₂ electrolyte.

Figure 8 shows the EIS results of treated and untreated Ti45Nb samples in Serum+H₂O₂ electrolyte. The untreated sample showed almost identical behaviour in this solution as in the serum. The two time constants were again visible in samples E1 and E2, while sample E3 exhibited a pseudo-linear curve. However, on closer inspection, time constants could still be observed and even a third one can be argued.

An electrical equivalent circuit model was created using the experimental results of the EIS tests and given in Figure 9. The proposed model consisted of resistance elements for the solution (R_{sol}), porous layer (R_{po}) and barrier layer (R_{ba}) and constant phase elements (CPE) for the porous (C_{po}) and barrier (C_{ba}) layers. Furthermore, a phase element (C_{di}) was added in series with R_{ba} to represent the diffusion of ions. A Warburg impedance could be utilized for the same goal, but it would further complicate the model. A similar equivalent circuit has been proposed by other studies. For both electrolytes, the fit curves given in the Nyquist and Bode plots of all samples show that the simulated data obtained by this model are in good agreement with the experimental results. The EIS parameters of surface layers are summarized in Table 4.

Table 4. Electrochemical impedance parameters of surface layers on pure untreated and oxidized Ti45Nb alloy

SERUM								
	Ti45Nb		E1		E2		E3	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R_{sol} ($\Omega \cdot cm^{-2}$)	46.11	9.02E-01	46.91	3.74E-01	45.77	6.32E-01	46.13	6.98E-01
R_{po} ($\Omega \cdot cm^{-2}$)	4.37	1.07	922.8	56.5	1686.1	129	477.9	12.8
C_{po} ($S \cdot s^a \cdot cm^{-2}$)	4.90E-05	2.60E-06	1.44E-05	2.14E-06	5.44E-06	1.08E-07	9.64E-06	4.80E-07
m	1.00	6.64E-02	6.24E-01	1.64E-02	6.73E-01	2.12E-02	6.78E-01	5.13E-02
R_{ba} ($\Omega \cdot cm^{-2}$)	1.43E+04	1.12E+03	1.49E+04	9.81E+03	3.40E+04	7.83E+03	1.48E+04	1.55E+03
C_{ba} ($S \cdot s^a \cdot cm^{-2}$)	8.20E-05	5.53E-06	8.93E-05	3.53E-06	3.81E-05	4.11E-06	9.12E-05	3.73E-06
n	8.93E-01	7.43E-02	1.00	1.44E-02	9.15E-01	6.11E-02	5.35E-01	3.46E-02
C_{di} ($S \cdot s^a \cdot cm^{-2}$)	2.90E-04	9.11E-05	1.43E-05	4.71E-06	2.13E-05	1.56E-06	2.73E-05	5.81E-06
k	9.14E-01	5.86E-02	8.42E-01	3.12E-02	7.18E-01	2.27E-02	8.03E-01	8.06E-02
SERUM + H₂O₂								
	Ti45Nb		E1		E2		E3	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
R_{sol} ($\Omega \cdot cm^{-2}$)	35.27	6.98E-01	34.73	6.26E-01	34.55	7.15E-01	36.89	70.08E-01
R_{po} ($\Omega \cdot cm^{-2}$)	5.57	0.86	416.6	42.17	5074	226	112.1	26
C_{po} ($S \cdot s^a \cdot cm^{-2}$)	2.59E-04	5.95E-05	2.72E-05	6.84E-06	2.38E-05	7.63E-07	2.64E-05	1.78E-06
m	8.88E-01	4.69E-02	5.58E-01	2.76E-02	5.73E-01	9.84E-03	9.24E-01	9.58E-02
R_{ba} ($\Omega \cdot cm^{-2}$)	1.55E+05	1.15E+03	1.56E+04	6.71E+02	375.2	26.3	2.85E+04	6.31E+02
C_{ba} ($S \cdot s^a \cdot cm^{-2}$)	5.75E-05	3.46E-06	4.05E-05	9.29E-06	3.01E-06	1.03E-06	2.59E-04	1.11E-04
n	8.95E-01	8.32E-02	8.38E-01	7.44E-02	8.03E-01	5.26E-02	3.84E-01	2.35E-02
C_{di} ($S \cdot s^a \cdot cm^{-2}$)	1.96E-04	1.54E-05	5.81E-05	1.88E-06	8.22E-07	6.77E-08	3.13E-05	1.99E-06
k	1.00	1.41E-02	8.41E-01	1.72E-02	1.00	1.18E-01	7.15E-01	1.26E-02

Since the natural layer on the surface of the untreated sample is very thin and non-porous, the R_{po} resistance is low in both electrolytes. It was mentioned earlier that the PEO treatment makes the surface porous, thus increasing the R_{po} resistance. The highest value was observed at the E2 condition for both electrolytes. Regarding the barrier layer, the situation seems to be reversed. The untreated conditions show higher values compared to the oxidized samples. It can be concluded that during oxidation the surface layer thickens and becomes porous. In some conditions, the CPE exponents were seen to approach very close to or reach the value of 1. This indicates that the element behaves in a similar way to an ideal capacitor under these conditions.

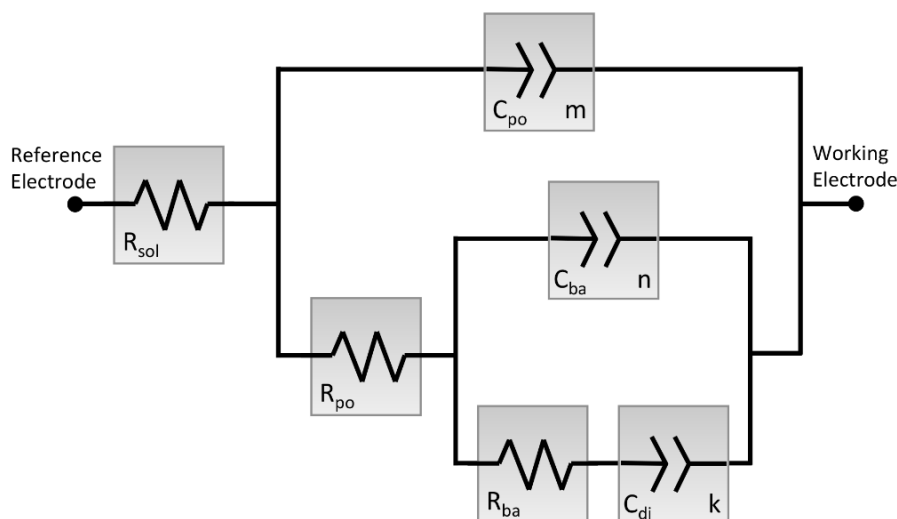


Figure 9. Electrical equivalent circuit model

4. Conclusions

In this study, a boron, calcium and phosphate doped oxide layer was successfully formed on the Ti45Nb surface using the PEO method according to the EDS results. The effect of boron amount in the electrolyte on surface properties and corrosion resistance was investigated. After PEO a rough and porous oxide layer, which is beneficial for the bone-growth and rapid osseointegration, was observed on the surface. Pores with different sizes were homogeneously distributed all over the surface. Except for the decrease in the number of pores observed in some regions, no effect of boron embedding was observed in terms of surface SEM views.

It can be said that the surface treatment increased the corrosion resistance. Especially the boron embedded samples exhibited better corrosion properties as they were found to be relatively more noble. The corrosion mechanisms of the treated samples were thought to be diffusion-controlled corrosion as the Beta A values were found to be quite high. The treated samples didn't show a passivation behaviour. According to Tafel extrapolation, the current density was higher in the untreated sample. General surface corrosion was observed as the reverse scanning curve didn't intersect the forward scanning curve in any of the samples.

E1 and E2, both boron-doped samples, had the best corrosion resistance. Boron-doped, CaP-containing TiO₂ layers coated with PEO could be a promising option for improving the bioactivity and biocompatibility of Ti45Nb biomaterials, as well as bone-tissue healing, anti-bacterial, and anti-inflammatory capabilities.

Acknowledgement

The authors would like to thank Atatürk University East Anatolia High Technology Application and Research Center (DAYTAM) and Erzurum Technical University High Technology Application and Research Center (YUTAM) for their assistance during the characterization of specimens.

Author contribution

S. Yenal Vangözü; conceived and designed the analysis, collected the data, contributed data or analysis tools, performed the analysis and wrote the paper.

Özgü Bayrak; conceived and designed the analysis, contributed data or analysis tools, performed the analysis and wrote the paper.

Declaration of ethical code

In this study, we undertake that all the rules that must be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" have been complied with and that none of

the actions specified under the heading "Actions Contrary to Scientific Research and Publication Ethics" have been carried out in the said directive."

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission."

Conflicts 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.

References

- Atila, A., Halici, Z., Cadirci, E., Karakus, E., Palabiyik, S. S., Ay, N., Bakan, F., & Yilmaz, S. (2016). Study of the boron levels in serum after implantation of different ratios nano-hexagonal boron nitride-hydroxy apatite in rat femurs. *Materials Science and Engineering C*, *58*, 1082–1089. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.09.041>
- Bai, Y., Deng, Y., Zheng, Y., Li, Y., Zhang, R., Lv, Y., Zhao, Q., & Wei, S. (2016). Characterization, corrosion behavior, cellular response and in vivo bone tissue compatibility of titanium–niobium alloy with low Young's modulus. *Materials Science and Engineering: C*, *59*, 565–576. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2015.10.062>
- Chen, Q., & Thouas, G. (2014). *Biomaterials: A basic introduction* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17553>
- Cheng, J., Peng, K., Jin, E., Zhang, Y., Liu, Y., Zhang, N., Song, H., Liu, H., & Tang, Z. (2011). Effect of additional boron on tibias of African ostrich chicks. *Biological Trace Element Research*, *144*(1–3), 538–549. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9024-y>
- Elias, C. N., Lima, J. H. C., Valiev, R., & Meyers, M. A. (2008). Biomedical applications of titanium and its alloys. *JOM*, *60*(3), 46–49. <https://doi.org/10.1007/S11837-008-0031-1>
- Esfahani, E. A., Bukuaghangin, O., Banfield, S., Vangözü, Y., Yang, L., Neville, A., Hall, R., & Bryant, M. (2022). Surface engineering of wrought and additive layer manufactured Ti-6Al-4V alloy for enhanced load bearing and bio-tribocorrosion applications. *Surface and Coatings Technology*, *442*, 128139. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2022.128139>
- Gebert, A., Eigel, D., Gostin, P. F., Hoffmann, V., Uhlemann, M., Helth, A., Pilz, S., Schmidt, R., Calin, M., Göttlicher, M., Rohnke, M., & Janek, J. (2016). Oxidation treatments of beta-type Ti-40Nb for biomedical use. *Surface and Coatings Technology*, *302*, 88–99. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2016.05.036>
- Hakki, S. S., Bozkurt, B. S., & Hakki, E. E. (2010). Boron regulates mineralized tissue-associated proteins in osteoblasts (MC3T3-E1). *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, *24*(4), 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2010.03.003>
- Huang, P., Xu, K. W., & Han, Y. (2005). Preparation and apatite layer formation of plasma electrolytic oxidation film on titanium for biomedical application. *Materials Letters*, *59*(2–3), 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.09.045>
- Ingemarsson, L., & Halvarsson, M. (2011). *SEM / EDX analysis of boron 2011-0131 a case study*. Chalmers University of Technology. http://fy.chalmers.se/~f10mh/Halvarsson/EM_intro_course_files/SEM_EDX%20Boron.pdf
- Johansson, C. B., & Albrektsson, T. (1991). A removal torque and histomorphometric study of commercially pure niobium and titanium implants in rabbit bone. *Clinical Oral Implants Research*, *2*(1), 24–29. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0501.1991.020103.X>
- Long, M., & Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective. *Biomaterials*, *19*(18), 1621–1639. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(97\)00146-4](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(97)00146-4)
- Lv, G. H., Chen, H., Gu, W. C., Li, L., Niu, E. W., Zhang, X. H., & Yang, S. Z. (2008). Effects of current frequency on the structural characteristics and corrosion property of ceramic coatings formed on magnesium alloy by PEO technology. *Journal of Materials Processing Technology*, *208*(1–3), 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.125>

- Matsuno, H., Yokoyama, A., Watari, F., Uo, M., & Kawasaki, T. (2001). Biocompatibility and osteogenesis of refractory metal implants, titanium, hafnium, niobium, tantalum and rhenium. *Biomaterials*, 22(11), 1253–1262. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(00\)00275-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00275-1)
- Niinomi, M. (2003). Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods. *Science and Technology of Advanced Materials*, 4(5), 445–454. <https://doi.org/10.1016/J.STAM.2003.09.002>
- Niinomi, M., & Boehlert, C. J. (2015). Titanium alloys for biomedical applications. In M. Niinomi, T. Narushima, & M. Nakai (Eds.), *Advances in Metallic Materials* (ss. 179–213). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46836-4_8
- Ozaki, T., Matsumoto, H., Watanabe, S., & Hanada, S. (2004). Beta Ti alloys with low Young's modulus. *Materials Transactions*, 45(8), 2776–2779. <https://doi.org/10.2320/MATERTRANS.45.2776>
- Sopchenski, L., Cogo, S., Dias-Ntipanyj, M. F., Elifio-Espósito, S., Popat, K. C., & Soares, P. (2018). Bioactive and antibacterial boron doped TiO₂ coating obtained by PEO. *Applied Surface Science*, 458, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.049>
- Taşlı, P. N., Yalvaç, M. E., Sofiev, N., & Şahin, F. (2013). Effect of F68, F127, and P85 pluronic block copolymers on odontogenic differentiation of human tooth germ stem cells. *Journal of Endodontics*, 39(10), 1265–1271. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.06.011>
- Valiev, R. Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T. G., Zehetbauer, M. J., & Zhu, Y. T. (2015). Fundamentals of superior properties in bulk NanoSPD materials. *Materials Research Letters*, 4(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/21663831.2015.1060543>
- Vangolu, Y., & Kilic, S. (2022). Corrosion and wear performances of hydroxyapatite and boron-containing TiO₂ composite coatings on Ti6Al7Nb alloy. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 10(2), 025030. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/AC7816>
- Wang, Y., Wang, L., Zheng, H., Du, C., ChengyunNing, Shi, Z., & Xu, C. (2010). Effect of frequency on the structure and cell response of Ca- and P-containing MAO films. *Applied Surface Science*, 256(7), 2018–2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.09.041>
- Yavari, S. A., Necula, B. S., Fratila-Apachitei, L. E., Duszczuk, J., & Apachitei, I. (2016). Biofunctional surfaces by plasma electrolytic oxidation on titanium biomedical alloys. *Surface Engineering*, 32(6), 411–417. <https://doi.org/10.1179/1743294415Y.0000000101>
- Ying, X., Cheng, S., Wang, W., Lin, Z., Chen, Q., Zhang, W., Kou, D., Shen, Y., Cheng, X., Rompis, F. A., Peng, L., & Lu, C. Z. (2011). Effect of boron on osteogenic differentiation of human bone marrow stromal cells. *Biological Trace Element Research*, 144(1–3), 306–315. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9094-x>

Determining the optimal reduction ratio in temper rolling in terms of residual stress distribution across thickness

Temper haddelemede kalınlık boyunca artık gerilme dağılımı açısından optimum ezme oranının belirlenmesi

Bilal ÇOLAK* 

Karabük University, Eskipazar Vocational School, 78400, Eskipazar, Karabük

• Received: 24.05.2023

• Accepted: 10.09.2023

Abstract

Materials with compressive stresses on the surface withstand fatigue failures, cracking, galling, and corrosion. This compressive stress at the surface can be created by temper rolling. The rolling process must be conducted with an appropriate reduction to obtain the desired benefit from temper rolling. A 1% thickness reduction is usually applied to endow flatness and surface texture to the strip, and this reduction is sufficient to eliminate the discontinuous yielding phenomenon. In this study, 2.5-mm-thick low-carbon steel sheet (DC01 grade) samples were annealed at approximately 600°C for 5 minutes, temper-rolled at room temperature at various reduction ratios subsequently, and the residual stresses formed along the thickness by rolling were investigated. This study has revealed that a 1% reduction ratio is insufficient for developing compressive stresses on the surface, but this can only be achieved with a 1.5% reduction ratio. When the reduction ratio was increased to 1.8%, tensile stresses began to occur inside, along with compressive stresses on the surface. It was observed that at a reduction ratio of 2%, the situation was reversed again; tensile stresses began to regenerate at the surface, and this became more pronounced up to a 10% reduction ratio.

Keywords: Compressive and tensile stresses, Discontinuous (obvious) yield phenomenon, Reduction ratio (Thickness reduction), Temper (Skin-pass) rolling

Öz

Yüzeyinde basma gerilmeleri içeren malzemeler, yorulma hasarlanmalarına, çatlama ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Yüzeydeki bu basma gerilmeleri temper haddeleme ile oluşturulabilir. Temper haddelemeden beklenen faydayı elde etmek için haddeleme işlemi uygun bir ezme oranında yapılmalıdır. Şerit yüzeyine düzgünlük ve pürüzlük kazandırmak için genellikle %1'lik ezme oranı uygulanır ve bu ezme miktarı süreksiz akma olayını ortadan kaldırmak için yeterlidir. Bu çalışmada, 2,5 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çelik sac (DC01 kalite) numuneler yaklaşık 600°C'de 5 dakika tavllanmış, ardından oda sıcaklığında çeşitli ezme oranlarında temper haddelemeye tabi tutulmuş ve haddelemeden dolayı kalınlık boyunca oluşan artık gerilmeler incelenmiştir. Bu çalışma, yüzeyde basma gerilmeleri oluşturmak için %1'lik ezme oranının yetersiz olduğunu, bunun ancak %1,5'lik bir oran ile sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Ezme oranı %1,8'e çıkarıldığında, yüzeyde basma gerilmeleri ile birlikte içeride çekme gerilmeleri oluşmaya başlamıştır. %2'lik ezme oranında ise durumun tekrar tersine döndüğü; çekme gerilmeleri yüzeyde yeniden oluşmaya başladığı ve bu durumun %10 ezme oranına kadar daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Basma ve çekme gerilmeleri, Süreksiz (belirgin) akma olayı, Ezme oranı, Temper haddeleme

*Bilal ÇOLAK; bilalcolak@karabuk.edu.tr

1. Introduction

Residual stresses are multiaxial internal stresses in a solid body due to inhomogeneous plastic deformation, local cooling rate differences, or structural changes (phase transformation). Asymmetrical rolling, which results in a heterogeneous microstructure and generates residual stresses, can lead to higher residual stresses throughout the thickness. The regions subjected to elastic tensile stress may suffer localized corrosion in aggressive environments. In addition, tensile residual stresses on the surface can lead to micro- and macro-cracks forming, especially during deep drawing. Therefore, it is more inconvenient that the tensile stress is on the material surface. It is well known that compressive residual stresses at the surface play an important role in prolonging material life (Azarhoushang & Kadivar, 2021). A %6- to 200% improvement in fatigue life has been noted for steel plates (Kanchidurai et al., 2017). Morikage et al. used hammer-peened material to show how the compressive residual stress layer affects fatigue resistance. They found that materials with compressively stressed surfaces had the slowest fatigue crack growth rate (Morikage et al., 2015). According to the mathematical model aiming to suppress the fatigue effect of inclusions in the microstructure of bearings, the level of compressive stresses should be optimal. If it is excessive, there is no improvement, even deterioration of fatigue properties (Mahdavi et al., 2019). Because the crack opening is suppressed at the sample surface, compressive stress close to the sheet surface provides higher ductility and prevents tearing during forming (Yu et al., 2019). Cold deformation methods such as shot peening, hammer peening, rolling, or low-temperature fine abrasive processes can induce this residual stress on the material surface. It should be considered that some of the compressive stress on the surface is quickly relieved with the deformation of the material.

Sheet metal is often subjected to a final process to impart essential properties. These are the improved mechanical properties and flatness, the texture on the strip surface, and the absence of obvious yielding phenomenon in the material. Temper rolling (skin-pass rolling) is the final step, which involves giving the annealed sheet a slightly cold thinning at room temperature. This slight reduction ratio applied in a temper rolling significantly affects the material's properties. A 1% thickness reduction is usually sufficient to endow flatness and surface texture to the strip and to eliminate the discontinuous yielding phenomenon (Çolak, 2021; Çolak & Kurgan, 2018, 2019; Fang et al., 2002; Grassino et al., 2012; Jafarlou et al., 2014; Kurgan & Özakın, 2020; Lake, 1985; Luis et al., 2009; Ma et al., 2009; Mazur, 2012, 2015; Özakın et al., 2021). As the reduction ratio increases, the microstructural and microhardness changes differ (Özakın & Kurgan, 2022). The yield strength reaches its minimum value at a reduction ratio of 1% and begins to rise again above this ratio, so the material loses its plasticity without an obvious yield area (Ma et al., 2009; Mazur, 2012). According to Koohbor & Serajzadeh (2011), when the type of stress at the surface shifts from tensile to compressive, the time it takes to attain maximum hardness, where it loses its plasticity during ageing, almost doubles. This reduction value was determined to be 1.3% to 2.0% to remove the obvious yield region (Lake, 1985). Grassino et al. (2012) also found this ratio to be 1.3% for low-carbon steel.

Slight reductions and/or small rolls and low friction coefficients create compressive stresses on or near the surface, whereas tensile stresses arise in the interior parts (Kalpakjian & Schmid, 2007; Yu et al., 2019). In this situation, the sheet cross-section shows a non-uniform stress-strain distribution (Figure 1a). The plastic flow begins in the stretched middle layers and progresses to the surface. This decreases the flow strength, and the stress-strain curve no longer shows an obvious yield phenomenon (Mazur, 2012). Suppose the reduction ratio or roll diameter is more significant than a specific value. In that case, tensile stresses occur on the surface, and compressive stresses on the inside (Figure 1b). The stress distribution induced by rolling is not the same not only across the thickness of the sample but also across its width. It was proved that the stress type and value also differ across the width of the sample (Koohbor & Serajzadeh, 2011). They showed that after single-pass rolling, tensile stress occurs in the middle of the sample, and compressive stress occurs at the edges in the residual stress distribution, which varies along the thickness.

Much research has been done on the impact of temper rolling on mechanical properties, but the number of studies on residual stresses could be much higher. In selecting the reduction ratio, the requirement of exerting compressive stresses on the material surface in terms of life should also be addressed. This study investigates the optimal reduction ratio to create residual compressive stresses at the surface. It was demonstrated that using the finite element approach, the rigid roller model might be utilized to determine residual stresses in rolling simulations (Sae et al., 2012). In the study that tried to fabricate gradient-structured aluminum, the plastic strain was observed in the core of the sheet when a reduction ratio of 2%. This means that the stress is only at

the surface, yet there is no tension in the core layer of the plate until this reduction (Yu et al., 2019). In the present study, steel sheet samples were subjected to temper rolling with different thickness reductions, and rolling-induced residual stresses that occurred in the cross-section of the material were investigated.

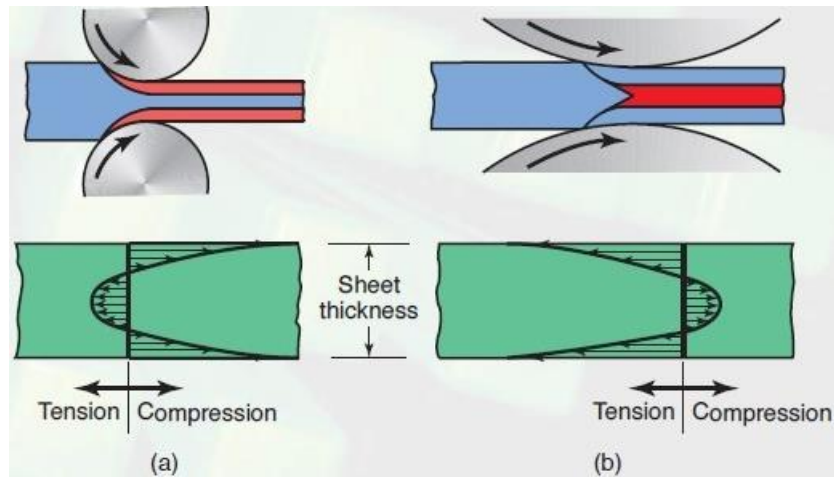


Figure 1. The type of residual stress distribution developed in flat rolling. a) small rolls and/or small thickness reduction, b) large rolls and/or large thickness reduction (Kalpakjian & Schmid, 2007).

Much research has been done on the impact of temper rolling on mechanical properties, but the number of studies on residual stresses could be much higher. In selecting the reduction ratio, the requirement of exerting compressive stresses on the material surface in terms of life should also be addressed. This study investigates the optimal reduction ratio to create residual compressive stresses at the surface. It was demonstrated that using the finite element approach, the rigid roller model might be utilized to determine residual stresses in rolling simulations (Sae et al., 2012). In the study that tried to fabricate gradient-structured aluminum, the plastic strain was observed in the core of the sheet when a reduction ratio of 2%. This means that the stress is only at the surface, yet there is no tension in the core layer of the plate until this reduction (Yu et al., 2019). In the present study, steel sheet samples were subjected to temper rolling with different thickness reductions, and rolling-induced residual stresses that occurred in the cross-section of the material were investigated.

2. Experimental procedure

In the rolling experiments, 2.5 mm thick DC01 grade low-carbon steel with a chemical composition of 0.036C–0.204Mn–0.010P–0.006S–0.007Si–0.070Al (wt.-%) whose tensile properties are given in Table 1. was used. For the rolling tests, two-high rolling equipment in which the radius and width of the pair of rolls were 75 mm and 200 mm, respectively, allowing the accurate setup of the required speed and gap used (Figure 2). The test samples were cut 500 mm long by 30 mm wide and annealed at 600°C for 5 mins to remove the effects of previous cold treatment history. The cutting method was used to measure the residual stresses on the rolled samples. The residual strain is the difference between the original and final strains. The strain was measured using strain gauges attached to the sample surface before cutting. According to Hooke's law, the magnitude of the localized residual compressive stress was found by multiplying the strain by the elasticity modulus. To investigate the impact of the thickness reduction on the stress type on the surface, the samples were subjected to temper rolling with different thickness reductions (1%, 1.5%, 1.8%, 2%, 3%, 3.4%, 10%) at a constant speed (10 rpm).

Table 1. Material properties

Standard	Grade	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
DIN-EN 10130-2006	DC01	248.1	332.4	32



Figure 2. The two-high rolling setup.

In this study, the samples' reduction ratios (r) were found according to Eq. 1 (Grassino et al., 2012; Özakin, 2023).

$$r = \left[\frac{(t_0 - t_1)}{t_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

where t_0 and t_1 are the thickness before and after rolling, respectively.

Residual stress measurements (cutting tests) were performed in the Laboratory Margem at Karabük University.

3. Results and discussion

Residual measurement tests of all rolled samples were performed to reveal the residual stress distribution across the thickness. One of the annealed but not rolled samples was also subjected to a cutting test to ensure it was free of residual stresses. Despite annealing, it was observed that the effects of the previous cold workings could not be eliminated, and a compressive stress of approximately 1.5 MPa remained in the material section, as seen in Figure 3. All samples were assumed to have this residual stress distribution and were subtracted from the residual stress distribution of all rolled samples to reveal the rolling-induced residual stresses.

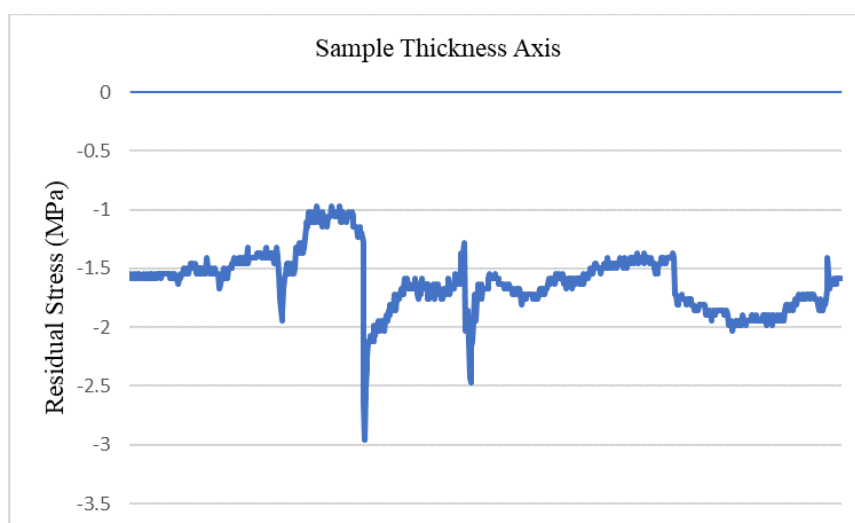


Figure 3. Residual stress distribution of an annealed but unrolled sample.

In a temper rolling, a reduction ratio of 1% is usually sufficient to obtain a material with no obvious yielding and a smooth, flat, and textured surface (Çolak, 2021; Çolak & Kurgan, 2018, 2019; Fang et al., 2002; Grassino et al., 2012; Jafarlou et al., 2014; Kurgan & Özakin, 2020; Lake, 1985; Luis et al., 2009; Ma et al., 2009; Mazur, 2012, 2015; Özakin et al., 2021). However, it is seen that this reduction ratio is not sufficient in terms of compressive stress on the surface (Figure 4a). Since a slight reduction causes only tensile deformation of the skin and not internal deformation of the body, compressive residual stress is theoretically expected to occur at the surface (Figure 1a). To prove the consistency of the measurement result (Figure 4a), the residual stress measurement for 1% reduction was repeated with another sample, and the result was found to be almost the identical (Figure 4b). There are still tensile stresses on the surface and compressive stresses on the inside. This should be considered a disadvantage in the manufacturing phase if the material is to be resistant to surface cracking, fatigue, or corrosion.

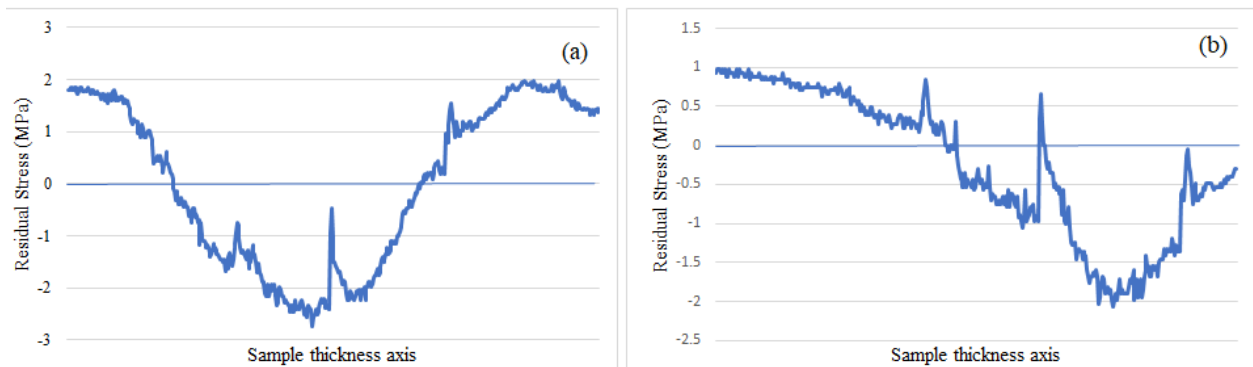


Figure 4. Residual stress distributions for a reduction ratio of 1%. (a) Primary test (b) Verification test.

When the reduction ratio is increased to 1.5%, residual compressive stress is expected to only occur at the surface. However, the measurements show that the residual stress distribution completely turns into increasing compressive stress throughout the thickness (Figure 5a). The residual stress measurement was repeated to verify this result, and a similar distribution was obtained (Figure 5b). Positive and negative residual stresses across the thickness balance each other. However, since a single type of residual stress was generated here, which varies throughout the thickness, the material was bent during rolling to maintain internal stress balance (Figure 6).

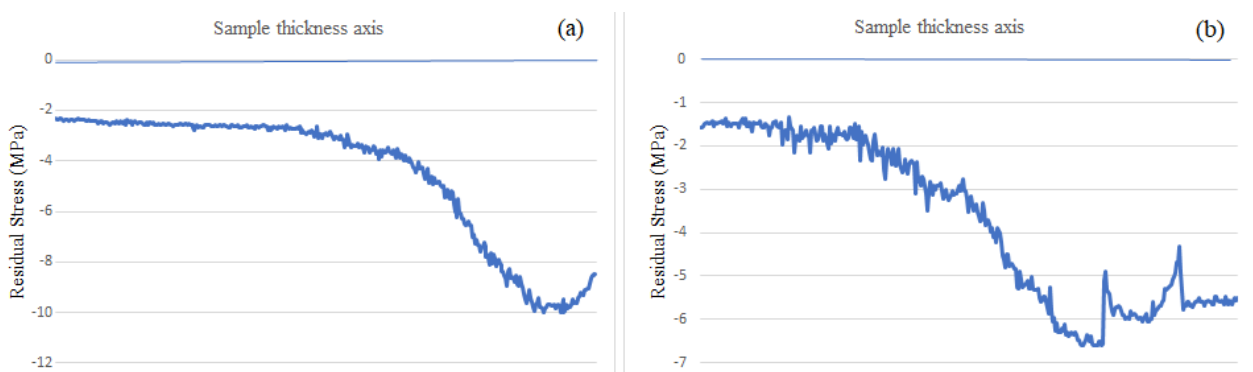


Figure 5. Residual stress distributions for a reduction ratio of 1.5%. (a) Primary test (b) Verification test.

This distribution is acceptable regarding material life compared to the tensile stress-weighted distribution. Fatigue cracks usually initial at the surface. As compressive stresses at the surface suppress the possibility of yielding, it increases fatigue life (Mahdavi et al., 2019). For the surface cracks not to propagate, the surface must be subjected to compressive stresses, and its hardness must be higher. If the whole body has a high hardness, processing will be more difficult due to insufficient ductility. If the compressive stresses at the surface are balanced with the tensile stresses in the body, the toughened material, thanks to the residual compressive stress at the surface, becomes more resistant to cracks. Therefore, compressive stress occurs only at the surface, and the tensile stresses in the interior are more favourable in terms of life.



Figure 6. Curvature tendency due to unbalanced residual internal stresses.

When the reduction ratio was increased to 1.8%, it was observed that the desired stress distribution appeared in the material cross-section. In a temper rolling, where compression stresses are desired to be created at the surface, this occurs at a reduction ratio of 1.8%, not 1%.

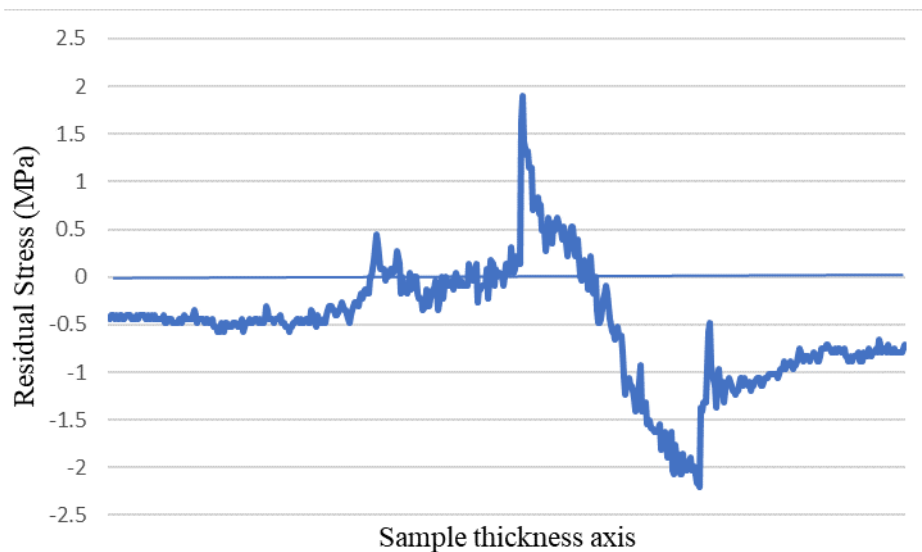


Figure 7. Residual stress distribution for a reduction ratio of 1.8%.

However, the situation reversed when the reduction ratio exceeded 1.8%; with a 2% reduction ratio, tensile stresses started to occur again on the surface. It is seen that the distribution is similar at higher reduction ratios (Figure 8 a,b,c,d), and when the reduction ratios of 3%, 3.4%, and 10% are considered, the tensile stress magnitude at the surface increases and the compressive stress value inside decreases as the reduction increases. Increasing the difference between residual compressive and tensile stress exhausts the fatigue performance of components (Ren et al., 2022). Since this difference increases at higher reductions (Figure 8 a,b,c,d), it creates a disadvantage for the rolled material regarding fatigue life.

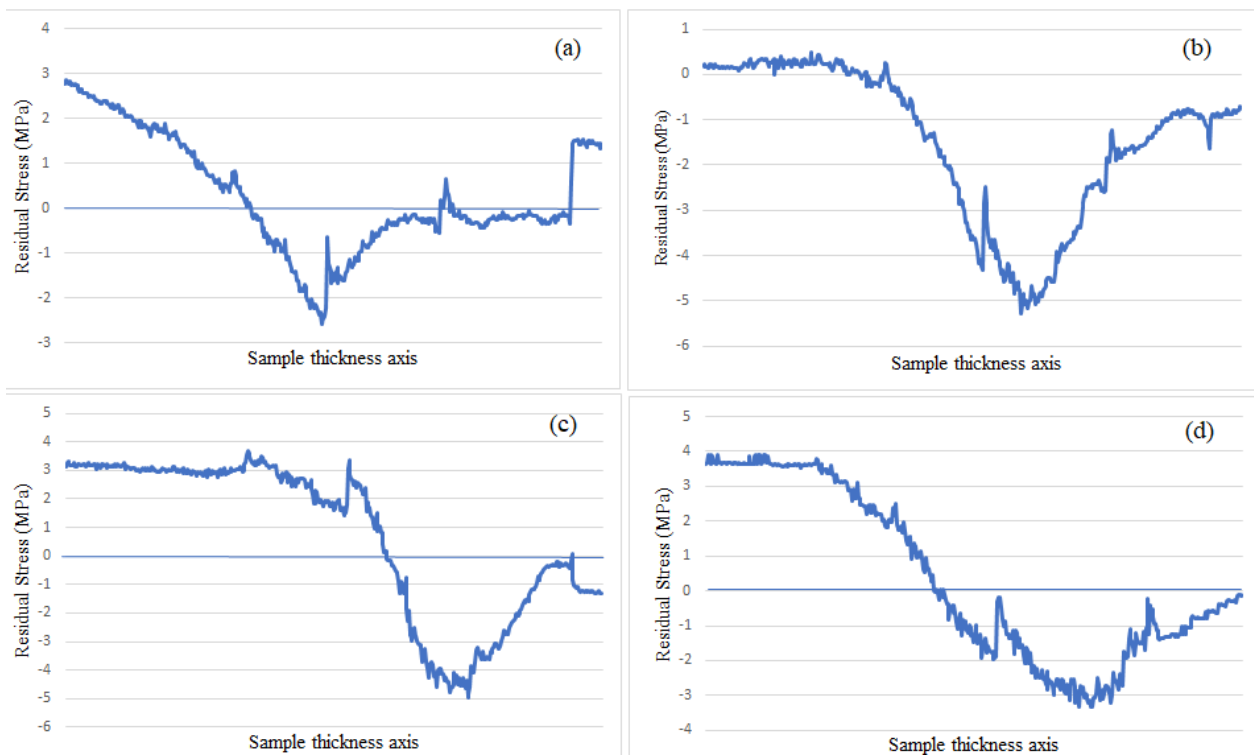


Figure 8. Residual stress distributions for higher reduction ratios. (a) a reduction ratio of 2%. (b) a reduction ratio of 3%. (c) a reduction ratio of 3.4 (d) a reduction ratio of 10%.

This study explored the impact of the reduction in thickness on the residual stress distribution; however, its influence on the obvious yield phenomenon, flatness, surface roughness, and strip surface topography was not considered. None of these requirements should be violated throughout the temper rolling procedure. It is more difficult to find the rolling circumstances that result in the rolled material having all the necessary qualities. Future research will go deeper into this topic.

4. Conclusions

Temper rolling is performed to impart various properties to the material, including flatness and smoothness of the surface, improved mechanical properties, elimination of the discontinuous yield point, and obtaining a rough surface. In this study, residual stresses varying depending on the reduction in the cross-section of the temper-rolled materials were investigated, and the obtained results are summarized below.

1. Tensile stress on the surface and compressive stress on the inside occurred in the samples rolled with a 1% reduction ratio.
2. Compressive stress was formed with a reduction ratio of 1.5%, although it was not homogeneous throughout the thickness of the rolled samples.
3. The distribution with compression stress on the surface and tensile stress on the inside could only be obtained at a reduction ratio of 1.8%.
4. When the reduction ratio reaches 2%, tensile stresses occur again at the surface and compressive stresses inside.
5. As the reduction ratio rises above 2%, the difference between the surface's tensile stress and the inside's compressive stress gradually increases.

Considering all these results in a temper rolling, the 1.8% reduction ratio is the most appropriate for creating compressive stresses on the material surface.

Material durability depends on the type of residual stress across the thickness and the magnitude and depth of the compressive surface tension. This study looked at the effect of thickness decrease on the type of residual stress caused by cold deformation. The effect on the magnitude and depth of the surface compressive stress may be the subject of further research.

Acknowledgement

This research was supported by the Research Fund of Karabuk University under project number: KBÜBAP-23-DS-043.

Author contributions

Bilal Çolak completed all stages of the study, including the preparation of samples, tests, research, etc.

Declaration of ethical code

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

Conflicts of interest

There are no apparent conflicts.

References

- Ali, M. Y., & Pan, J. (2012). Effect of a deformable roller on residual stress distribution for elastic-plastic flat plate rolling under plane strain conditions. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 5(1), 129–142. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0190>
- Azarhoushang, B., & Kadivar, M. (2021). Thermal aspects of abrasive machining processes. *Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes: Third Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823777-9.00008-2>
- Çolak, B. (2021). How the skin-pass rolling reduction ratio affects the strain aging behaviour of low-carbon steel sheets. *Ironmaking and Steelmaking*, 48(10), 1254–1260. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1936877>
- Çolak, B., & Kurgan, N. (2018). An experimental investigation into roughness transfer in skin-pass rolling of steel strips. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9–12), 3321–3330. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1691-9>
- Çolak, B., & Kurgan, N. (2019). Skin-pass rolling of sheet steel. *The International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC)* (K. Bülent (ed.); pp. 207–212).
- Fang, X., Fan, Z., Ralph, B., Evans, P., & Underhill, R. (2002). Effect of temper rolling on tensile properties of C-Mn steels. *Materials Science and Technology*, 18(3), 285–288. <https://doi.org/10.1179/026708301225000734>
- Grassino, J., Vedani, M., Vimercati, G., & Zanella, G. (2012). Effects of skin pass rolling parameters on mechanical properties of steels. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(11), 2017–2026. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0266-1>
- Jafarlou, D., Hassan, M., Mardi, N. A., & Zalnezhad, E. (2014). Influence of temper rolling on tensile property of low carbon steel sheets by application of Hill 48 anisotropic yield criterion. *Procedia Engineering*, 81(October), 1222–1227. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.101>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2007). *Manufacturing processes for engineering materials* (5th Edition). Pearson
- Kanchidurai, S., Krishanan, P. A., Baskar, K., & Saravana Raja Mohan, K. (2017). A review of inducing compressive residual stress - Shot peening; On structural metal and welded connection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 80(1), 0–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/80/1/012033>
- Koohbor, B., & Serajzadeh, S. (2011). Kinetics of static strain aging after temper rolling of low carbon steel. *Ironmaking and Steelmaking*, 38(4), 314–320. <https://doi.org/10.1179/1743281210Y.0000000009>
- Kurgan, N., & Özakin, B. (2020). Temper haddelemede pürüzlülük transferini etkileyen parametrelerin incelenmesine yönelik bir derleme çalışması. *Marmara University*, 1(2), 23–34. <https://doi.org/10.35333/porta.2019.99>
- Lake, J. S. H. (1985). Control of discontinuous yielding by temper rolling. *Journal of Mechanical Working Technology*, 12(1), 35–66. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(85\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0378-3804(85)90041-5)

- Luis, C., Gaspérini, M., Bouvier, S., & Li, J. J. (2009). Effect of temper rolling on the mechanical behaviour of thin steel sheets under monotonous and reverse simple shear tests. *International Journal of Material Forming*, 2(SUPPL. 1), 471–474. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0582-x>
- Ma, Q. Long, Wang, D. Cheng, Liu, H. Min, & Lu, H. Ming. (2009). Effect of temper rolling on tensile properties of low-Si Al-killed sheet steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 16(3), 64–67. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60045-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60045-5)
- Mahdavi, H., Poullos, K., & Niordson, C. F. (2019). Determination of optimal residual stress profiles for improved rolling contact fatigue resistance. *MATEC Web of Conferences*, 300, 06002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201930006002>
- Mazur, V. L. (2012). Temper rolling of sheet steel. *Steel in Translation*, 42(4), 348–352. <https://doi.org/10.3103/S0967091212040109>
- Mazur, V. L. (2015). Production of rolled steel with specified surface roughness. *Steel in Translation*, 45(5), 371–377. <https://doi.org/10.3103/S0967091215050083>
- Morikage, Y., Igi, S., Oi, K., Jo, Y., Murakami, K., & Gotoh, K. (2015). Effect of compressive residual stress on fatigue crack propagation. *Procedia Engineering*, 130, 1057–1065. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.263>
- Özakın, B. (2023). Experimental investigation of the effect of skin-pass rolling reduction ratio on corrosion behaviors of AISI 304 stainless steel sheet materials. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 11(2). <https://doi.org/10.1088/2051-672X/accd07>
- Özakın, B., & Kurgan, N. (2022). Effect of temper rolling reduction ratio on microhardness and microstructure of DC04 grade sheet material. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 393–399. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.956944>
- Özakın, B., Çolak, B., & Kurgan, N. (2021). Effect of material thickness and reduction ratio on roughness transfer in skin-pass rolling to DC04 grade sheet materials. *Industrial Lubrication and Tribology*, 73(4), 676–682. <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2020-0377>
- Ren, Z., Li, B., & Zhou, Q. (2022). Subsurface residual stress and damaged layer in high-speed grinding considering thermo-mechanical coupling influence. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(2), 835–847. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09965-9>
- Yu, H., Lu, C., Tieu, K., Li, H., Godbole, A., & Liu, X. (2019). Microstructure and mechanical properties of large-volume gradient-structure aluminium sheets fabricated by cyclic skin-pass rolling. *Philosophical Magazine*, 99(18), 1–20. <https://doi.org/10.1080/14786435.2019.1619948>

YAZAR REHBERİ

1. KAPSAM ve GENEL BİLGİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (GUFBD), Gümüşhane Üniversitesi'nin yayın organıdır. Dergi kapsamında bütün Fen, Teknoloji, Mühendislik, Tarım ve Mimarlık Alanlarında daha önce başka yerlerde yayınlanmamış, özgün, araştırma makaleleri, derlemeler ve editöre mektuplar yayınlanır (Anket çalışmaları dergimizin konu kapsamına uygun değildir).

Dergi bilimsel ve hakemli bir dergi olup, Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında olmak üzere yılda dört kez çevrimiçi ortamda yayımlanır.

Derginin amacı araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin bilimsel yayına dönüştürülmesi, ulusal ve uluslararası indekslere girerek evrensel bilime katkı sağlamaktır.

2. YAYIN DİLİ ve ANLATIM

Dergide yayınlanacak tüm yazılar için yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir. Anahtar kelimeler alfabetik sıralamaya uygun olarak verilir. İngilizce anahtar kelimeler (Keywords) ise yine bu sıralama dikkate alınarak yazılır.

Makale içerisinde yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmalara yönelik (Deneysel çalışmalar, analizler vb) anlatımlarda üçüncü şahıs kullanılmaya özen gösterilmelidir.

3. ELEKTRONİK ORTAMDA BAŞVURU

Dergi ile ilgili tüm yazışmalarda DergiPark tarafından sağlanan arayüz kullanılmalıdır. Dergi yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış makaleler, basılı kopyaya gerek olmaksızın, Ulakbim Dergipark üzerinden <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumusfenbil/> adresi kullanılarak gönderilmelidir. Dergiye makale göndermek isteyen yazarların yazım kuralları ile birlikte "Gönderi Kontrol Listesi"ndeki her maddeyi de kontrol etmeleri gerekmektedir. Makaledeki bilgilerin doğruluğunun sorumluluğu yazar(lar)a aittir.

Yayınlanacak makalelerde, araştırma ve yayın etiğine uygunluk esastır. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" doldurulup bütün yazarlar tarafından imzalanmalıdır. Yayın ile ilgili işlemler bu formun tesliminden sonra başlar. Bu formun farklı kopyaları başka şehirlerde yaşayan yazar(lar) tarafından ayrı ayrı imzalanıp gönderilebilir. Dergi ana sayfasında yer alan "Etik İlkeler ve Yayın Politikası" yazarlar tarafından önemle dikkate alınmalıdır.

Hayvanların veya zararlı maddelerin kullanıldığı araştırmalarda "Etik Kurul İzin Belgesi"nin makaleye eklenmesi gerekir. İnsanların denek olarak kullanıldığı araştırma sonuçlarını içeren makalelerde yazar(lar), "insan denemeleri üzerinde yetkili kurul" etik standartlarına ve gözden geçirilmiş Helsinki bildirgesi 1983'e uygunluğunu belgelemeleri gerekir.

4. DEĞERLENDİRME SÜRECİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'ne iletilen yazılar öncelikle dergi baş editörünün yönlendireceği alan editörü tarafından konu başlığı ve anahtar kelimelere dayanılarak biçimsel açıdan değerlendirilir. Ön kontrol aşamasında öncelikle intihal tespit yazılımları kullanılarak benzerlik raporları oluşturulur. Aday yayının benzerlik raporu toplamda %20 den az olmalı ve tek bir kaynaktan ise %4 oranından fazla olmamalıdır. Daha sonra incelenecek yayının dergi formatına uygun olup olmadığına karar verilir. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" olmayan veya eksik olan aday yayınlar ile benzerlik oranı sınırlarını aşan aday yayınlar ön incelemeye alınmaz. Ön inceleme aşamasını geçen yazılar dergi baş editörü tarafından inceleme sürecinin gerçekleştirilmesi için ilgili alan editörüne yönlendirilir.

Alan editörü bilimsel içerik bakımından değerlendirilmek üzere aday yayını, konusuna uygun olarak en az üç hakeme yönlendirir. Hakem seçiminde öncelikle konu ile ilgili dergi yayın danışma kurulu üyelerinden ya da alanında uzman başka bir bilim insanından yararlanılır. Hakemler değerlendirmeleri sonucunda, uygun, düzeltilerek yayınlanabilir, düzeltildikten sonra tekrar görmek isterim, istediğim düzeltmelerin kontrolünü derginin uzman bilimsel ekibi tarafından yapılması uygundur veya yayınlanamaz şeklinde kararları verebilirler.

Düzeltilme istenen yazılarla ilgili olarak yazar gerekli düzeltmeleri yapar. Ayrıca katılmadığı hususlarla ilgili olarak gerekçeli yazısını dergiye gönderir.

Hakem kurulu tarafından farklı türde değerlendirilen yazılar için alan editörü kendi görüşünü de ekleyerek değerlendirmenin sonuçlandırılması için baş editöre iletir. Değerlendirmede son karar baş editöre aittir. Baş editör gerekli görürse yeni bir hakem tayin eder veya yazı ile ilgili kararını sonuçlandırır.

Tüm değerlendirmeler sonucunda kabul ya da red kararı gerekçeleri ile birlikte DergiPark üzerinden yazışmadan sorumlu yazara iletir.

Değerlendirme sonucu kabul kararı verilecek makaleler yazım ve dil editörüne yönlendirilerek ilgili makalenin yazım ve dil yönünden incelemesi ile dergi yazım kuralları açısından uygunluğu sağlanır. Kabul edilen makaleler dergi sekreteryası tarafından esasa bağlı kalınarak yayına uygun formata dönüştürülür.

Dergide yayımlanan makaleler başka hiç bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Kısmen veya tamamen yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden hiçbir yerde kullanılamaz. Dergiye gönderilen makalelerin içerikleri özgün, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Değerlendirmeye sunulacak çalışmaların bir başka dergiye gönderilmediği veya basılmadığı ön yazı ile belirtilmelidir.

Makale basım için kabul edilmezse “Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu” nun yasal bir önemi kalmaz ve hükümsüz olarak kabul edilir. Bu formun imzalanması ile yazarlar, makalenin “Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi” dergisi ve web sayfasında yayınlamasına ilaveten makalenin tamamı veya bir kısmının yasal olarak çoğaltılması ve dağıtılması hakkını Gümüşhane Üniversitesi’ne devrederek, kendi haklarından feragat etmektedirler.

5. MAKALE TÜRLERİ

Dergide yayınlanan farklı yayın formatları ile ilgili bilgiler ve yazı türlerine göre yazarların dikkat etmeleri gereken hususlar şu şekildedir:

5.1 Araştırma Makaleleri: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Amaç, Gereç ve Yöntem, Bulgular, Tartışma ve Sonuçlar, gerekli ise Etik konular, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Makale konunun uzmanları tarafından tekrarlanabilecek şekilde yeterli bilgiyi içermelidir. Bu tür makalelerde ana metin 3500-4000 kelime arası olmalı, kaynak sayısı 40’ı aşmamalıdır.

5.2 Derlemeler: Yazar(lar)ın uzmanlık alanında yapılmış eski araştırmaların derlenip eleştirel bir şekilde yorumlanıp ortaya yeni bir görüş ileri süren çalışmaları kapsmalıdır. Bu tür makale öneren yazar(lar)ın en az 10 SCI-Expanded makalesi bulunmalı ve bunların en az 5 tanesi derleme yaptığı alanda olmalıdır. Derlemeler, Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Ana Bölümler, Alt Bölümler, Sonuç, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Ana metin en fazla 5000 kelime olup kaynak sayısında bir kısıtlama yoktur. Bu tür çalışmalar literatürle ilgili geniş bir tartışma ortaya koymalı ve kaynak sayısı en az 40 olmalıdır.

5.3 Editöre Mektup: Dergide yayınlanmış makaleler hakkında veya ilgili diğer konularda soru sormak, görüş bildirmek isteyenlerin yazıları bu türde değerlendirilir. Bu tür yazılarda kapsam ve etik kavramlar göz önünde bulundurulur. Ana metin en fazla 1000 kelime olup kaynak sayısı 10’u geçmemelidir.

6. MAKALENİN HAZIRLANMASI

Dergiye değerlendirilmek üzere yayın gönderecek yazarların GUFBD makale şablonu dosyasını dikkate alarak yayınlarını hazırlamaları ve gerekli olan diğer belgelerle birlikte sisteme yüklemeleri gerekmektedir.