



# GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

## FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Gümüşhane University Journal of Science

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ YAYINI

PUBLISHED BY GÜMÜŞHANE UNIVERSITY

ISSN 2146 - 538X

CILT/VOLUME: 13

SAYI/NUMBER : 3

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. Necati ÇELİK*

*Prof. Dr. Fatih DÖNER*

*Prof. Dr. Mehmet MERDAN*

*Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ*

*Prof. Dr. Serkan ÖZTÜRK*

*Prof. Dr. Halil YOLCU*

*Prof. Dr. Enver AKARYALI*

*Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ*

*Doç. Dr. Onur ARAZ*

*Doç. Dr. İlhan ÇELİK*

*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*

**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 / 07 / 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: 3 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. Charyar Ashyralyev- 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 GÖKÇEOĞLU-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. 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. Hilal YILDIZ-Neşehir Hacı Bektaş Veli Üni.  
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. Eda Feyza AKYÜREK-Atatürk Üni.  
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. Mustafa ÇULLU-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Serhat DAĞ-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. İbrahim DÜZGÜN-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Afşin Ahmet KAYA-Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Doç. Dr. Ayberk KAYA- Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi  
Doç. Dr. Selami KESLER-Pamukkale Üniversitesi  
Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI- Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Abdurrahman LERMI-N. Ömer Halisdemir Üni.  
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. Osman ÜÇÜNCÜ-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Alaaddin VURAL-Ankara Üniversitesi  
Doç. Dr. Sefa YALVAÇ-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Cem YÜCEL-Gümüşhane Üniversitesi  
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 Zuhul OKCU-Atatürk Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Abdulveli SIRAT-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

Ali ÇELİK	<b>Soğuk iklim bölgelerinde LEED sertifikalı eğitim binasının pandemi bağlamında değerlendirilmesi</b> <i>Evaluation of LEED certified education building in cold climate regions in the context of pandemic</i>	<b>500</b>
Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK Serkan KILIÇTEK Serkan GÖK Necdet YAKUT	<b>Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma</b> <i>A research on the comparison of additive manufacturing technologies</i>	<b>517</b>
Hasan TÜRE	<b>Adsorption of methylene blue dye onto alginate-bioglass membranes: response surface method, isotherm, and kinetic studies</b> <i>Metilen mavisi boyasının aljinat-biyocam membranlara adsorpsiyonu: Cevap yüzey yöntemi, izoterm ve kinetik çalışmalar</i>	<b>538</b>
Açelya AKLAN Önder AYBASTIER	<b>Beyaz hindibadan (Cichorium intybus L.) antioksidan maddelerin ultrasonik destekli ekstraksiyon parametrelerinin kemometrik optimizasyonu</b> <i>Chemometric Optimization of Ultrasonic Assisted Extraction Parameters of Antioxidants from White Chicory (Cichorium intybus L.)</i>	<b>553</b>
Tolga ÖZER Atakan KABOĞLU	<b>Gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü tasarımı ve uygulaması</b> <i>Design and implementation of voltage and current controlled buck converter</i>	<b>566</b>
Hadaan PEHLİVAN	<b>Nano silis katkılı trakitik tüf esaslı geopolimer harçların farklı kür ortamlarında özelliklerinin incelenmesi</b> <i>Nano silica added trachytic tuff based geopolymer mortars investigation of properties in different curing environment</i>	<b>580</b>
Rüya SAĞLAMTAŞ	<b>Investigation of the inhibition effect of pitaya (hylocereus guatemalensis) bark extracts on some metabolic enzymes</b> <i>Pitaya (hylocereus guatemalensis) kabuğu ekstraktlarının bazı metabolik enzimler üzerine olan inhibisyon etkisinin araştırılması</i>	<b>595</b>
Yusuf Doruk ARACAGÖK	<b>An investigation of the Trypan blue dye's biosorption on fungal biomass</b> <i>Tripan mavi boyasının fungal biyokütle ile biyosorpsiyonu hakkında bir çalışma</i>	<b>605</b>
Zarife GÜLTEKİN Serhat DAĞ	<b>Investigation of changes in geomechanical properties of sandstones under different saturation and anisotropy conditions: Example from Gümüşhane (NE Türkiye)</b> <i>Farklı doygunluk ve anizotropi koşullarında kumtaşlarının jeomekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi: Gümüşhane örneği (KD Türkiye)</i>	<b>616</b>
Aydanur GÜNGÖR GÖKBOĞA Muhammet Mustafa KAHRAMAN	<b>Maden sektörü iş sağlığı ve güvenliği mevzuatının karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi</b> <i>Comparative analysis and evaluation of occupational health and safety legislation in mining</i>	<b>632</b>
Sinan BİÇER Habib DOĞAN İbrahim Bahadır BAŞYİĞİT Abdullah GENÇ	<b>Endüktif iris yapısı kullanarak C-bandında bant geçiren dikkörtgen dalga kılavuzu filtrenin analitik olarak tasarımı</b> <i>Analytical design of band-pass waveguide filter in C-band using inductive iris</i>	<b>646</b>
Seda ÖZARPACI Batuhan KILIÇ Mehmet KÖKÜM Uğur DOĞAN	<b>GNSS hızlarında kümelemeyen topluluk kümelemesine: Meta-kümeleme odaklı bir yaklaşım</b> <i>From clustering to ensemble clustering in GNSS velocities: A Meta CLustering-based approach</i>	<b>661</b>

Salih GENEL	<b>Biyokütlenin heterojen katalizör varlığında katalitik hidrotermal sıvılaştırma yöntemi ile sıvılaştırılması ve elde edilen ürünlerin karakterizasyonu</b> <i>Liquefaction of biomass by catalytic hydrothermal liquefaction in the presence of heterogeneous catalyst and characterization of the obtained products</i>	<b>675</b>
Zülfü GÜROCAK Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU	<b>Bazalt fiber kullanımının düşük plastisiteli kilin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi</b> <i>The effect of basalt fiber use on the unconfined compressive strength of low plasticity clay</i>	<b>688</b>
Mert ÖKTEN	<b>Isı ve elektrik enerjisi üretimi için doğal gazı yeşil bir çözüm: Güneş enerjisi uygulamalarıyla bir örnek olay incelemesi</b> <i>A green solution to natural gas for heat and electric power generation: A case study with solar energy applications</i>	<b>702</b>
Arif Furkan MENDİ	<b>Edge ai technology in the defense industry via reinforcement learning in simulation environments</b> <i>Simülasyon ortamlarında pekiştirmeli öğrenme yoluyla savunma sanayinde uç yapay zeka teknolojisi</i>	<b>718</b>
Leyla KARAGÖZOĞLU Zeynep Bala DURANAY	<b>Yapay sinir ağları kullanılarak fotovoltaik sistemin maksimum güç noktası takibi</b> <i>Maximum power point tracking of the photovoltaic system using artificial neural networks</i>	<b>733</b>
İhsan GÜNEŞ Mustafa Kemal BİRGİN	<b>Implementing data warehouse infrastructure for an e-learning system</b> <i>Uzaktan eğitim sistemi için veri ambarı altyapısının geliştirilmesi</i>	<b>750</b>
İsmet ABACI Kazim YILDIZ	<b>SMOTE vs. KNNOR: An evaluation of oversampling techniques in machine learning</b> <i>SMOTE ve KNNOR: Makine öğreniminde aşırı örnekleme tekniklerinin değerlendirilmesi</i>	<b>767</b>

---

## Soğuk iklim bölgelerinde LEED sertifikalı eğitim binasının pandemi bağlamında değerlendirilmesi

*Evaluation of LEED certified education building in cold climate regions in the context of pandemic*

Ali ÇELİK\*<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi 25050, Erzurum

• Geliş tarihi / Received: 10.01.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 15.07.2023

### Öz

Günümüzde insanlar hayatlarının büyük bir kısmını kapalı ortamlarda geçirmektedir. Bunun için kullanıcılarının sağlığını da doğrudan etkilemesi bakımından, binaların pandemiye karşı dayanımlı olması gerekir. Aynı zamanda binalarda bulaşma ve bulaşma hızının azaltılması yönünde gerekli önlemlerin de alınması da şarttır. Yine eğitim binaları da hastalıkların bulaşma olasılıklarının ve yayılma hızlarının yüksek olduğu binalardır. Bu nedenle bütüncül bakış açısıyla eğitim binalarında SARS-CoV-2 virüsünün içeri girme olasılığının ve yayılım ile öğrencilere bulaş riskinin azaltılması için yeterli tedbirlerin alınması gerekir. Bu çalışmada; Erzurum Teknik Üniversitesi kampüsündeki uluslararası LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) yeşil bina sertifikasına sahip Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasının SARS-CoV-2 virüs risk yönetimi ve iç ortam hava kalitesi parametrelerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. COVID-19 (SARS-CoV-2) virüsünün bulaşma ve bulaşma hızının azaltılması yönünde HVAC (Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme) ile ilgili faktörlere bağlı olarak alınması gereken önlemlerin önemi vurgulanmıştır. Çalışmada amfi dersliklerde yapılan ölçümlerde; CO<sub>2</sub> konsantrasyonları ortalama 645.68 ile 897.25 ppm aralığında, iç ortam sıcaklıkları 18 ile 24 °C aralığında, hava hızları 0.161 m/s ile 0.194 m/s aralığında ve bağıl nemin de %45.35rH ile %58.96 rH aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin uluslararası standartlara uygun olduğu belirlenmiştir. Analiz sonuçları; COVID-19 sürecinde yeşil binalarda eğitim ve öğretim faaliyetlerinin daha güvenli yürütülebileceğini göstermektedir. Yine LEED sertifika kriterlerinin pandemilere karşı güvence olduğu da belirlenmiştir. Sonuçlar; eğitim binalarında gelecekte oluşabilecek pandemiye karşı iç hava kalitesi bakımından güvenlik önlemlerinin belirlenmesine de rehber olabilir.

**Anahtar kelimeler:** COVID-19, İç ortam hava kalitesi, LEED, Sağlıklı binalar

### Abstract

Today, people spend most of their lives indoors. For this, the buildings must be resistant to pandemics in terms of directly affecting the health of their users. However, it is essential to take the necessary measures to reduce the rate of contamination and contamination in buildings. Likewise, educational buildings are buildings where the transmission probability and spread rate of diseases are high. Therefore, from a holistic point of view, adequate measures should be taken to reduce the possibility of the entry of the SARS-CoV-2 virus in educational buildings and the risk of its spread and transmission to students. In this study; The SARS-CoV-2 virus risk management and indoor air quality parameters of the Faculty of Engineering and Architecture building, which has the international LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) green building certificate, on the campus of Erzurum Technical University were evaluated. The importance of the measures to be taken depending on the factors related to HVAC (Heating, ventilation and air conditioning) in order to reduce the transmission and transmission rate of the COVID-19 (SARS-CoV-2) virus was emphasized. In the measurements made in lecture halls; It was determined that CO<sub>2</sub> concentrations were between 645.68 and 897.25 ppm on average, indoor temperatures were between 18 and 24 °C, air velocities were between 0.161 m/s and 0.194 m/s, and relative humidity was between 45.35%rH and 58.96% rH. It has been determined that these values are in accordance with international standards. The results of the analysis show that education and training activities can be carried out more safely in green buildings during the COVID-19 process. It has also been determined that LEED certification criteria are assurances against pandemics. Results; It can also guide the determination of security measures in terms of indoor air quality against future pandemics in educational buildings.

**Keywords:** COVID-19, Indoor air quality, LEED, Healthy buildings

\*Ali ÇELİK; ali.celik@erzurum.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Pandemiler insanlık için gelecek zamanda da büyük bir tehlike olarak olumsuz etkileri ile artarak yaşanmaya devam edilecektir. Dünyamız 2019 yılında Çin'in Hubei bölgesinin başkenti olan Vuhan kökenli koronavirüs ailesinin yeni bir türü olan SARS-CoV-2 (COVID-19) salgını ile tanışmıştır (Nie vd., 2020; Gou vd., 2020). COVID-19 Dünya Sağlık Örgütü tarafından 11 Mart 2020'de pandemi olarak ilan edilmiştir (Chowdhury vd., 2021; World Health Organization, 2020). Küresel COVID-19 salgınının, ekonomi, insanlar ve yaşam tarzı üzerindeki etkisi yıllarca hissedilecektir (Türk Toraks Derneği, 2020). Bu nedenle; mevcut binaların ve yeni yapılacak binaların salgın hastalıkların yayılmasına karşı dayanımlı sağlıklı binalar olarak dizayn edilmesi çok önemlidir. Sağlıklı binalarla; pandemi ve enfeksiyon virüslerinin bina içine girme olasılığının azaltılması, bina içinde yayılım ile bina kullanıcılarına bulaşma riskinin ortadan kaldırması hedeflenmektedir (Rehva, 2020). Daha net bir ifade ile binaların pandeminin olumsuz etkilerine karşı korunması amaçlanmaktadır. COVID-19 virüsüne etkin kontrol yöntemi geliştirebilmek için bulaş dinamiklerinin anlaşılması gerekir (Türk Toraks Derneği, 2020). COVID-19 salgınının bulaş hızının azaltılmasında; pandemi mücadelesinde etkili olduğu bilinen bir dizi enfeksiyon önleme ve kontrol işlemlerinin tüm yaşam alanlarında, belirlenmesi ve sağlanması önemlidir (YÖK, 2020). Virüs enfeksiyonundan korunmada en önemli tedbirlerden; sosyal mesafe, hijyen kuralları ve uzman önerilerine uymak her bireyin öncelikli sorumluluğudur (Türk Toraks Derneği, 2020). COVID-19 virüsünün yayılmasını önlemek için sadece sosyal mesafe, hijyen ve kişisel korunma tedbirleri (maske, siperlik gibi) öncelikli dikkat edilecek hususlar olarak kabul ediliyor olsa da gelecek yıllarda bu önlemlerin yeterli olmayacağı yaşanan tecrübelerle belirlenmiştir (Cleanroom, 2020). COVID-19 hastalığından kendimizi ve başkalarını korumak için alınacak önlemlerin tespitinde öncelikle virüsün nasıl yayıldığına belirlenmesi önemlidir (Rehva, 2020). Bu konuda yapılan bir çalışmada Vozzola ; üniversite binalarında COVID-19 virüsüne karşı alınması gerekli önlemleri değerlendirmiş ve iyileştirilmesi ile ilgili öneriler sunmuştur (Vozzola, 2020). Yine yapılan başka bir çalışmada; özellikle kalabalık ve havalandırmanın yetersiz olduğu iç ortamlarda virüslerin hava yoluyla bulaşma riskinin daha güçlü olduğu kanıtlarla sunulmaktadır (Coleman vd., 2018; Nishiura vd., 2020). Araştırmacılar çalışmalarında; COVID-19 pandemi döneminde sınıflarda mekanik havalandırma sisteminin olmamasını havanın yeterince yenilenemeyeceği olarak kabul etmektedirler. Bu kritik durumda hiç havalandırılmayan veya yeterince havalandırılmayan sınıflarda enfekte asemptomatik bir kişinin virüs içeren bir aerosolü sadece nefes alıp vererek bile sınıf içine yaymasının mümkün olduğu belirlenmiştir (Di Gilio vd., 2021).

Eğitim binalarında günde birkaç saat ders yapılması bile SARS-CoV-2 bulaşma olasılığını artırmaktadır. Bununla birlikte okullarda pandemiyi önlemek için daha etkili temiz hava değişimini benimseyen havalandırma stratejileri geliştirilmelidir. Aslında kapalı ortamlarda özellikle de kalabalık bir sınıfta geliştirilmiş havalandırma sistemi ile SARS-CoV-2 virüsünün yayılması önlenemez. Bunun için son bilimsel literatürde hava yoluyla bulaşan virüslerin yayılımının azaltılmasının iç ortamlarda yeterli havalandırma ile sağlanabileceği öngörülmektedir (Morawska vd., 2021; Villanueva vd., 2021). Beggs (2020) tarafından yapılan çalışmada simülasyon sonuçları; kapalı ortamda, enfekte olmuş bir insanın konuşması ile aynı havayı soluyan diğer insanlara enfeksiyonun bulaşmasına yetecek kadar virüs içeren aerosoller olduğunu göstermiştir. SARS-CoV-2 gibi bulaşıcı solunum yolu hastalıklarının yayılma riskinin en belirgin göstergesi CO<sub>2</sub> konsantrasyon yoğunluğudur. Bunun için CO<sub>2</sub> seviyelerinin izlenmesi gereklidir. Kapalı ortamlarda insan sayısına bağlı olarak artan CO<sub>2</sub> seviyesi enfeksiyonun yayılma ihtimalini de yükseltmektedir (Peng vd., 2021). Araştırmacılar bu çalışmada; yüksek öğretim kurumlarında anti-Coronavirus (COVID-19) tedbirlerini analiz ederek önlemlerin iyileştirmesi için bir metodoloji önermektedirler (Wehbe & Shahrour, 2021). COVID-19 yayılımının azaltılmasında havalandırmanın çok önemli olduğu kabulü ile bazı araştırmacılar iç ortam hava kalitesini değerlendirmek için Bina Bilgi Modellemesi (BIM)'i kullanmışlardır (Gan vd., 2019; Sporr vd., 2019; Wehbe & Shahrour, 2019).

Yeşil binalar genel olarak; enerji ve su kullanımının azaltılmasını, inşaat sürecinde çevreye olan olumsuz etkileri minimuma indirmeyi hedeflemektedir. Aynı zamanda yeşil binalar insanların sağlığını düşünerek hijyenik iç ortamların oluşturulmasını da amaçlamaktadırlar. Araştırmacılar çalışmalarında; yeşil bina kriterlerinden olan iç mahal hava kalitesinin hijyenik ortam tasarımına etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar yeşil binaların iç ortam kalitesi bakımından geleneksel binalara göre daha iyi olduğunu ve insan sağlığını korumaya yönelik olduğunu göstermiştir (Allen vd., 2015). LEED kriterlerinde devam eden iyileştirmelerle

bina kullanıcılarına yüksek kaliteli iç mahal ortamlarının oluşturulması da amaçlanmaktadır (U.S. Green Building Council, 2013). Kanada da bir üniversite kampüsünde LEED sertifikalı iki bina ile bir geleneksel binada bulunan 319 kişiyle iç ortam hava kalitesi parametreleri ile ilgili memnuniyet anket yapılmıştır. Anket sonucu; LEED sertifikalı binaların geleneksel binalara kıyasla havalandırma ve hava kalitesi bakımından çok daha iyi olduğunu ayrıca daha az öksürük / akışırma yaşandığını göstermiştir. Yani LEED sertifikalı binalarda insanların daha sağlıklı ve yüksek performanslı olduğu belirlenmiştir (Hedge vd., 2014). 2020 yazında Amerikan Yeşil Binalar Konseyi (USGBC), binalarda sağlıklı alanlar oluşturulması için dört LEED kriteri daha yayınladı. Bu krediler; iş yerinde pandemi tedbirlerinin alınması, ortak ya da kamu kullanımına açık alanların temizlenmesi ve dezenfekte edilmesi, salgın süresinde iç mahal hava kalitesi yönetilmesi, sıhhi tesisat sistemlerinin kontrolü olarak özetlenebilir (U.S. Green Building Council, 2020). Yine bu çalışmada; birçok sürdürülebilirlik derecelendirme sistemlerinin (WELL, Fitwel ve LEED) kapalı alanlarda insanların sağlıklarını korumak ve pandemiyi önlemek için geliştirdikleri stratejilerin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Sonuçlar bu stratejilerin pandemi gereksinimlerini karşılayacak şekilde yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Marotta vd., 2021). Sertifikalı binaların pandemilere karşı, mekanik havalandırma sistemleri ve bina içinde virüs tutmasını engelleyici malzemelerle (boyalar, zemin kaplamaları) kaplı olmasından dolayı küresel salgına karşı daha dayanımlı olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca LEED sertifikalı binaların tasarım prensipleriyle geleneksel tasarlanmış binalara göre kullanıcılarına daha sağlıklı ortamlar sağladığı inancı da giderek artmaktadır.

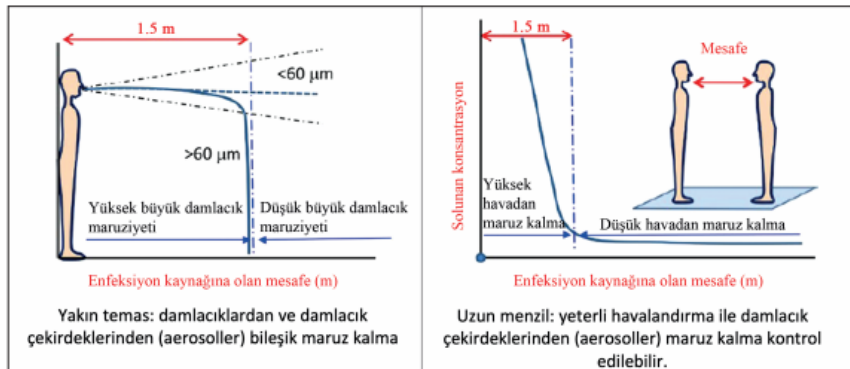
## 1.1. COVID-19 yayılım yolları

### 1.1. COVID-19 spread ways

Kesin olarak virüsün ve enfeksiyonun özellikleri ortaya konamamış olsa da günümüzde bulaşmanın çoğunlukla temas ve hava/damlacık yoluyla olduğu bildirilmektedir. Genel anlamda bulaş riskini azaltmak için; yakın temastan kaçınmak yani fiziksel mesafe, havadan bulaşmayı azaltmak için de havalandırma, yüzey temasını önlemek için ise el hijyeni çok önemlidir. Pandemilerin bulaşma yolları, hızları ve senaryoları binadan binaya farklılık göstermektedir. COVID-19 temelde üç yolla bulaşır (Rehva, 2020):

- (1) İnsanların 1-2 m yakın temas bölgesinden hapşırma, öksürme, şarkı söyleme, bağırma, konuşma ve nefes alma sırasında yayılan damlacıklar yoluyla havadan bulaşma (Peng vd., 2020; World Health Organization, 2020).
- (2) uzun menzilli havadan (aerosol bazlı) bulaşma (Bennett vd., 2002).
- (3) el-el, el-yüzey vb. temaslarla yüzey (fomit) temasında bulunma ile bulaşma.

Bir COVID-19 partikülünün boyutu yaklaşık 0.08-0.16 mikrondur (80-160 nm) (Monto, 1974). Spesifik temizlik yapılmadıkça yüzeylerde saatlerce veya birkaç gün boyunca aktif yaşayabilirler (Doremalen vd., 2013). İç mahal koşullarında 3 saate kadar ve yine iç mahal yüzeylerinde 2-3 gün aktif kalabilirler (Doremalen vd., 2020). Havada virüsler çıplak değildir ve solunum sıvısı damlacıklarının içinde bulunurlar. Genelde havada kalan küçük damlacıklardır. Virüsler; havalandırma sistemlerinin dönüş kanalları ve hava resirkülasyonu olan sistemlerde ise besleme kanalları vasıtasıyla uzun mesafelere ulaşabilir. Bu nedenle, özellikle binaların havalandırma ve iklimlendirme sistemleri tasarım ve işletme bakımından bina içinde salgın hastalıklarının yayılımını önleyecek şekilde olmak zorundadır. COVID-19 virüsünün havadan iletim yolları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. COVID-19 virüsünün havadan iletim yolları (Liu vd., 2017)

Figure 1. Airborne transmission routes of the COVID-19 virus



İnsanlar gün içinde zamanlarının büyük kısmını kapalı alanlarda geçirdiği için bu alanların pandemiye karşı dayanımlı olması zorunludur. Yani kapalı alanlarda virüslerin bulaşma ve bulaş hızının azaltılması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu çalışmada kapalı alan olarak ele alınacak eğitim binaları da hastalıkların bulaşma olasılıklarının ve yayılma hızlarının yüksek olduğu binalardır. Hayatımızda sürekli var olacak salgın hastalıklardan korunmanın sadece hastanelerdeki sağlık önlemleriyle mümkün olamayacağı da bilinmektedir. Bu nedenle binaların COVID-19 gibi salgınlara karşı dirençli olması için bina projelerinin geleneksel yaklaşımlara göre değil de hem pandemiye dayanımlı hem de çevreye zarar etkisi az olan yapılar üreten bireylerin sağlıklı yaşam kalitelerini amaçlayan; uluslararası standartlara uygun hazırlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada; eğitim kurumları için yeşil bina kriterleri ile öğrencilere çevreye duyarlı ve sağlıklı bir eğitim ortamı oluşturmayı hedefleyen sertifikaya sahip olmanın aynı zamanda bir binayı pandemi ve salgın hastalıklara karşı koruma da avantajlı hale getirebildiğinin analizi yapılmıştır.

## 2. Materyal ve metod

### 2.1. Material and method

Erzurum Teknik Üniversitesi kampüsündeki LEED sertifikalı Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasının SARS-CoV-2 ve benzeri virüslere dayanımının belirlenmesi için iç ortam hava kalitesi parametrelerinin ölçülmesi yapılmıştır. Sınıflarda koronavirüs gibi patojenlerin yayılmasında etkili olan CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, sıcaklık, nem ve mekanik havalandırma hızına ait ölçümler ders saatleri baz alınarak yapılmıştır. Bu değerlerin ölçümünde sınıf içlerindeki iç hava kalitesi cihazları ile çoklu ölçüm cihazı kullanılmıştır.

### 2.1. Referans bina ve özellikleri

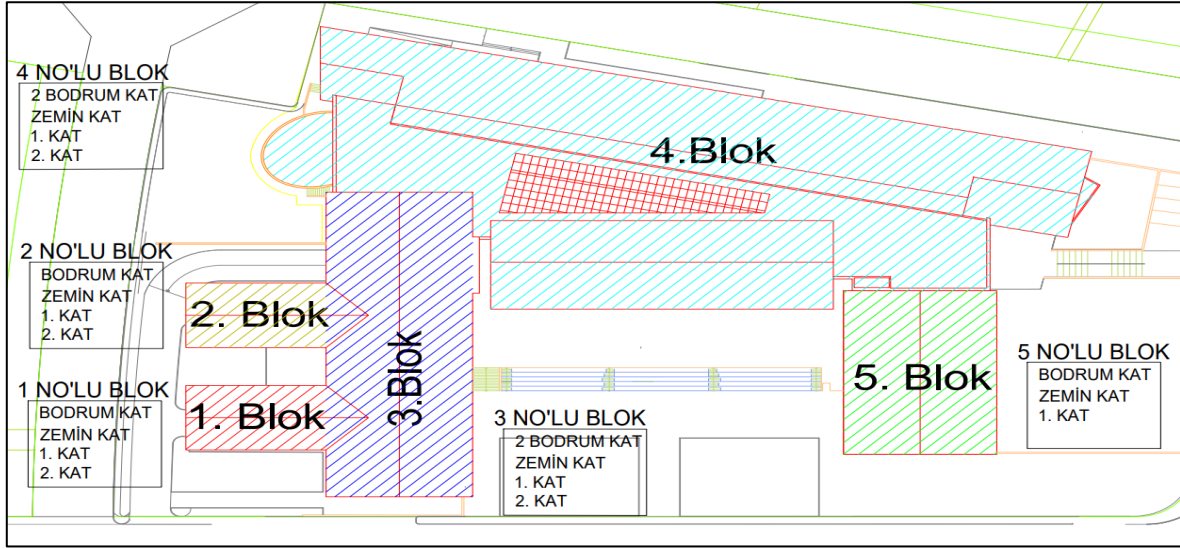
#### 2.1.1. Reference building and features

Erzurum Teknik Üniversitesi kampüsü şehir merkezinden 3 km uzaktadır. Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binası 39°92'N, 41°24'E coğrafi koordinatlarında 25 245 m<sup>2</sup> kapalı alana sahiptir. Fakülte binasının genel görünümü de Şekil 2'de verilmektedir. Bina toplam 5 bloktan oluşmaktadır. 1 ile 2'nci bloklar bodrum kat +zemin kat +2 normal kattan, 3 ve 4'üncü bloklar 2 bodrum kat + zemin kat + 2 normal kattan, 1'inci blok ise bodrum zemin kat+1 adet normal kattan oluşmaktadır. 1, 2 ve 3'üncü bloklarda öğretim üyelerin odaları, 4'üncü blokta derslikler, 5'inci blokta da dekanlık ofisleri bulunmaktadır (Şekil 3).



**Şekil 2.**Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi genel görünümü  
**Figure 2.**General view of Erzurum Technical University Faculty of Engineering and Architecture

Erzurum Teknik Üniversitesi genelde yazların kısa ve serin, kışlar ise uzun soğuk ve karlı geçtiği bir şehirde bulunmasından dolayı soğuk iklim bölgesindedir. Erzurum'da meteoroloji istasyonunda yaklaşık 80 yılı bulan gözlem sonuçlarına göre, en soğuk ay ortalaması -8.6 °C, en sıcak ay ortalaması 19.6 °C, en düşük sıcaklık -35 °C ve en yüksek sıcaklık ise 35 °C olarak tespit edilmiştir. Kar yağın gün sayısı 50 ve karın zeminde durma süresi ise 114 gün civarındadır (Bakırcı vd., 2006).



**Şekil 3.** Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi vaziyet planı

**Figure 3.** Erzurum Technical University Faculty of Engineering and Architecture site plan

1998 yılından itibaren uygulanmaya başlanan LEED sertifika sistemi, Amerikan Yeşil Binalar Konseyi (USGBC) tarafından geliştirilmiş çevre dostu bina sertifikasyon sistemidir. Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi; dünyada ve Türkiye’de en çok tercih edilen insan, doğa ve çevreye duyarlı yapılar tasarlamayı öncelik kabul eden LEED SILVER seviyesinde sertifika almaya hak kazanmıştır. Bu kapsamda; referans bina uluslararası LEED yeşil bina sertifikasını almak için; sürdürülebilir arazi, su kullanımında etkinlik, enerji, atmosfer, malzeme, kaynaklar, iç hava kalitesi, inovasyon ve tasarım gibi kriterleri sağlayacak şekilde yapılmıştır. Yine LEED Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemi ilgili kredi başlıkları Pandemi ve Enfeksiyon Dayanımlı Bina Tasarımına doğrudan etki eden konuları da kapsadığından bina COVID-19 risklerine karşı dayanımlı olarak kabul edilebilir. Binanın sahip olduğu uluslararası LEED yeşil bina sertifikası Şekil 4’te verilmektedir.



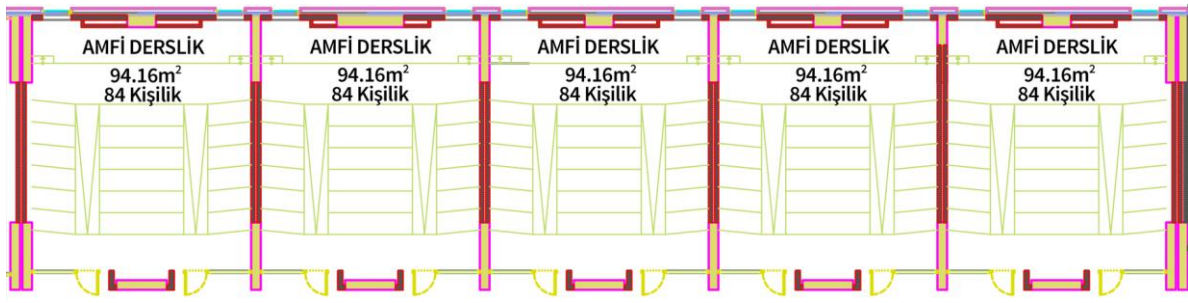
**Şekil 4.** Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi LEED sertifikası

**Figure 4.** LEED certificate from the Faculty of Engineering and Architecture

### 2.1.1. Dersliklerin Özellikleri

#### 2.1.1.1. Features of Classrooms

Çalışmada ölçümlerin yapıldığı derslikler yaklaşık 95 m<sup>2</sup> ve 84 kişilik olarak tasarlanmıştır (Şekil 5). Sınıflarda 120 cm x 220 cm ölçülerinde iki kapı ve 120 cm x 210 cm ölçülerinde iki adette pencere bulunmaktadır. Sınıf duvarları LEED şartı olarak iç hava kalitesini yükseltebilmek amacıyla düşük kimyasal uçucu organik bileşikler (VOC) içeren boya ile boyanmıştır. Yine sınıf döşemeleri tamamen geri dönüştürülebilir ve bakteri oluşumunu engelleyen hijyenik bir kaplama olan linolyum ile kaplanmıştır.



**Şekil 5.** Dersliklerin kat planları  
**Figure 5.** Floor plans of classrooms

## 2.2. Referans binanın ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri

### 2.2. Heating, ventilation and air conditioning systems of the reference building

Binalarda COVID-19 virüsünün hava yolu ile bulaşma riski mekanik sistemlerde alınan tedbirlerle büyük ölçüde azaltılabilir. Binaların ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri virüs ve bakterilerin en belirgin dolaşım yoludur. Pandemi sürecine kadar bu sistemler genelde enerji verimliliğini artıracak şekilde tasarlanırken bundan sonraki tasarımlarda mutlaka pandemi senaryolarının da göz önüne alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. Şekil 6'da COVID-19 virüsüne karşı alınması gerekli önlemler arasında mühendislik kontrolleri olarak havalandırma sistemlerinde alınacak önlemlerin diğer idari kontroller ve kişisel koruyucu ekipman uygulamalarından daha etkili olduğu görülmektedir.



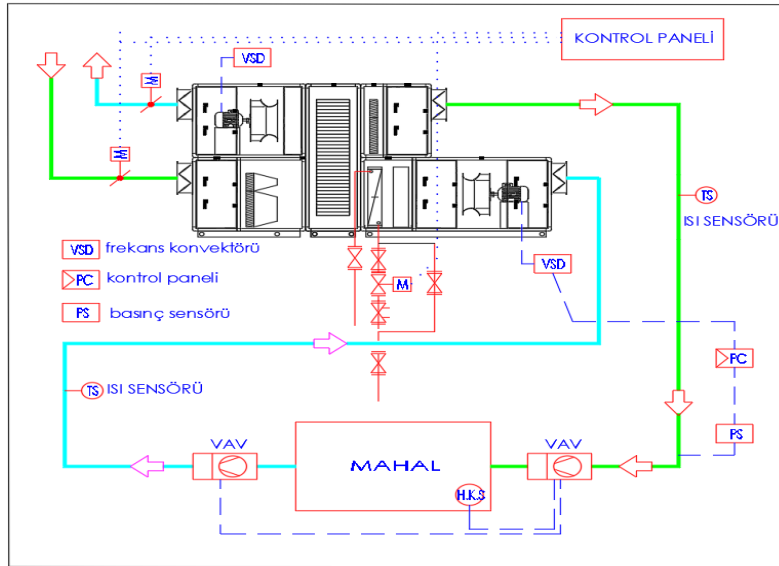
**Şekil 6.** ABD hastalık kontrol merkezlerinden uyarılan enfeksiyon kontrol piramidi (U.S.CDC, 2015)

**Figure 6.** Infection control pyramid adapted from the U.S. centers for disease control

LEED yeşil bina sertifikasına sahip binalar da bu sistemler hem enerji hem de sağlıklı iç ortamlar sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Böylece COVID-19 bulaşma riskleri de en aza indirilmektedir. Havalandırma sistemlerinin COVID-19 virüsünün bulaş riskinin azaltılması için %100 dış hava ile çalışması gerekmektedir. Yine havalandırma sistemlerinde monte edildikleri yüzeye paralel radyal veya yönsel üfleme yapan difüzörler ile bakteri ve virüsünün bulaş riskinin azaltılması sağlanmaktadır.

Erzurum Teknik Üniversitesi kampüsündeki Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binası havalandırma sistemi LEED kriterine uygun olarak resirkülasyonu olmayacak şekilde imal edilmiştir. %100 taze havalı sistem hem sınıflarda hem de personel odalarında mevcuttur. Mühendislik fakültesi havalandırma-iklimlendirme sistemine ait akış şeması Şekil 7'de verilmektedir.

Ayrıca iç mahallerde LEED kriterlerinin sağlanması ve gerekli iç konforun oluşturulması adına havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde kullanılan filtreler ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers) standart 52.2-2007 uyarınca MERV 14 (Filtrelerin verimlilik derecesi) kategorisinde seçilmiştir (ASHRAE, 2007). LEED Sertifikalı binalarda MERV 13 sınıfından aşağıda bir filtre kullanılması kabul edilmemektedir. Böylece bu filtreler ile bakteri ve virüslerin yayılımının azaltılması virüs tutucu ince gözenekler sayesinde sağlanmaktadır. Yine WC aspiratörleri de negatif basınç oluşturacak şekilde tasarlanmıştır.

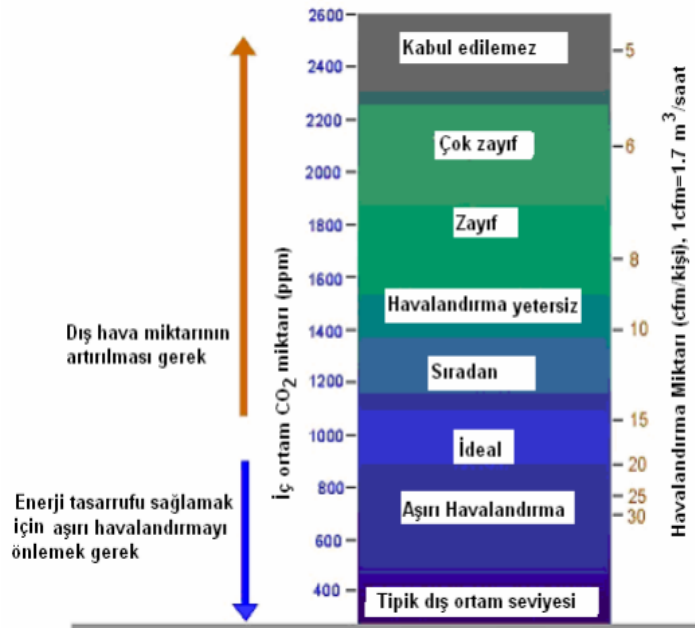


Şekil 7. %100 taze havalı iklimlendirme santrali akış şeması  
Figure 7. 100% fresh air air handling unit flow chart

### 2.3. Referans binada iç mahallerde CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ölçümü

#### 2.3. CO<sub>2</sub> concentration measurement indoors in the reference building

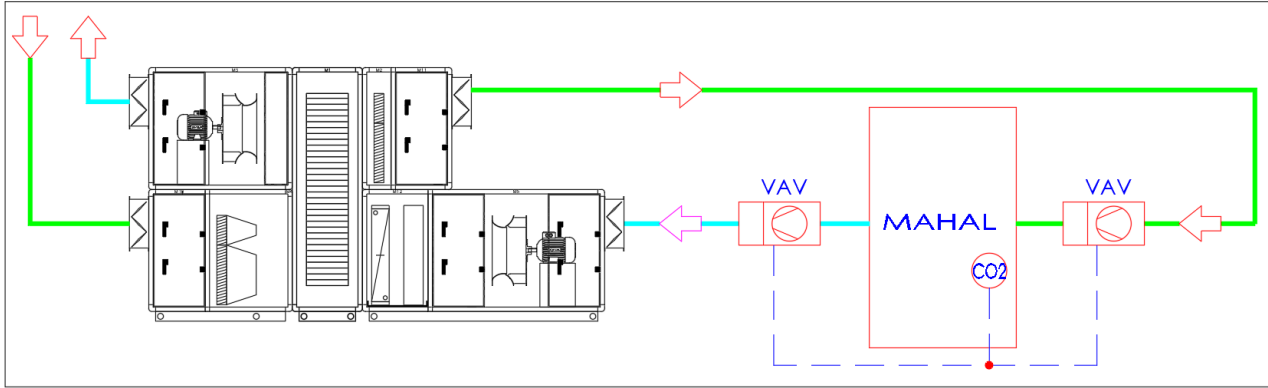
Kapalı ortamlarda CO<sub>2</sub> miktarı iç hava kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. CO<sub>2</sub> yoğunluğunun ana sebebi insanlar ve dış kirleticilerdir. İç ortamda CO<sub>2</sub> yoğunluğunun az olması sadece konfor için değil, sağlık ve verimlilik için de gereklidir. Bu sebeple kapalı ortamlarda iç hava kalitesinin belirlenmesinde CO<sub>2</sub> değerlerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu ölçümler iç ortamlara konulan CO<sub>2</sub> sensörleri ile yapılmaktadır. Kapalı alanlarda CO<sub>2</sub> yoğunluğuna bağlı olarak eğer limitler aşılmışsa kabul edilebilir iç hava kalitesi oluşturmak için CO<sub>2</sub> sensörleri havalandırma sistemleri vasıtasıyla, gerekli temiz havayı iç ortama yönlendirmektedirler. Referans değer altındaki değerler mahaldeki iç havanın hem konfor hem de sağlık açısından kabul edilebilir olduğunu gösterir. Yine iç mahallerde CO<sub>2</sub> seviyesi referans değerinin altında ise havalandırma kısılabilir ve enerji tasarrufu da yapılabilir. CO<sub>2</sub> seviyesi ile havalandırma arasındaki ilişki ise Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. CO<sub>2</sub> seviyesi ile havalandırma arasındaki ilişki (Bas, 2004)

Figure 8. Relationship between carbon dioxide level and ventilation

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasında sınıflarda ve diğer bütün mahallerde en az enerji harcanarak ısı konfor ve iç hava kalitesi (CO<sub>2</sub> konsantrasyonuna göre çalışan) havalandırma sistemleri ile sağlanmakta ve akış şeması Şekil 9'da verilmektedir.



**Şekil 9.** CO<sub>2</sub> kontrollü %100 havalı iklimlendirme sistemi  
**Figure 9.** CO<sub>2</sub> controlled 100% air conditioning system

Bundan dolayı bütün mahallerde Şekil 10'da verilen CO<sub>2</sub> sensörleri mevcuttur ve hassasiyeti  $\pm 1$ ppm'dir. Sistem; CO<sub>2</sub> yoğunluğu 900 ppm seviyesine geldiğinde VAV (Değişken Hava Debili) kutusunun tam açık konuma, 600 ppm seviyesine geldiğinde ise minimum açık konuma gelmesi için CO<sub>2</sub> sensörü tarafından komut gönderecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 10'da iç hava kalite ölçüm cihazı verilmektedir.



**Şekil 10.** İç hava kalitesi cihazı (CO<sub>2</sub>, bağıl nem, sıcaklık)  
**Figure 10.** Indoor air quality device (CO<sub>2</sub>, relative humidity, temperature)

Dersliklerde sensörler tarafından yapılan ölçümlerde iç mahal hava kalite parametreleri fazla belirlendiğinde havalandırma sisteminin stratejisine bağlı olarak sürekli daha düşük değerlerde tutulması nispi enfeksiyon riskini de azaltmaktadır. Ayrıca bu ölçümler COVID-19 ve diğer solunum yolu hastalıklarının bulaşma riskinin kontrol altında tutulduğunu da göstermektedir. Bunun sonucunda elde edilen iç mahaller kullanıcıların ruh ve beden sağlığına da hayati derecede katkı bulunmaktadır.

#### 2.4. İç mahal havalandırma sistemlerinde taze hava hızı ölçümü 2.4. Fresh air velocity measurement in indoor ventilation systems

Hava hızlarının ortam sıcaklığına da bağlı olarak 0,20 ile 0,30 m/s aralığında olması hem rahatsız edici hava akımına hem de bakteri ile virüsün yayılım hızının artmasına da sebep olmaktadır. Mühendislik ve Mimarlık

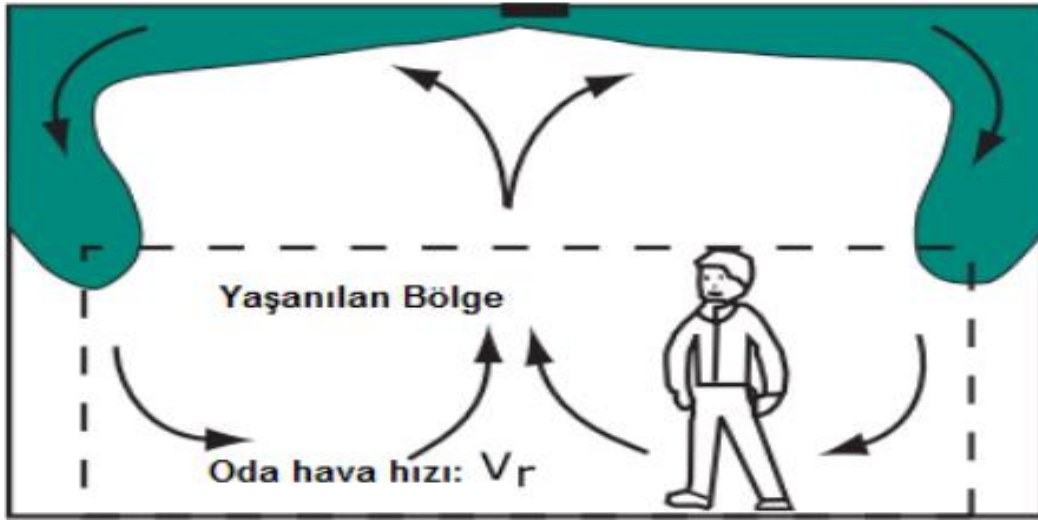
Fakültesinde mahallerdeki hava hız ölçümleri Testo 435 el tipi cihazı ile gerçekleştirilmiştir ve hassasiyeti  $\pm 1\text{ppm}$ 'dir (Şekil 11).



**Şekil 11.** Çoklu ölçüm cihazı (CO<sub>2</sub>, CO, hava hızı, sıcaklık, nem, mutlak basınç, ışık şiddeti, U-değeri)

**Figure 11.** Multimeter (CO<sub>2</sub>, CO, air velocity, temperature, humidity, absolute pressure, luminous intensity, U-value)

Kapalı ortamlarda hava hareketi hem insanları rahatsız etmesi hem de COVID-19 virüsünün havalandırma sistemi ile bulaş riski bakımından önemlidir. Bunun için kapalı ortamlarda havalandırma sistemlerinde difüzör kullanılması önerilmektedir. Tavan tipi difüzörler monte edildikleri yüzeye paralel radyal veya yönsel üfleme yapmaktadır. Yani bir noktadan yönlendirilmiş bir hava akışı söz konusu değildir. Şekil 12’de tavan tipi difüzörler tarafından yayılan havanın akış formu verilmektedir.



**Şekil 12.**Tavan tipi difüzörün hava akış formu (ASHRAE, 2010)

**Figure 12.** Air flow form of ceiling diffuser

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinde de tavan tipi difüzörler kullanılarak hem insanların hava akımından rahatsız olmaması hem de bakteri ve virüsünün bulaş riskini azaltması amaçlanmıştır. Şekil 13’te Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi sınıf ile ofislerinde kullanılan tavan tipi difüzörler gösterilmiştir.



**Şekil 13.**Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi sınıf ve ofislerinde kullanılan tavan tipi difüzörler

**Figure 13.** Ceiling diffusers for use in engineering and architecture faculty classrooms and offices

## 2.5. İç mahallerde sıcaklık ve bağıl nemin ölçülmesi

### 2.5. Measuring temperature and relative humidity indoors

İklimlendirme sistemleri ile kapalı ortamların bağıl nemi ve sıcaklığı kontrol altına alınarak standartta belirlenen iç ortam değerleri elde edilebilir. Kapalı ortamlarda bazı virüslerin yayılmasının hava sıcaklıkları ve nem oranları ile sınırlandırılabilceği öngörülmektedir. SARS-CoV-2 virüslerinin yayılımının önlenilebileceği düşünülerek sınıf içinde bulunan hava kalitesi cihazı ve çoklu ölçüm cihazı ile nem ve sıcaklık değerleri de ölçülmüştür (Şekil 10).

## 2.6. Referans değerleri

### 2.6. Reference values

Birçok ülkede iç hava kalitesini belirlemede kullanılan standartlar mevcuttur. Bina iç mahallerinde temiz ve sağlıklı hava elde etmek için ASHRAE 62.1-2010 Standartlarına ait kriterler kullanılabilir. ASHRAE Standartlarına göre iç hava kalitesi ile ilgili kullanılan sınır değerler Tablo 1’ de verilmiştir. ASHRAE 62-1989 Standardında CO<sub>2</sub> 'nin konsantrasyonu normal bir çalışma günü için 1000 ppm olarak verilmektedir (ASHRAE,1989). Eğer CO<sub>2</sub> konsantrasyonu bu değerden düşükse iç mahallin hava kalitesi kabul edilebilir düzeylerde dir.

Amfi tarzı dersliklerde öğrenci başına verilmesi gereken hava debisi ASHRAE 62.1-2007 standardında 3.8 L/s (13.7 m<sup>3</sup> /h) olarak verilmiştir. ASHRAE 62.1-2013 standardının taze hava gereksiniminin hesaplanmasında iç ortam insan sayısı bilinmediği takdirde hesaplarda insan yoğunluğu (öğrenci sayısı / 100 m<sup>2</sup>) değerleri de kullanılmaktadır (Tablo 1).

**Tablo 1.** ASHRAE standartlarına göre bazı iç mahal değerleri ve gereksinimleri  
**Table 1.** Some interior values and requirements according to ASHRAE standards

CO <sub>2</sub> konsantrasyonu	1000 ppm
Mahal sıcaklığı (ısıtmada)	20-22 °C
Mahal sıcaklığı (soğutmada)	24-26 °C
İç yüzey sıcaklığı	17-19 °C
Döşeme sıcaklığı	18-20 °C
Tavan sıcaklığı	18-20 °C
Hava hızı	≤ 0.2 m/s
Bağıl hava nem oranı	%40-60
Düşeyde sıcaklık farkı	≤ 3 °C

**Tablo 1.** ASHRAE standartlarına göre bazı iç mahal değerleri ve gereksinimleri (Devam)  
**Table 1.** Some interior values and requirements according to ASHRAE standards (Continue)

Derslik (Lecture classroom) Öğrenci başına hava debisi L/s.öğrenci ( $m^3/h.öğrenci$ )	3.8 (13.7)
Derslik (Lecture classroom) Alan başına ek hava debisi l/s.m <sup>2</sup> ( $m^3/hm^2$ )	0.3 (1.08)
Derslik (Lecture classroom) Öğrenci başına öngörülen alan m <sup>2</sup> /öğrenci	1.54

### 3. Bulgular

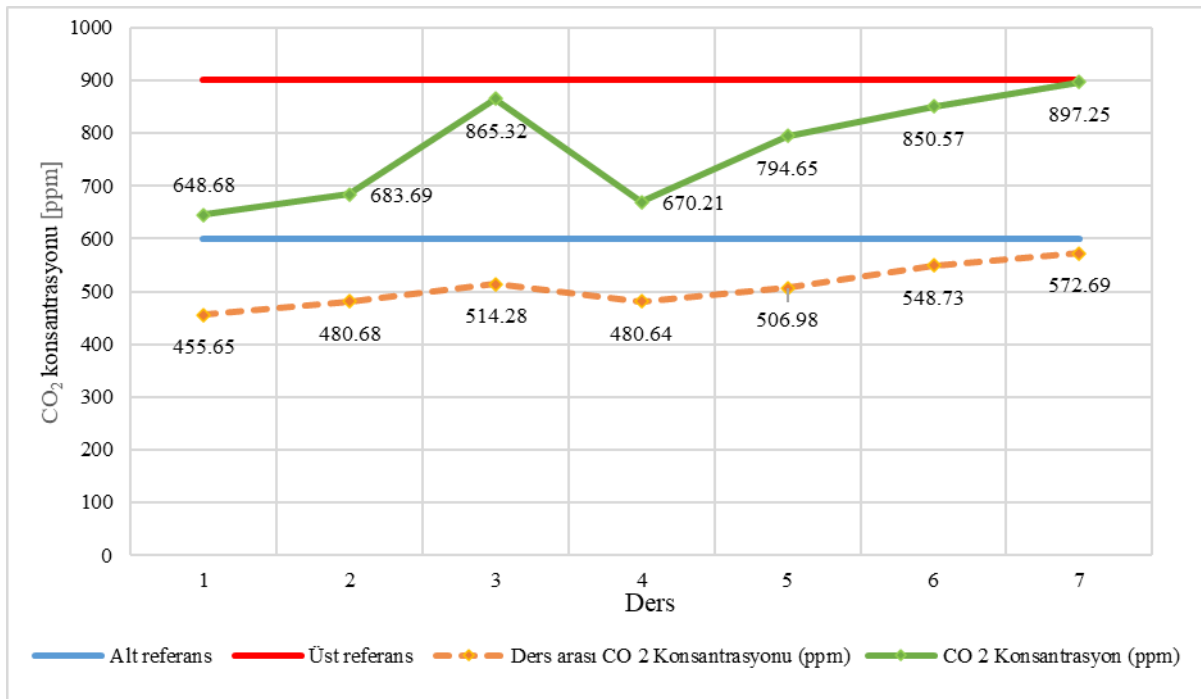
#### 3. Results

Bu çalışmada; Türkiye’de üniversitelerde yüz yüze eğitimin başladığı 2021-2022 eğitim öğretim yılı içerisinde referans binanın pandemiye karşı dayanıklılığı analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında; Erzurum Teknik Üniversitesi kampüsündeki LEED sertifikalı Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasında amfi dersliklerde Ekim 2021-Aralık 2021 tarihleri arasında ders saatleri baz alınarak ölçümler yapılmıştır. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasında bir sınıfta her gün yaklaşık 50 dk süreli yedi ders yapılmaktadır. Çoğunlukla da her ders arasında 10 dk ara verilmektedir. Çalışmada elde edilen ölçümlerin ortalaması kullanılmıştır. Amfi dersliklerdeki ölçümlerde CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, hava hızı, sıcaklık ve bağıl nem ile ilgili veriler elde edilmiştir. Ölçüm alınan sınıfların doluluğu yaklaşık 6 ile 24 kişi arasında değişmektedir. Dış ortam havası için CO<sub>2</sub> konsantrasyonu 460 ile 580 ppm arasında değişmektedir. Ders aralarında pencerelerin açılması durumu göz önüne alındığından sınıfta kalan öğrenci sayısının iç hava kalitesine etkisi ihmal edilmiştir.

#### 3.1. CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun belirlenmesi

##### 3.1. Determination of CO<sub>2</sub> concentration

Sınıflarda yapılan ölçümlerde CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının ASHRAE standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Şekil 14’te ders saatlerinde ve ders aralarında CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun değişimi gösterilmektedir. Sınıflarda ders saatlerinde CO<sub>2</sub> konsantrasyonu maksimum değerlerinin ortalaması 897.25 ppm geçmemektedir. Değerler 900 ppm yaklaştığında CO<sub>2</sub> sensörleri komut göndererek VAV kutusu tam açık konuma gelmektedir. Aynı şekilde CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun en küçük ortalama değeri 645.68 ppm olarak ölçülmüş ve bu durumda VAV kutusu minimum açık konumda olacak şekilde tasarlanmıştır. Sınıflarda ders olmadığına CO<sub>2</sub> konsantrasyonu 455.65 ppm ile 572.69 ppm arasında ölçülmüştür. Her ders arasında CO<sub>2</sub> konsantrasyonu oranı da düşmektedir.

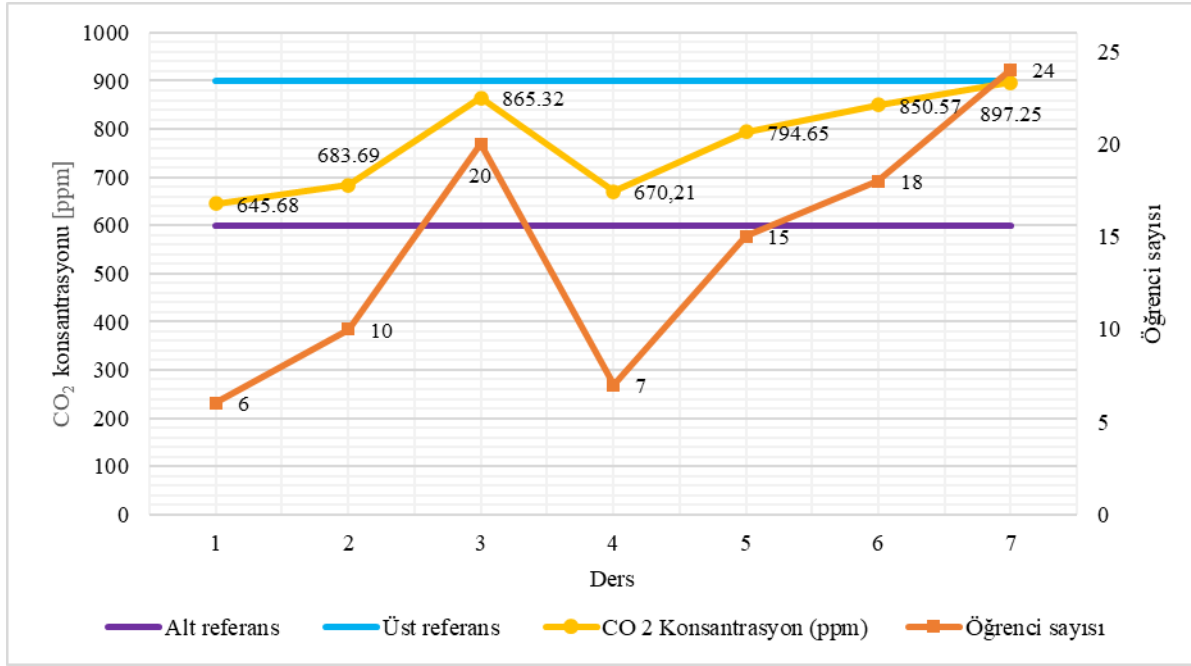


**Şekil 14.** Ders saatlerinde ve aralarda CO<sub>2</sub> konsantrasyonu

**Figure 14.** CO<sub>2</sub> concentration during class hours and breaks



Sınıflarda ders saatlerinde ortalama öğrenci sayısının CO<sub>2</sub> konsantrasyonuna etkisi Şekil 15’te verilmektedir. Sınıflarda CO<sub>2</sub> kaynağı öğrenci olduğundan öğrenci sayısının artışına göre CO<sub>2</sub> konsantrasyonu da artmaktadır. Sınıf içinde öğrenci sayısı 25 kişi olduğunda CO<sub>2</sub> konsantrasyonu maksimum olmaktadır.



**Şekil 15.** Öğrenci sayısının CO<sub>2</sub> konsantrasyonuna etkisi  
**Figure 15.** The effect of the number of students on the CO<sub>2</sub> concentration

### 3.2. Hava hızının ölçülmesi

#### 3.2. Measuring airspeed

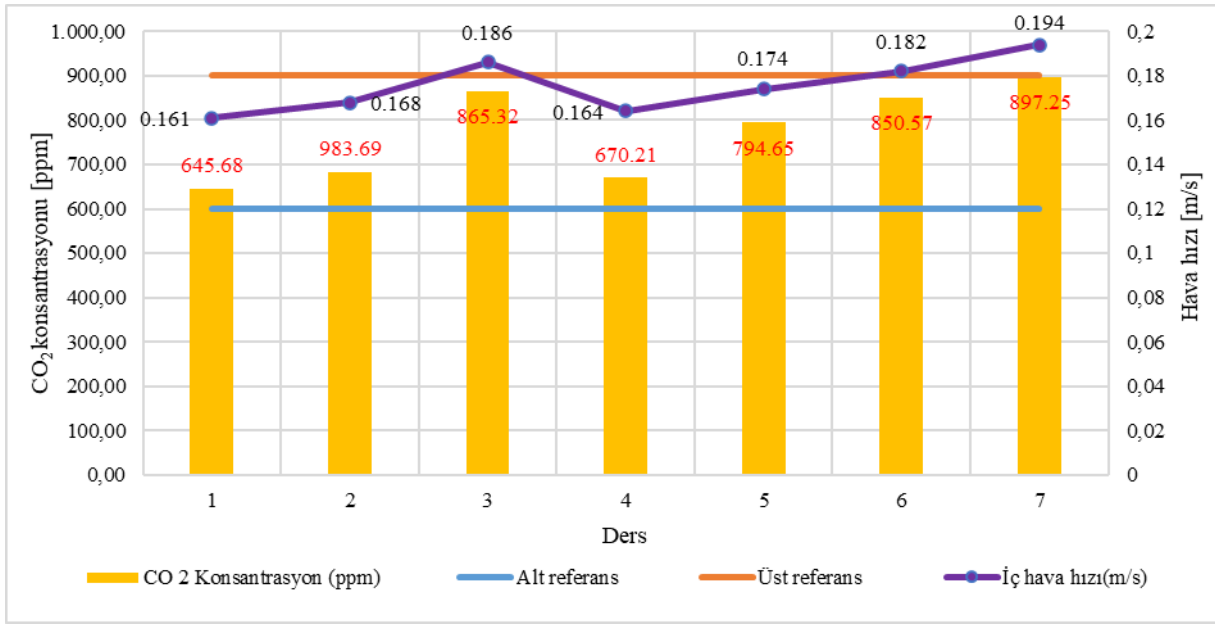
Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi havalandırma proje hesaplamalarında ASHRAE 62.1-2007 standardına göre dersliklerde öğrenci başına hava debisi 3.8 L/s olarak alınmıştır. LEED kriterlerinde iç mahallerin havalandırması için dersliklere verilen taze hava oranları standardının %30 daha fazlası olarak kabul edilmekte böylece bina kullanıcılarının daha sağlıklı ve konforlu bir ortama sahip olmaları sağlanmaktadır. Tablo 2’de verilen proje hesaplarında standarta göre dersliklerde normal hava debisi 1563.5 m<sup>3</sup>/h belirlenmiş iken LEED’e göre artış yapılarak 2032.6 m<sup>3</sup>/h olarak hesaplanmış ve dersliklerde havalandırma cihazları 3000 m<sup>3</sup>/h hava debisini sağlayacak şekilde imal edilmiştir. Daha fazla havalandırma ile iç mahal kirleticileri seyreltilerek salgının yayılmasına da yardımcı olunmaktadır. Mühendislik ve Mimarlık fakültesinde bir sınıf için gerekli taze hava miktarı Tablo 2’de verilmektedir.

**Tablo 2.** Dersliklerde havalandırma debi hesabı  
**Table 2.** Calculation of ventilation flow in classrooms

Mahal	Havalandırma sınıfı (Ashrae)	Alan (m <sup>2</sup> )	İnsan sayısı	Hava dağıtım verimliliği	ASHRAE 62.1 2007 Standartına göre havalandırma hesabı				LEED’e göre %30 ilaveli hava debisi (m <sup>3</sup> /h)	
					Kişi başına hava debisi (L/s öğrenci)	Toplam kişiye göre hava debisi (L/s)	Alan başına hava debisi (L/s m <sup>2</sup> )	Toplam alana göre hava debisi (L/s)		Toplam hava debisi (m <sup>3</sup> /h)
Derslik	Educational facilities: Lecture classroom	94.18	84	0.8	3.8	319.2	0.3	30	1563.5	2032.6

Dersliklerde yapılan ölçümlerde, hava hızlarının ASHRAE 62.1-2010 Standartlarına göre iç mahaller için belirlenen 0,20 m/s den daha düşük olduğu ortalama maksimum ve minimum değerleri 0.161 m/s ile 0.194

m/s aralığında değiştiği görülmektedir. Şekil 16'da görüldüğü üzere CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun maksimum olduğu derste hava hızı da en yüksek değerde olmakta böylece iç hava kirleticilerinin seyreltilmesi sağlanmaktadır.

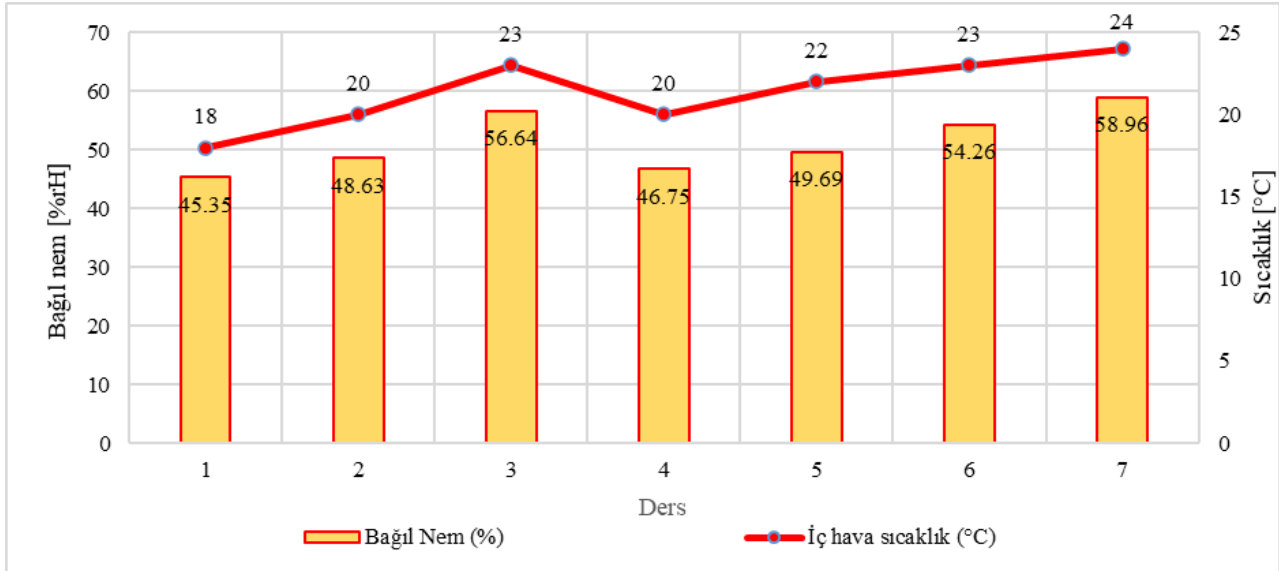


Şekil 16. Havalandırma hızı ve CO<sub>2</sub> konsantrasyonu  
Figure 16. Ventilation rate and CO<sub>2</sub> concentration

### 3.3. Sıcaklık ve bağıl nemin ölçülmesi

#### 3.3. Measuring temperature and relative humidity

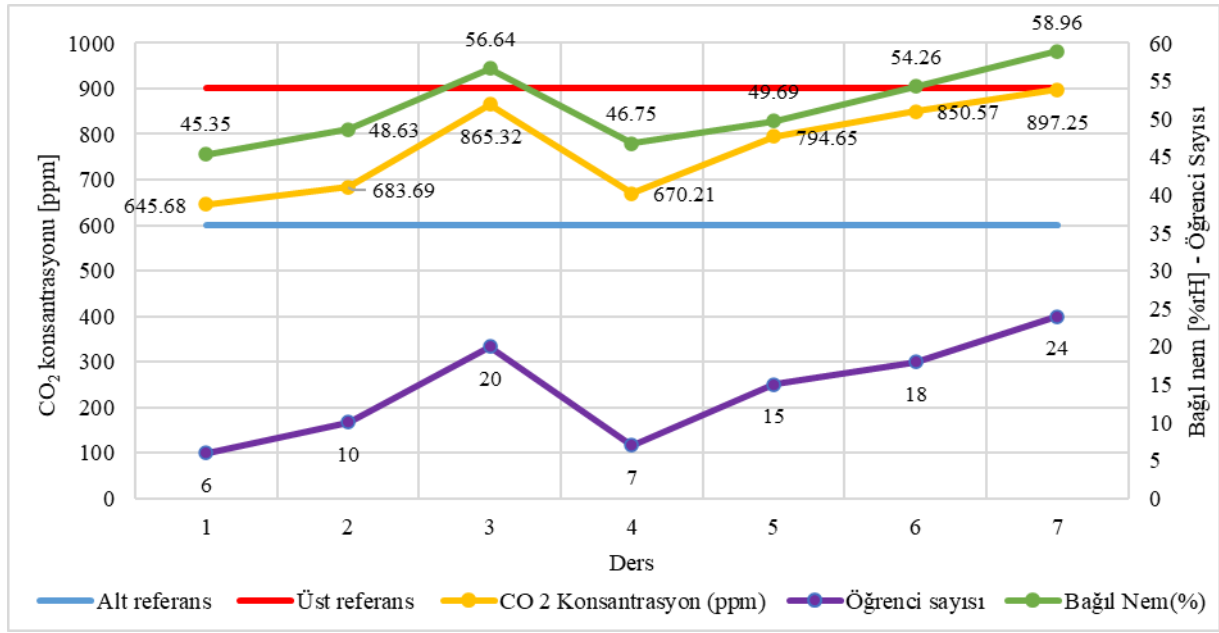
Şekil 17'de görüldüğü üzere dersliklerde ortalama iç ortam sıcaklığı 18 °C ile 24 °C aralığında değişmektedir. Nem oranı da minimum %45,35 rH ve maksimum %58,96 rH ortalama değerler olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarının standartlarda verilen aralıkta olduğu belirlenmiştir.



Şekil 17. Bağıl nem ve iç hava sıcaklığı

Figure 17. Relative humidity and indoor air temperature

Dersliklerde, öğrenci sayısına bağlı olarak CO<sub>2</sub> konsantrasyonu yükselmekte ve bağıl nem de bu CO<sub>2</sub> yoğunluğunun maksimum olduğu derslerde en yüksek değerlerini almaktadır. Şekil 18'de CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, bağıl nem ve öğrenci sayının etkileşimi gösterilmektedir.



Şekil 18.CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, bağıl nem ve öğrenci sayısı

Figure 18. CO<sub>2</sub> concentration, relative humidity and number of pupils

#### 4 Tartışma ve sonuçlar

##### 4. Discussion and conclusions

Küresel pandemi olarak tanımlanan COVID-19 tipi salgınların önümüzdeki yıllarda da hayatımızı tehdit edeceği bellidir. Bu çalışmada, binalarda COVID-19 yayılımının engellemesi için bina tasarımlarının uluslararası standartlara uygun bütüncül bir bakış açısı ile salgın hastalıklara yol açan bakteri ve virüslere dayanımlı ilkelere göre tasarlanarak inşa edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Eğitim binalarında derslerin kapalı ortamlarda çok sayıda öğrenci ile yapılması nedeniyle SARS-CoV-2 bulaşmasını kontrol altına almak zordur. Kapalı ortamlarda iç hava kalitesi pandeminin bulaş riskinin kontrolünde önemli bir faktördür. Bu nedenle dersliklerin SARS-CoV-2 bakımından güvenli olması için iç hava kalite parametrelerinin sürekli izlenmesi gerekir. Elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa;

-Ders zamanında yapılan ölçümlerde CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ortalama 645.68 ppm ile 897.25 ppm aralığında ölçülmüştür. Öğrenci sayısına bağlı olarak CO<sub>2</sub> konsantrasyonunda artış gözlenmiştir.

-Ders aralarında öğrenci sayısı ve pencere açılması durumuna bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonu azalmaktadır. Böylelikle yeni derse girişte teneffüste kalan öğrenci sayısına da bağlı olarak derslikte yeni bir CO<sub>2</sub> konsantrasyonu oluşmaktadır. Ölçüm sonuçlarında sınıflarda ders saatinde ve aralarda yeterli temiz hava olduğu belirlenmiştir.

-Hava hızlarının ortalama maksimum ve minimum değerleri 0.161 m/s ile 0.194 m/s aralığında değiştiği belirlenmiştir. Hava hızının CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu doğrudan etkilediği görülmektedir. Ayrıca binanın iklimlendirme ve havalandırma sistemlerinde kullanılan filtreler MERV 14 (Filtrelerin verimlilik derecesi) kategorisinde olduğundan iç hava kirlenmeleri en az seviyede ve hava hızının da standartın altında olduğu belirlenmiştir.

-Dersliklerde ortalama; iç ortam sıcaklığı 18°C-24°C aralığında, bağıl nemi ise %45.35 rH ile %58.96 rH aralığında ölçülmüştür. Sıcaklık değerinin yüksek olduğu derste nem oranı da maksimum değerdedir. Yine bağıl nemin yüksek olduğu ders saatlerinde CO<sub>2</sub> konsantrasyon yoğunluğunun da maksimum olduğu belirlenmiştir.

Koronavirüsün bulaşında etkili parametrelerle ilgili dersliklerde yapılan ölçümlerin standartların tavsiye ettiği değerlerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler LEED sertifikalı binalarda ders ortamlarının pandemiye karşı daha güvenli olduğunu göstermektedir. Ayrıca pandemi sırasında kış mevsiminin uzun sürdüğü ve ders zamanında pencerelerinin sürekli açık tutulmadığı göz önüne alındığında yeterli havalandırma ile

SARS-CoV-2 virüs enfeksiyonunun yayılmasının azaltılabileceği de kanıtlanmıştır. Bu çalışma verilerinden yeşil binaların pandemiye karşı bir yüz maskesi gibi olduğu ifade edilebilir.

Gelecek çalışmalarda; küresel COVID-19 virüsünün mutasyona uğramasından dolayı bulaş hızı ve yolları değiştiği için LEED sertifikalı binalarda HVAC sistemlerinde UV lambalı sistemlerin kullanılmasının değerlendirilmesi yapılabilir. Uluslararası normlarda sağlıklı bina sertifikasının kullanıcıların sağlık açısından güvenli oldukları duygusu ile ilgili anket çalışmaları da yapılabilir.

### **Yazar katkısı**

*Author contribution*

Yazar çalışmanın tamamını kendisi yapmıştır.

### **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*

- Allen, J. G., MacNaughton, P., Laurent, J. G. C., Flanigan, S. S., & Eitlend, E. S. (2015). Green buildings and health. *Current Environmental Health Reports*, 2, 250–258. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0063-yhrae>
- ASHRAE Standard 52.2. (2007). *Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta
- ASHRAE Standard 62. (1989). *Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta
- ASHRAE Standard 62.1. (2010). *Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta
- Bakırcı, K., Özyurt, Ö., Yılmaz, M., & Erdoğan, S. (2006). Erzurum ili enerji çalışmaları için iklim ve meteoroloji verileri. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 95, 19-26
- Bas, E. (2004). *Indoor air quality- a guide for facility managers* (2nd ed). The Fairmont Press. [https://www.academia.edu/34932675/Indoor\\_air\\_quality\\_a\\_guide\\_for\\_facility\\_managers](https://www.academia.edu/34932675/Indoor_air_quality_a_guide_for_facility_managers)
- Beggs, C.B. (2020). Is there an airborne component to the transmission of COVID-19?: a quantitative analysis study. *MedRxiv*, 1. <https://doi.org/10.1101/2020.05.22.20109991>
- Bennett, D. H., McKone, T. E., Evans, J. S., Nazaroff, W. W., Margni, M. D., Jolliet, O., & Smith, K. R. (2002). Defining intake fraction. *Environmental Science and Technology*, 36(9), 207A–211A. <https://doi.org/10.1021/es0222770>
- Chowdhury, M. A., Shuvho, M. B. A., Shahid, M. B. A., Haque, M. A., Kashem, M. A., Lam, S. S., Ong, H. C., Uddin, M. A., & Mofijur, M. (2021). Prospect of biobased antiviral face mask to limit the coronavirus outbreak. *Environmental Research*, 192, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110294>
- Cleanroom. (2020). *Yaşam bilimleri ve temiz oda teknolojileri gazetesi*, 22. <https://cleanroomnews.org/sayi-22>
- Coleman, K. K., Nguyen, T. T., Yadana, S., Hansen-Estruch, C., Lindsley, W. G., & Gray, G. C. (2018). Bioaerosol sampling for respiratory viruses in singapore's mass rapid transit network. *Scientific Reports*, 8, 17476. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35896-1>

- Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., & de Gennaro, G. (2022). CO<sub>2</sub> concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, 202, 111560. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>.
- Doremalen, N. V., Busahmaker, T., & Munsater, V.J. (2013). Stability of Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) under different environmental conditions. *European communicable disease bulletin*, 18(38). 1-4. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.es2013.18.38.20590>
- Doremalen, N. V., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., & Munster, V. J. (2020). Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*, 382(16).1564-1567. <https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMc2004973>
- Gan, V. J. L., Deng, M., Tan, Y., Chen, W., & Cheng, J.C.P. (2019). BIM-Based framework to analyze the effect of natural ventilation on thermal comfort and energy performance in buildings. *Energy Procedia*, 158, 3319–3324. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.971>
- Guo, Y. R., Cao, Q. D., Hong, Z.-S., Tan, Y.-Y., Chen, S. D., Jin, H. J., Tan, K. S., Wang, D. Y., & Yan, Y. (2020). The Origin, transmission and clinical therapies on coronavirus disease 2019 (COVID-19) Outbreak-An Update on the Status. *Military Medical Research*, 7, 11. <https://doi.org/10.1186/s40779-020-00240-0>
- Hedge, A., Miller, L., & Dorsey, J. (2014). Occupant comfort and health in green and conventional university buildings. *Work*, 49(3), 363–72. <https://doi.org/10.3233/WOR-141870>
- Liu, L., Li, Y., Nielsen, P. V., Wei, J., & Jensen, R. L. (2017). Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*, 27(2), 452-462. <https://doi.org/10.1111/ina.12314>
- Marotta, A., Porras-Amores, C., & Rodríguez Sánchez, A. (2021). Resilient built environment: critical review of the strategies released by the sustainability rating systems in response to the COVID-19 pandemic. *Sustainability*, 13(20), 11164. <https://doi.org/10.3390/su132011164>
- Monto, A. S. (1974). Medical reviews. Coronaviruses. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, 47(4), 234–251.
- Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluysen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S., Floto, A., Franchimon, F., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J. L., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L. C., Mazzarella, L., Melikov, A. K., Miller, S., Milton, D. K., Nazaroff, W., Nielsen, P. V., Noakes, C., Peccia, J., Querol, X., Sekhar, C., Seppänen, O., Tanabe, S.-I., Tellier, R., Tham, K. W., Wargocki, P., Wierzbicka, A., & Yao, M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, 142, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>.
- Nie, J., Li, Q., Wu, J., Zhao, C., Hao, H., Liu, H., Zhang, L., Nie, L., Qin, H., Wang, M., Lu, Q., Li, X., Sun, Q., Liu, J., Fan, C., Huang, W., Xu, M., & Wang, Y. (2020). Establishment and validation of a pseudovirus neutralization assay for SARS-CoV-2. *Emerging Microbes & Infections*, 9, 680–686. <https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1743767>
- Nishiura, H., Oshitani, H., Kobayashi, T., Saito, T., Sunagawa, T., Matsui, T., Wakita, T., T, M. C. R., & Suzuki, M. (2020). Closed environments facilitate secondary transmission of coronavirus disease 2019 (COVID-19). *MedRxiv*, 3. <https://doi.org/10.1101/2020.02.28.20029272>
- Peng, X., Xu, X., Li, Y., Cheng, L., Zhou, X., & Ren, B. (2020). Transmission routes of 2019-NCov and controls in dental practice. *International Journal of Oral Science*, 12, 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41368-020-0075-9>
- Peng, Z., & Jimenez, L. J. (2021). Exhaled CO<sub>2</sub> as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(5), 392-397. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183>
- Rehva. (2020). *COVID-19 kılavuz belgesi*. Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. [https://www.rehva.eu/fileadmin/user\\_upload/REHVA\\_COVID-19\\_guidance\\_document\\_V4\\_23112020.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4_23112020.pdf)
- Sporr, A., Zucker, G., & Hofmann, R. (2019). Automated HVAC control creation based on building information modeling (bim): Ventilation system. (*IEEE*), 7, 74747–74758. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919262>

- Türk Toraks Derneği. (2020). *COVID-19 dünyasında kapalı alanlar toplantısı*. [https://www.toraks.org.tr/site/sf/documents/pre\\_migration/e7862032a9e89031acf8d9d817752532dcf6d7e27115c6225ba0c1da30852393.pdf](https://www.toraks.org.tr/site/sf/documents/pre_migration/e7862032a9e89031acf8d9d817752532dcf6d7e27115c6225ba0c1da30852393.pdf)
- U.S. CDC. (2015). *Hierarchy of controls. centers for disease control and prevention*. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2015-197/pdfs/2015-197.pdf>
- U.S. Green Building Council (USGBC). (2013). *LEED reference guide for building operations and maintenance, v4*. <https://www.usgbc.org/guide/om>
- U.S. Green Building Council (USGBC). (2020). *Releases new LEED guidance to address COVID-19 and support buildings with reopening strategies*. <https://www.usgbc.org/articles/usgbc-releases-new-leed-guidance-address-covid-19-and-support-buildings-reopening>
- Villanueva, F., Notario, A., Cabanas, B., Martín, P., Salgado, S., & Gabrield, M. F. (2021). Assessment of CO2 and aerosol (PM2.5, PM10, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: the case of a metropolitan area in Central-Southern Spain. *Environmental Research*, 197, 111092. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111092>.
- Vozzola, M. (2020). The support of graphic representation for the analysis of the distribution and the preparation of temporary works in the post pandemic period. *VITRUVIO- International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 5(2), 39-54. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2020.14480>
- Wehbe, R., & Shahrour, I. (2019). Use of bim and smart monitoring for buildings' indoor comfort control. *MATEC Web Conferences*, 295, 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929502010>
- Wehbe, R., & Shahrour, I. (2021). Assessment and improvement of anti-COVID-19 measures in higher education establishments. *Sustainability*, 13(11), 5989. <https://doi.org/10.3390/su13115989>
- World Health Organization (WHO). (2020) *Rolling updates on coronavirus disease (COVID-19)*. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/events-as-they-happen>
- World Health Organization (WHO). (2020). *Novel coronavirus (2019-NCoV): Situation Report 1*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/330760>
- YÖK. (2020, January 02). *Yüksek öğretim kurumlarında sağlıklı ve temiz ortamların geliştirilmesi kılavuzu*. <https://www.yok.gov.tr/Sayfalar/Haberler/2020/yuksekogretim-kurumlarinda-saglikli-ve-temiz-ortamlarin-gelistirilmesi-kilavuzu-yayimlandi.aspx>

## Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma

*A research on the comparison of additive manufacturing technologies*

Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK \*<sup>1</sup> , Serkan KILIÇTEK <sup>2</sup> , Serkan GÖK <sup>3</sup> , Necdet YAKUT <sup>4</sup> 

<sup>1</sup>İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34295, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Aydın Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Makine Programı, 34295, İstanbul, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 14.02.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 24.04.2023

### Öz

Eklemeli imalat yöntemi bilgisayar ortamında tasarımı gerçekleştirilen bir parçanın, herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmadan doğrudan üretilmesini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. İşlemin pratikliği sayesinde; tasarım özgürlüğü, ürünü kişiselleştirme imkanı, düşük atık miktarı, karmaşık şekilli yapıların hızlı bir şekilde oluşturulması ve seri üretimden önce ürünün hızlı prototiplemesini sağlayan gelecekte ismini ve etkisini daha çok hissedeceğimiz üretim yöntemlerinin başında gelmektedir. Çalışma kapsamında; eklemeli imalat yöntemleri, kullanılan malzemeler ve günümüzde trend olan uygulamaları kapsamlı olarak incelenmiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinin; havacılık, biyomedikal, otomotiv ve yapı sektörlerindeki yenilikçi uygulamaları tartışılmıştır. Eklemeli imalat alanında kullanılan metal, polimer, seramik ve kompozit malzemeler ile ilgili mevcut gelişmelerde çalışmada sunulmuştur. Bununla birlikte makalede katmanlı imalat yönteminin geliştirilmesinin ve yaygınlaştırılmasının önündeki engellere de değinilmiştir. Yapılan çalışmada, eklemeli imalat alanında yapılan geliştirmeler, yöntemin avantajları ve önündeki engeller ele alınmış ve gelecekteki uygulama alanları ile ilgili genel bir bakış açısı ortaya konulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Eklemeli imalat, Hızlı prototipleme, Katmanlı imalat, 3D yazıcı

### Abstract

The additive manufacturing method is an innovative production method that enables a part designed in a computer environment to be produced directly without the need for any mold. Thanks to the practicality of the process; freedom of design, possibility of customizing the product, low waste amount, rapid creation of complex shaped structures and rapid prototyping of the product before mass production are among the production methods whose name and influence we will feel more in the future. In this paper emphasizes additive manufacturing methods, materials used and trending applications. Additive manufacturing methods; Innovative applications in aerospace, biomedical, automotive and construction sectors are discussed. Current developments related to metal, polymer, ceramic and composite materials used in additive manufacturing are presented in the study. In addition, the obstacles to the development and dissemination of the additive manufacturing method are also mentioned in the article. In paper, the improvements made in the field of additive manufacturing, the advantages of the method and the obstacles in front of it were discussed and an overview of the future application areas was presented.

**Keywords:** Additive manufacturing, Layered manufacturing, Rapid prototyping, 3D printing

\* Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK; dilsadakgumus@aydin.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Katmanlı imalat ya da diğer adıyla eklemeli imalat teknolojisi, CAD programları yardımıyla oluşturulan modellerin katman katman yazdırılarak nesnelerin üretilmesi olarak tanımlanmaktadır (Vafadar vd., 2021). İlk olarak 1980 yılında “3B System” şirketi “Stereolitografi” (Stereolithography-SLA) yöntemini geliştirerek ticarileştirmiştir. Buradaki amaç daha çok hızlı prototipleme işleminin gerçekleştirilmesi idi. Bu yöntemin ardından 1990 yılının ilk yarısında “Helysis” şirketi lamine nesne imalatı yöntemini geliştirmiş ve bunu takiben birçok katmanlı imalat yöntemi ortaya çıkmaya devam etmiştir. Katmanlı imalat yöntemleri, geleneksel üretim metotları ile üretilmesi zor ya da üretilmeyecek ürünlerin tek aşamalı olarak hızlı bir şekilde üretilmesine olanak kılmaktadır. Bu da tasarımcılara ve mühendislere fazlasıyla özgürlük imkanı sağlamaktadır. Bu teknoloji parça sayısından bağımsız olarak montaj süresini azaltmış, maliyeti düşürmüş ve malzeme sarfiyatını minimuma indirmiş veya tamamen ortadan kaldırılmıştır (Özkan, 2019). Ayrıca yöntem müşteri talebini açık şekilde karşılayabilecek ürünler üretilbilir, depolama ihtiyaçlarını ortadan kaldırabilir ve özellikle kritik parçalar için teslim süresini en aza indirgeyebilmektedir (Wohlers vd., 2014).

Katmanlı (eklemeli) imalat herhangi bir kalıp, kesici takım ya da hat kurulumu olmadan doğrudan tasarımdan ürüne geçişini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. Bu durum da ara işlemlere ihtiyaç duyulmadan istenilen parçanın tek seferde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Üretimin kolaylığı, istenilen parçanın tek seferde elde edilmesi, katmanlı imalat makinelerin kontrolünün diğer üretim araçlarına göre daha kolay olması, birçok sektörde katmanlı üretim yöntemlerinin kullanılmasını cazip kılmaktadır. Günümüzde birçok sektörde katmanlı (eklemeli) imalat ile üretim yöntemleri uygulanmaktadır.

## 2. Katmanlı imalat teknolojileri

### 2. Additive manufacturing technology

Birçok ülkenin endüstri şirketleri çeşitli katmanlı imalat cihazlarını ve yöntemlerini tanıtmıştır. Katmanlı imalat yöntemleri sınıflandırılırken farklı parametreler göz önünde tutulmuştur. Buna bağlı olarak üretim sırasında gerçekleşen kimyasal ve fiziksel olaylara göre; kimyasal, termofiziksel, sıvı jet, katı jet ve ultrasonik süreç yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır (Guo vd., 2013). Günümüzde ise katmanlı imalat yöntemleri başlangıç malzemesine göre; sıvı, filament, toz ve katı levha olarak ayrılmaktadır (Kruth vd., 1998). Çoğu zaman bu sınıflandırma sadece sıvı, katı ve toz şeklinde yapılmaktadır (Sürmen vd., 2019). Katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması ve kullanılan teknolojileri Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Katmanlı imalat teknolojileri

**Table 1.** Additive manufacturing technology

Başlangıç malzemesi	Kategori	Yöntem	Üretim teknolojisi	Malzeme	Güç kaynağı
Sıvı	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal enerji
	Polimerize	Fotopolimerizasyon	SLA	Fotopolimer, Seramik	UV
		Malzeme püskürtme	DLP	Fotopolimer, Wax	Projeksiyon
Katı	Yapışık objeler	Sac laminasyon	PJ	Kağıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer ışını
			LOM		
Toz	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	PA, Polimer	Yüksek-güçlü lazer ışını
			DMSL SLM EBM	Metal tozu, Seramik tozu	Yüksek-güçlü lazer ışını
	Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu,	Elektron ışını



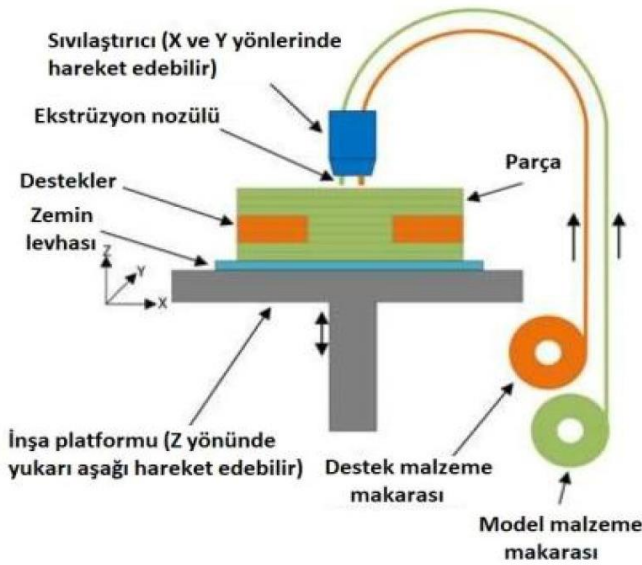
## 2.1. Eriyik biriktirme (yığma) ile modelleme

### 2.1. Fused deposition modelling-FDM

Piyasada birçok çeşidinin bulunması, maliyetinin düşük olması, kolay kullanımı, sıcak erime ve yapışma özelliklerinin iyi olmasından dolayı en yaygın olarak kullanılan 3B baskı teknolojisidir. Bu yöntemde baskı malzemesi olarak çoğunlukla polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadiyen stiren (ABS), Polikarbonat (PC) ve karbon fiber katkılı polimer filamentler tercih edilmektedir (Zhang vd., 2020). Bu yöntemin çalışma prensibi, makaraya sarılmış filamentin ucu ekstrüzyonda bulunan yuvaya takılmakta ve filamentin nozulun çıkış noktasına doğru hareket ettirilmesi esasına dayanır. Nozul çıkış noktasında filament camsı geçiş sıcaklığına ulaşana kadar ısıtılmaktadır. Yeterli sıcaklığa ulaştığında ise filament basım tablası üzerine daha önceden G kodları belirlenmiş şekli elde edebilmek için katman katman dökülmektedir.

Geleneksel polimer işleme teknikleri ile FDM yöntemi kıyaslandığında yöntemin oldukça yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir (Nabipour vd., 2020). FDM yöntemi kısıtlı malzeme kullanıma sahip olan bir prostestir (Perez vd., 2014). Bu kısıtlı kullanımı ortadan kaldırmak için ikinci bir nozul kullanılarak farklı malzemeleri sisteme beslemek mümkün olabilmektedir. Ayrıca çift nozul sayesinde farklı renklerde filamentler seçilerek renkli parça üretimleri de gerçekleştirilebilmektedir (Baca vd., 2020). Özellikle çift nozul kullanılan FDM teknolojisinde karmaşık parçaların üretimi daha kolay olmaktadır. Karmaşık parçalar oluşturulurken destek parçalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu destek parçaları suda veya solvent içerisinde çözülebilen malzemelerden imal edilmiş filamentlerden basılmaktadır. İkinci nozulun en önemli işlemlerinden birisi de bu destek parçalarını yazdırmaktır (Sürmen vd., 2019).

Eriyik biriktirme yöntemi ile üretilen parçalar üstün mekanik, kimyasal ve termal özelliklere sahip olmaktadır. Bu yöntemin önemli avantajları kullanım kolaylığı, uygun maliyeti ve çevre dostu olmasıdır. Baskı hızının düşük olması, metal malzemeler için pek uygun olmaması ve yüzey çözünürlüğünün düşük olması da yöntemin dezavantajları olarak ortaya çıkmaktadır (Dudek, 2013). Şekil 1’de FDM teknolojisinin şematik şekline yer verilmiştir.



Şekil 1. FDM yönteminin şematik gösterimi (Özer, 2020)

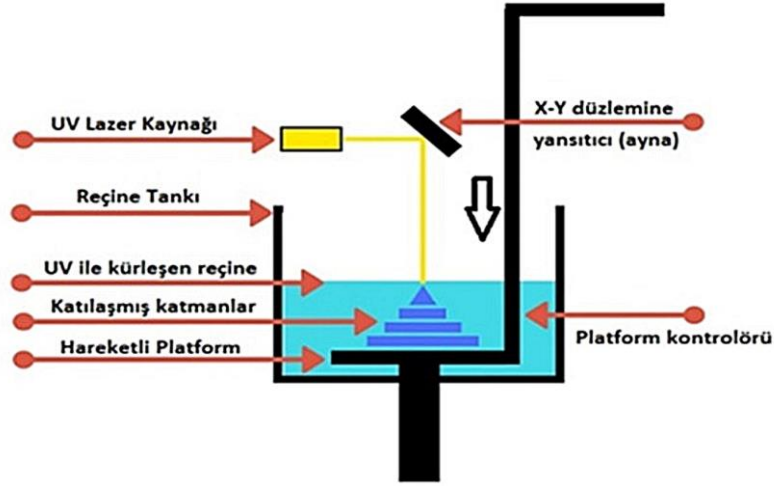
Figure 1. Schematic representation of the FDM method (Özer, 2020)

## 2.2. Stereolitografi

### 2.2. Stereolithography-SLA

Ticarileştirilmiş ilk katmanlı imalat yöntemi olan SLA bu alandaki en yaygın yöntemlerdendir. Oda sıcaklığında sıvı formunda bulunan fotopolimer reçinenin (ışığa duyarlı) kontrollü bir ışık kaynağı ile katılaştırılması prensibine dayanmaktadır (Jin vd., 2018). Katılaştırma işlemi klasik katmanlı imalat mantığına uygun olarak katman katman birikerek yapılmaktadır. Baskı tabakası üzerine dökülen fotopolimer reçine lazer ışını aracılığı ile katılaştırılmaktadır. Her bir tabaka lazer ışınları ile katılaştırıldıktan sonra yenisi inşa

edilmekte ve son katmanın da eklenmesi ile nihai ürün oluşturulmaktadır (Melchels vd., 2010). SLA yönteminde kullanılan fotopolimer reçinenin oldukça esnek bir yapıya sahip olması yöntemin önemli avantajlarının başında gelmektedir. Reçine sayesinde yapışma daha kolay gerçekleşmektedir. Ayrıca reçine, içerisine farklı metal veya seramik tozlarının eklenmesine izin vererek kompozit bir yapının oluşmasını sağlar. Bu avantajlarının yanı sıra atık malzeme oluşturmadan karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan verir. UV dayanımlarının düşük olmasından dolayı güneş ışınlarına maruz kaldığı zaman mekanik özelliklerinde düşüş ve görsel anlamda değişim görülebilmesi ise yöntemin dezavantajları olarak bilinmektedir (Cuchet vd., 2017). Şekil 2’de SLA yönteminin şematik şekli gösterilmektedir.



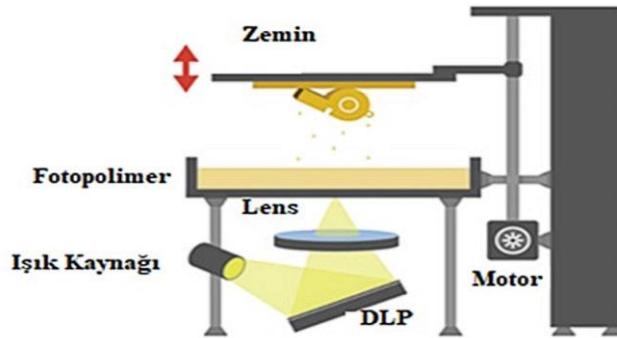
Şekil 2. SLA yönteminin şematik gösterimi (Sürmen vd., 2019)

Figure 2. Schematic representation of the SLA method (Sürmen et al., 2019)

### 2.3. Dijital ışık işleme

#### 2.3. Digital light processing-DLP

DLP ve SLA yöntemleri aynı gruba ait katmanlı imalat yöntemi olsa da iki yöntem arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bu iki baskı teknolojisinin çalışma prensipleri temelde birbirine çok benzese de pratikte kullanılan ışık kaynakları farklıdır. SLA yönteminde güç kaynağı olarak lazer ışını kullanılmakta iken DLP yönteminde projektör kullanılmaktadır (Santoliquido vd., 2019). DLP yönteminde projektör genel olarak reçine havuzunun altında konumlanmaktadır. Reçine bu yöntemde tek bir seferde kürleştirilmektedir. Bu durum daha hızlı baskı hızı sağlamaktadır. SLA yönteminde ise kürleştirme işlemi lazer ışınının geçtiği bölgelerde gerçekleşmekte ve buna bağlı olarak lazer ışını istenilen geometrik şekil doğrultusunda hareket etmektedir. DLP yöntemi ile kaliteli ürünlerin basılması projektörün basım hacmi ve çözünürlüğü ile doğrudan ilişkilidir. DLP yönteminde bazı durumlarda projektörün konumu değiştirilebilmekte ve bu değişikliğe bağlı olarak; aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı şeklinde tanımlanabilmektedir. Projektör basılacak olan nesneye aşağıdan ışık gönderiyorsa aşağıdan yukarı, yukarıdan ışık gönderiyorsa da yukarıdan aşağı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3’te DLP yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



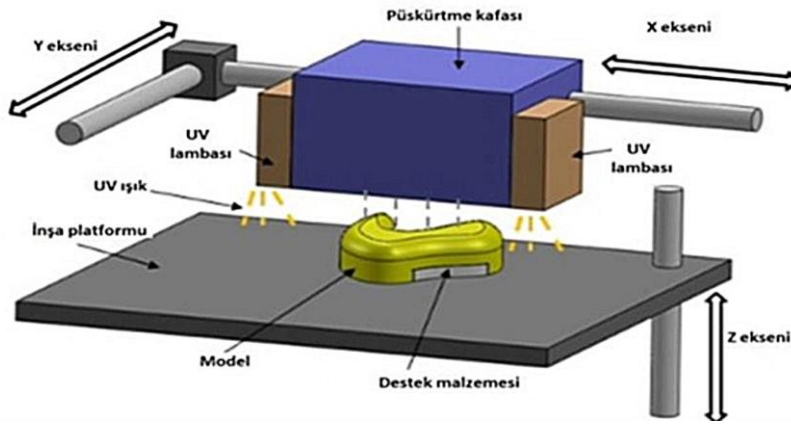
Şekil 3. DLP yönteminin çalışma prensibi (Santoliquido vd., 2019)

Figure 3. Working principle of DLP method (Santoliquido et al., 2019)

## 2.4. Çoklu püskürtme

### 2.4. Polyjet-PJ

PJ yöntemi, akrilik bazlı fotopolimerlerin baskı tabakasına püskürtülmesi esasına dayanmaktadır. Baskı tabakasına yerleştirilmiş olan UV kaynakları yardımıyla da püskürtülen fotopolimer reçine kürleşmektedir. Bu işlem tıpkı diğer katmanlı imalatlarda olduğu gibi en son şekil oluşana kadar katman katman devam etmektedir (Wong vd., 2012). PJ yöntemi ile aynı anda birden fazla ürünü hızlı bir şekilde basılabilmektedir. Bu sayede basılan ürünlerin farklı bölgelerinde farklı mekanik özellikleri elde etmek mümkün olur. Aynı zamanda karmaşık şekilli parçaların üretimi için de oldukça ideal bir yöntem olduğu literatürde yer almaktadır. Şekil 4'te Polyjet yönteminin şematik şekli gösterilmiştir.



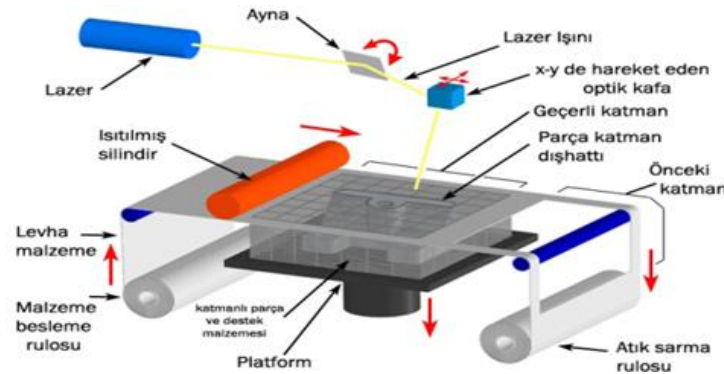
Şekil 4. Polyjet yönteminin şematik şekli (Udroiu vd., 2017)

Figure 4. Schematic figure of the polyjet method (Udroiu et al., 2017)

## 2.5. Lamine nesne imalatı

### 2.5. Laminated object manufacturing-LOM

LOM teknolojisi parça üretmek için hem ekleme hem de çıkarma işlemlerinin birlikte yapıldığı bir yöntemdir. Temel mantık diğer katmanlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi ürünün katman katman oluşturulması prensibine dayanmaktadır. LOM yönteminde malzemeler levha biçiminde kullanılmaktadır. İlk aşamada katmanlar birbirine termal bir yapıştırıcı kullanarak ısı ve basınç yardımı ile yapıştırılmaktadır. Daha sonra malzeme karbondioksit lazer yardımı ile önceden CAD programında belirlenen geometrik şekle göre kesilmekte ve son ürün elde edilene kadar işlem tekrarlanmaktadır (Fraizer vd., 2014). Bu yöntemde metaller, kompozitler ve kağıt malzemeler kullanılabilir (Krznar vd., 2014). LOM yönteminin düşük maliyetli olması, süreç boyunca deformasyon ve faz değişiminin ortaya çıkmaması, büyük parçaların kolaylıkla işlenmesi ve destek parçalara ihtiyaç duyulmaması bu teknolojinin avantajlarıdır. Kompleks parçaların üretiminin zorluğu, atık malzeme oluşumu ve malzemenin mekanik özelliklerinin yöne bağlı olması ise yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır (Udroiu vd., 2014). Şekil 5'te LOM yönteminin çalışma prensibine yer verilmiştir.



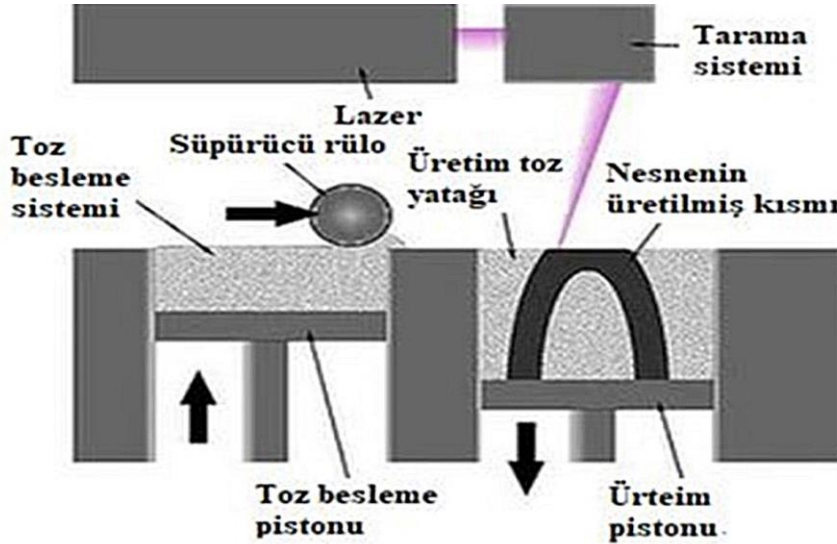
Şekil 5. LOM yönteminin çalışma prensibi (Özkan, 2019)

Figure 5. Working principle of LOM method (Özkan, 2019)

## 2.6. Seçmeli lazer sinterleme

### 2.6. Selective laser sintering-SLS

SLS teknolojisi toz malzemelerin kullanıldığı ve güçlü lazer ışını kullanımı gerektirdiğinden pahalı bir katmanlı imalat yöntemidir. Bu işlem sırasında tozlar tamamen eritilmemektedir. Yüksek güçlü karbondioksit lazer ışını kullanılarak tozlar sinterlenir ve birbirleriyle birleşmeleri sağlanır. İlk katmanın meydana gelmesinin ardından toz odasında bulunan tozlar, oluşturulmuş olan katman üzerine dökülür ve tekrar lazer ışını kullanılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem diğer katmanlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi nihai ürün elde edilene kadar devam etmektedir (Udroiu vd., 2014). SLS yönteminde birçok farklı polimer, metal, seramik malzeme türleri ve kombinasyonları kullanılabilir. Şekil 6’da SLS yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



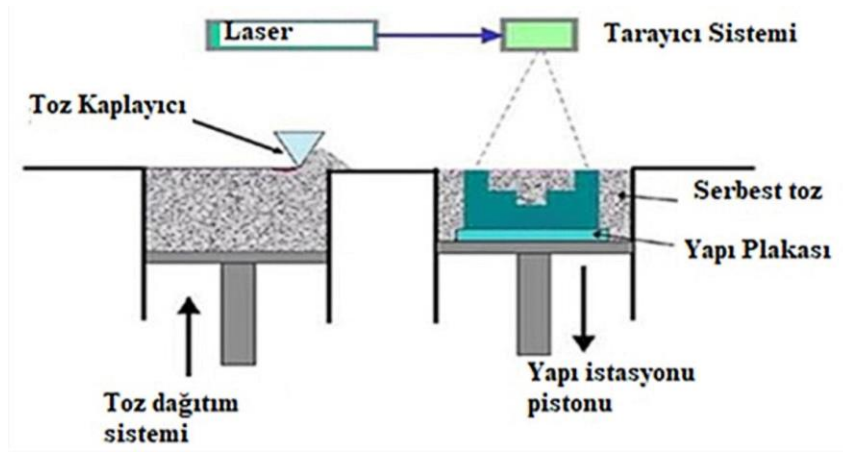
Şekil 6. SLS yönteminin çalışma prensibi (Singh vd., 2016)

Figure 6. Working principle of SLS method (Singh et al., 2016)

## 2.7. Direkt metal lazer sinterleme

### 2.7. Direct metal laser sintering-DMSL

DMSL yöntemi mühendislik uygulamaları ve endüstride kullanımı giderek yaygınlaşan önemli bir katmanlı imalat metodudur. Bu yöntem sayesinde geliştirilme aşamasındaki prototipler hızlı şekilde üretilebilmekte ve aynı zamanda geleneksel yöntem ile üretilemeyen hasarlı formlar yeniden inşa edilebilmektedir (Badiru vd., 2014). Ayrıca bu yöntem ile 3B data verilerinden yararlanılarak işlevsel metal parçalar üretilebilmektedir. Üretilen metal parçaların mekanik özellikleri döküm ile üretilmiş parçalar ile kıyaslanabilecek nitelikte olmaktadır (Dupláková vd., 2018). DMSL teknolojisi, çok ince metalik toz katmanlarının bir lazer ışını yardımı ile eritilmesi temeline dayanmaktadır. Öncelikle ürünün 3B CAD modeli katmanlar şeklinde kesilir ve ardından iş parçası katmanın üzerine istiflenir. Lazer ışını da istenilen geometri doğrultusunda metal tozlarını ergitir ve işlem tamamlanmış olur. Dikkat edilmesi gereken en önemli unsur ürünün basım süresi boyunca taban platformuna bir destek yapısı ile doğru pozisyonda sabitlenmesidir. Bu yöntemde bir katmanın minimum kalınlığı 20 mikron olmalıdır (Dupláková vd., 2018). DMSL yönteminin mühendislik uygulamalarında öne çıkmasının sebepleri; üretilen parçalarda yüksek mukavemet ve tokluk değerleri, üretim süresinin kısa ve maliyetinin düşük olması, düşük malzeme tüketimi ve parçanın direkt olarak müşterinden gelen 3B CAD verilerinden üretilebilmesidir. İlk yatırım maliyetinin yüksek olması, yüksek enerji kaynağının kullanılması, parça boyutunun kullanılan ekipmana göre belirlenmesi ve üretim sonrasında bitirme işlemlerine ihtiyaç duyulması ise yöntemin olumsuz yönleri olarak sıralanabilir. Şekil 7’de DMSL yönteminin şematik şekline yer verilmiştir.

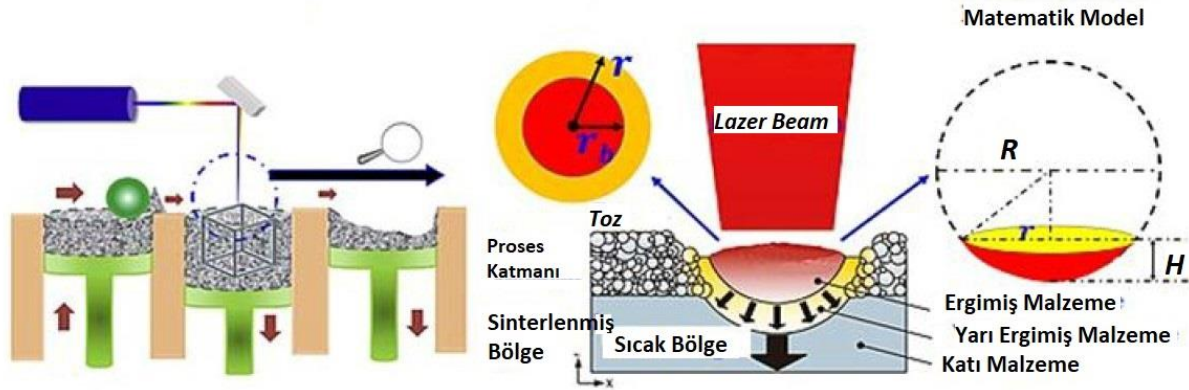


Şekil 7. DMLS yönteminin şematik şekli (Dupláková vd., 2018)  
Figure 7. Schematic of the DMLS method (Dupláková et al., 2018)

## 2.8. Seçmeli lazer ergitme

### 2.8. Selective laser melting-SLM

SLM yöntemi, SLS yönteminden türetilmiş bir prosestir. Tek farkı, SLS yönteminde parçayı oluşturmak için sinterlenen tozlar bu yöntemde tamamen eritilmektedir. Bu şekilde oldukça iyi mekanik özellikler elde edilmektedir. SLM teknolojisinin çok büyük enerjilere ihtiyaç duymasından ötürü kontrol edilmesi oldukça zordur. Bu da parçada deformasyona neden olabilmektedir. SLM yöntemi ile DMLS yöntemi birbirlerine oldukça benzemektedir. Çoğu kaynakta bu iki teknolojinin eş anlamda kullanıldığı da görülmektedir. Bu teknolojiler Avrupa'da yaygın olarak SLM, ABD'de ise DLMS olarak bilinmektedir (Patterson vd, 2017). Fakat aralarında önemli bir fark bulunmaktadır. SLM sistemleri özellikle polimer kaplı tozlarla kullanılmakta iken DMLS sistemleri ise kaplamasız metal tozlarının kullanılmasına olanak sağlayan bir tekniktir (Mover vd, 2015). Genel olarak yöntemde titanyum, paslanmaz çelik, kobalt ve krom tozları kullanılmaktadır. Titanyumun yaygın kullanımından dolayı medikal ve havacılık sektörlerinde tercih edilen bir katmanlı imalat yöntemidir (Guo vd., 2013). Şekil 8'de SLM yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



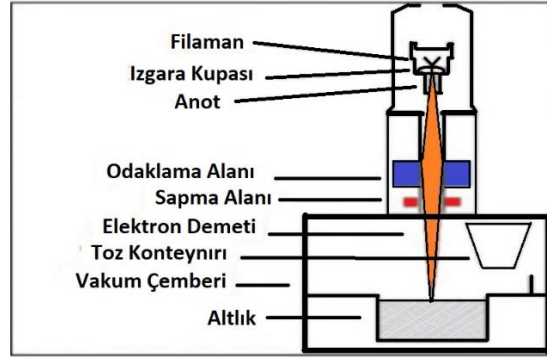
Şekil 8. SLM yönteminin çalışma prensibi (Liu vd., 2017)  
Figure 8. Working principle of SLM method (Liu et al., 2017)

## 2.9. Elektron ışınli ergitme

### 2.9. Electron beam melting-EBM

EBM yöntemi DMLS yöntemine teknik olarak oldukça benzemektedir. Tek farkı, bu yöntemde güç kaynağı olarak lazer ışınları yerine elektronların kullanılmasıdır. Kullanılan tozlar vakum ortamında elektronlar vasıtasıyla ergitilmektedir (Chua vd., 2014). Bu yöntemde elektron tabancaları, ışın tabancası, plazma elektronu gibi çeşitli ekipmanlara ihtiyaç duyulabilmektedir. EBM teknolojisinde daha çok metal tozları ve filamentler kullanılmakla birlikte en yaygın kullanılan malzeme titanyumdur. Yöntemin en çok karşılaşılan sorunu ise yüksek ısıdan kaynaklanmaktadır. EBM teknolojisinde elde edilmek istenen geometrik şekle göre

tozlar birbirine yapıştırılır ve katman oluşturulur. İlk katmanın elde edilmesinin ardından tozların bulunduğu platform kademe kademe aşağı doğru hareket ettirilir ve yeni tozlar eklenerek bir sonraki katman meydana getirilir. Bu işlem parça oluşturulana kadar devam ettirilir (Negi vd., 2019). Şekil 9’da EBM yönteminin örnek bir şekli gösterilmiştir.

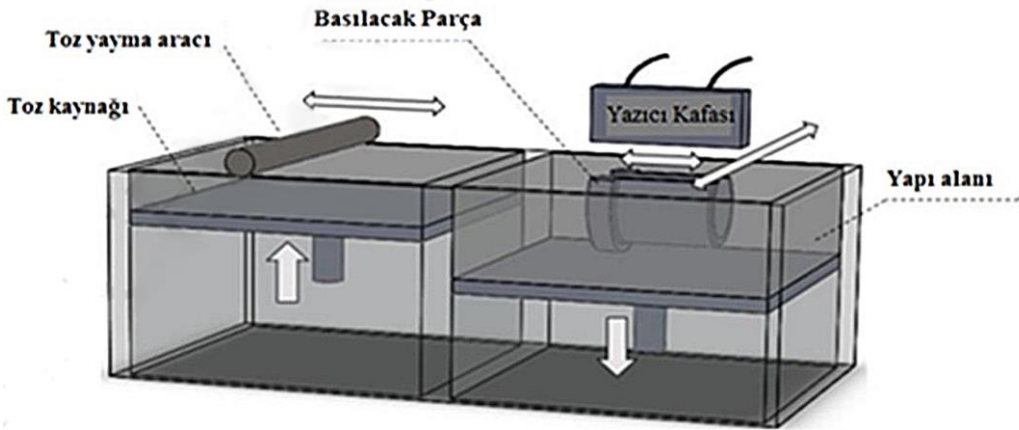


Şekil 9. EBM yönteminin şematik şekli (Santoliquido vd., 2019)  
Figure 9. Schematic of the EBM method (Santoliquido et al., 2019)

## 2.10. Bağlayıcı (Yapıştırıcı) püskürtme

### 2.10. Binder jetting-BJ

Bağlayıcı püskürtme teknolojisi ilk olarak 1990 yılında MIT tarafından geliştirilmiş ticari bir 3B baskı yöntemidir. Kum, cam, polimer ve metal türü malzemeler işlenebilmektedir. BJ yöntemi ile ürün elde edilmek istendiğinde takip edilmesi gereken adımlar; baskı, kütleme, toz temizleme, sinterleme, süzme, tavlama ve bitirme olarak sıralanmaktadır. Bu adımlar BJ yöntemini diğer katmanlı imalat yöntemlerinden ayırmaktadır (Ziaee vd., 2019). Bu teknolojiye katmanlar arası birleştirmenin sağlanabilmesi için tozun üzerine yapıştırıcı püskürtülmektedir. Böylece ilk katman meydana getirilmiş olmaktadır. Bir katman bittikten sonra step motoru yardımı ile elektrikli kızılötesi ısıtıcın altına doğru hareket ettirilir ve fazla yapıştırıcı uzaklaştırılır. Daha sonra yazıcı tabanı aşağı doğru hareket ettirilir ve yeni toz tabakası eşit bir şekilde katman üzerine yayılır. Bu işlem ürün elde edilinceye kadar tekrarlanarak devam ettirilir (Ziaee vd., 2019). Şekil 10’da BJ yönteminin şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 10. BJ yönteminin şematik gösterimi (Ziaee vd., 2019)  
Figure 10. Schematic representation of the BJ method (Ziaee et al., 2019)

## 3. Katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler

### 3. Materials used in additive manufacturing technologies

Katmanlı imalat teknolojilerinin gelişmesindeki en önemli katkılardan birisi de kullanılan malzeme yelpazesinin artmasıdır. Günümüz imalat yöntemlerinde farklı malzemeler kullanılabilir ve bu durum üretilebilecek ürün çeşitliliğini olumlu yönde etkilemektedir (Mazzanti vd., 2019). Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde parça yüzeyinden malzeme kaldırılarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilirken, katmanlı

imalat yöntemlerinde ise bu durumun tam tersi olarak imalat işlemi malzemenin katman katman artırılması şeklinde gerçekleşmektedir (Diksu, 2021). Toz veya tel biçimindeki malzemeler, istenen parçayı oluşturmak için bir ısı kaynağı yardımı ile sinterlenmekte veya camsı geçiş sıcaklığına kadar ısıtılarak eritilmektedir. Erime ile eş zamanlı olarak önceden oluşturulmuş model bilgisayar ortamından aktarılarak nozul sayesinde katman katman ortaya çıkmaktadır (Brandl vd., 2011). Gelişen katmanlı imalat teknolojisi sayesinde birçok farklı malzeme bu yöntemlere entegre edilebilmektedir. Ancak en yaygın olarak kullanılan katmanlı imalat teknolojisi malzemeleri; polimerler, metal ve alaşımları, biyomalzemeler, kompozitler, seramikler, yapı malzemeleri ve akıllı malzemeler şeklinde sıralanabilmektedir (Bhatia vd., 2021).

### 3.1. Polimerler

#### 3.1. Polymer

Polimer malzemeler kolay şekillendirilebilme, hafiflik, düşük maliyet, iyi mekanik özellikler ve aynı zamanda farklı katmanlı imalat yöntemlerine kolay entegre olabilmelerinden dolayı 3B baskı teknolojisinde en yaygın ve temel olarak kullanılan malzemelerdir (Ngo vd., 2018). Katmanlı imalat yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan polimer çeşitleri PLA (poliaktik asit), ABS (akrilonitril bütadien stiren), PC (polikarbonat), PET (polietilen tereftalat), ASA (akrilonitril stiren akrilat), PA (nylon), HIPS (yüksek darbe dayanımlı polistiren), TPC (termoplastik polyester elastomer) ve PEEK (polieter eter keton)'dır (Wojtyła vd., 2017). ABS polimeri kolay kullanılabilir olması, iyi mekanik özellikleri ve uygun maliyetli olmasından dolayı oldukça popüler bir malzemedir (Swetham vd., 2017). ABS polimeri amorf yapıya sahip olmaları ve tam bir erime noktaları olmadıkları için camsı geçiş sıcaklığı olan 105°C'nin altında bir değerinde kullanılmaktadır. Mekanik özelliklerinin en iyi olduğu sıcaklık aralığı ise -20°C ila 80°C'dir (Margi vd., 2022). PLA da tıpkı ABS gibi 3B baskı teknolojisinde en çok kullanılan polimer malzemelerdendir. PLA, şeker kamışı, nişasta gibi doğal malzemelerden üretildiği için aynı zamanda biyobozunur malzeme olarak da bilinmektedir. PLA'nın kimyasal yapısına bakıldığında, di-ester ve laktik asit olmak üzere iki farklı monomerden meydana gelmektedir.

PLA yapısal olarak incelendiğinde ise yarı kristal ve amorf yapılara sahip olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak 55°C camsı geçiş sıcaklığına ve 180°C ergime sıcaklığına sahiptir. PLA geleneksel polimer malzemeler ile kıyaslandığında iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir (Swetham vd., 2017). Polimer malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı katmanlı imalat yöntemleri Fused Deposition Modelling (FDM), Stereolithography (SLA) ve Laminated Object Manufacturing (LOM) olarak sıralanmaktadır (Margi vd., 2022).

### 3.2. Metaller ve alaşımları

#### 3.2. Metals and alloys

Metal ve alaşımları, polimer malzeme grubundan sonra katmanlı imalat teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan diğer malzeme grubunu oluşturmaktadır. Katmanlı imalatta kullanılan metal ve alaşımları özellikle prototip üretim, araştırma ve küçük ölçekli üretimlerde tercih edilmektedir. Bu kapsamda metal ve alaşımlarının kullanılması sayesinde kompleks geometriye sahip ürünler kolay bir şekilde basılabilmektedir (Duda vd., 2022). Titanyum, alüminyum, çelik, nikel, bakır, altın ve bronz gibi birçok metal ve alaşımları katmanlı imalat yöntemlerinde kullanılmaktadırlar. Çelikler birçok üretim yönteminde olduğu gibi katmanlı imalatta da yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle östenitik paslanmaz çelik ve takım çelikleri bu alanda kendilerine önemli bir yer edinmiştir (Özsolak, 2022). Çoğu metal malzemeye kolay erişim sağlanabilmektedir. Fakat polimerlere göre düşük baskı hızına sahip olup maliyetleri yüksektir. 3B baskı metal yazıcıları lazer ya da elektron ışını gibi metali eritebilecek bir kaynağa ihtiyaç duymaktadırlar. Bu yöntemlerde toz veya tel şeklinde malzemeler kullanılmaktadır. Eriyen metal katman katman biriktirilerek ürün elde edilmektedir (Duda vd., 2022).

### 3.3. Kompozitler

#### 3.3. Composites

Kompozit, en az iki ya da daha fazla, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin, makro seviyede bir araya gelmesiyle birlikte oluşan yeni ve daha üstün özellikteki malzeme demektir. Bu malzemeler uzay, biyomedikal, elektronik, spor malzemeleri, otomotiv gibi çok geniş alanlarda kullanılmaktadırlar (Bhatia vd., 2021). Kompozit malzemeler kendisini oluşturan malzemelerle kıyaslandığı zaman daha iyi mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. 3B yazıcıları sayesinde basılabilen kompozitlerin düşük maliyeti, kolay

şekillenebilmesi ve özelleştirilebilmesinden dolayı katmanlı imalatta kullanılabilirliği artmaktadır (Singh vd., 2020). Katmanlı imalat yöntemlerinde polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler kullanılabilir (Bourell vd., 2017).

Polimer matrisli kompozitler (PMK), içerisine takviye fazı olarak partiküller, fiberler, metallerin ve seramiklerin katılması ile elde edilen kompozit çeşididir. PMK'ler katmanlı imalat yöntemlerinde filament şeklinde kullanılmaktadırlar. Kompozit filamentlerin en önemli özellikleri; boyutsal stabilite, sert, ısıya dayanıklı ve yüksek yüzey kalitesidir (Bourell vd., 2017). Metal matrisli kompozitler (MMK), katmanlı imalat yöntemi ile üretilirken partikül şeklinde veya lif şeklinde bulunmaktadırlar. Özellikle partikül (toz) şeklinde olan MMK üretiminde sinterleme sıcaklığına ulaşabilmek için lazer ya da elektron ışın kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır (Bourell vd., 2017). Seramik matrisli kompozitler, özellikle biyomalzemelerin üretiminde önemli bir yer kaplamaktadır. Polimer içerisine seramiklerin katılması ya da seramik partiküllerinin karıştırıcı yardımıyla homojenleştirilmesi sonucu elde edilmektedirler. Katmanlı imalat teknolojisi ile üretilen kompozit malzemelerin oluşturulması için yaygın olarak Fused Deposition Modelling (FDM), Stereolithography (SLA), Direct Ink Writing (DIW), Laminated Object Manufacturing (LOM), Liquid Deposition Modelling (LDM), Selective Laser Sintering (SLS) ve Composite-Based Additive Manufacturing (CBAM) yöntemleri kullanılmaktadır (Bhatia vd., 2021).

### 3.4. Seramikler

#### 3.4. Ceramics

Seramik malzemeler sert, kırılğan, ısı ve korozyona karşı yüksek dirence sahip olan malzeme türü olarak tanımlanmaktadır (Smith, 1986). Katmanlı imalat teknolojisinde seramikler, bulamaç bazlı, çamur bazlı ve toz bazlı olarak kullanılmaktadır. Bulamaç bazlı seramikler sıvı ya da yarı-sıvı yapı içerirken toz bazlı seramikler ise partikül yapı içermektedirler. Katmanlı imalat teknolojisi ile üretilen seramikler uzay, sağlık ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Bhatia vd., 2021). Seramik malzemeler 3B baskı teknolojisinde Ink Jet, Powder Bed Fusion ve Stereolithography üç ana yöntemi ile ön plana çıkmaktadır (Singh vd., 2020). Bu yöntemler dışında Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Laminated Object Manufacturing (LOM) ve Fused Deposition Modelling (FDM) teknikleri ile de üretilebilmektedir (Bhatia vd., 2021).

### 3.5. Biyomalzemeler

#### 3.5. Biomaterials

Sağlık sektöründeki ürünlerin ihtiyaçlarını karşılayabilmek katmanlı imalat yöntemleri bu alanda da kritik bir öneme sahiptir. Yapılan araştırmalar, son yıllarda bu alandaki 3B baskı teknolojisinin kullanımının arttığını göstermektedir. Bu artışın en önemli nedenleri; baskı hassasiyeti, baskı hızı, karmaşık parçaların üretilebilmesi, düşük maliyet ve malzeme israfının azalması olarak belirtilmektedir (Bhatia vd., 2021). Katmanlı imalatın gelişmesi, tıp alanına da olumlu bir şekilde yansımaktadır. Bu sayede medikal ekipmanlar, yapay organ üretim çalışmaları ve implant malzemelerinde büyük ilerlemeler meydana gelmiştir ve ilerlemeye de devam etmektedir. Özellikle organ bağışında donör bağışçı sayısının az olması ve diğer medikal sorunları da göz önüne alındığında yapay organ üretimleri bu aşamada oldukça önem arz etmektedir (Yan vd., 2018). 3B baskı teknolojisinde metal, polimer ve seramik malzemeler kullanılmaktadır. Metal malzemeler, ortopedik ve diş implantları gibi kalıcı ürünleri hazırlamak için tercih edilmektedir. Bu alanda kullanılan metal malzemeler paslanmaz çelikler, titanyum ve kobalt-krom alaşımlarıdır. Katmanlı imalat ile üretilen implantlar, geleneksel yöntemlerle üretilmiş implantlar ile karşılaştırıldığında daha küçük taneli olduğu ve buna bağlı olarak da daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Doğal ve sentetik polimer malzemeler öncelikli olarak tıbbi modellerin hazırlanmasında kullanılmaktadır. En sık kullanılanlar polimer malzemeler PLA, ABS, PC, PA, PVA ve PCL'dir. Mükemmel uyumluluğa sahip olan bu polimerler aynı zamanda hücre yapışmasını da desteklemektedirler. Ancak kolay deforme olmaları ve zayıf mekanik özelliğe sahip olma gibi dezavantajları da mevcuttur. Seramik malzemelerden HA (hidroksil apatit) ve TCP (tri kalsiyum fosfat), yüksek biyo uyumlulukları ve stabil fizikokimyasallıkları nedeniyle katmanlı imalatta yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte kolay şekillendirilebilir ve renklendirilebilir olmaları nedeni ile de 3B baskı teknolojilerinde tercih edilmektedirler (Yan vd., 2018). Biyomalzemelerde yaygın olarak kullanılan katmanlı imalat yöntemleri; Stereolithography (SLA), Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Binder Jetting (BJ), Polyjet (PJ), lazer destekli veya desteksiz 3B biyo yazıcılar olarak sıralanabilmektedir (Bhatia vd., 2021).



### 3.6. Yapı malzemeleri

#### 3.6. Construction materials

Yapı sektörünün önemli malzemelerinden biri olan betonun katmanlı imalat yöntemlerine entegre edilmesi ile inşaat alanında da 3B baskı teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha hızlı prototip üretimi, daha az insan gücü ve malzeme sarfiyatı sağlanmaktadır (Bhatia vd., 2021). Beton karışımın içeriği, 3B baskının sürecince ve yapının performansında önemli bir rol oynamaktadır. Yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan katmanlı imalat teknolojisi tipik bir eriyik yığıma yöntemine benzemektedir. Kullanılan beton veya çimento üst üste inşa edilirken, alt katmanlar da üst katmanları taşımaktadır. Böylece istenen yapı meydana gelmektedir (Shakor vd., 2019). Beton malzemenin özelliklerini artırmak için yapısına kum, çimento, mikrofiber ve silika gibi birçok takviye edici eklenmektedir. Böylece katmanlı imalat teknolojisiyle kompleks yapılar daha kolay elde edilebilmektedir. Yapı malzemelerinde kullanılan katmanlı imalat yöntemleri Binder Jetting (BJ) ve Fused Deposition Modelling (FDM)'dir (Bos vd., 2016).

### 3.7. Akıllı Malzemeler

#### 3.7. Intelligent materials

Akıllı malzemeler renk, şekil ve boyut gibi özelliklerini, belli bir süre boyunca dışarıdan aldıkları sıcaklık, ısı ve gerilime bağlı olarak değiştirebilen malzemeler olarak bilinmektedir. Bu tür malzemeler yeteneklerine göre şekil hafızalı, kendi kendini temizleyebilen, kendi kendine çalışabilen ürünler olarak da tanımlanabilmektedir (Falahati vd., 2020). Akıllı malzemeler 3B baskı teknolojisinde basılarak genellikle biyomedikal uygulamalarında, titreşim kontrollerinde, robotik çalışmalarında, kardiyovasküler stentlerde ve kontrollü ilaç taşıyıcı sistemlerinde kullanılmaktadırlar (Falahati vd., 2020). Akıllı malzemelerin katmanlı imalat teknolojileri ile üretimi yapılırken polimerler, nikel-titanyum alaşımları ve kompozit gibi farklı malzemeler tercih edilebilmektedir (Meier vd., 2011). Günümüzde, akıllı malzemeleri 3B baskı teknolojisi ile üretebilmek için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler Digital Light Processing (DLP), Selective Laser Melting (SLM), Digital Projection Printing (DPP), Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modelling (FDM), Inkjet Printing, Stereolithography (SLA) ve Electron Beam Melting (EBM) olarak sıralanabilir (Gardan, 2019).

### 4. Katmanlı imalat teknolojilerinin uygulama alanları

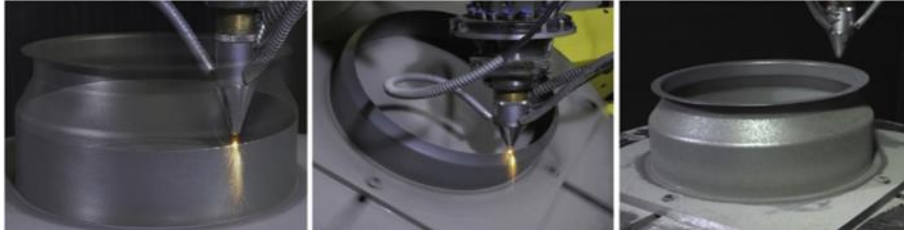
#### 4. Application areas of additive manufacturing technologies

Katmanlı imalat teknolojisinde polimer, metal ve seramik malzemeler başta olmak üzere birçok malzeme grubu kullanılabilir. Bu malzemeler arasında en yaygın olarak polimer ve metal malzeme grupları başı çekmektedir. Katmanlı imalat yöntemlerinde kullanılan malzemelerin sayısının artmasıyla birlikte yöntemlerin endüstrideki kullanım alanları genişlemeye devam etmektedir. Bu teknoloji özellikle tıp, dişçilik, konstrüksiyon, uzay ve havacılık alanında kendisine önemli bir yer edinmiştir (Vafadar vd., 2021). 3B yazıcı fiyatlarının düşmesiyle birlikte, seri imalattan önce prototip oluşturmada, belli parçaların onarılmasında ve küçük çaplı üretimlerde neredeyse her sektörde evlerin, okulların ve atölyelerin çoğunda kendine yer edinmiştir.

#### 4.1. Havacılık sektöründe katmanlı imalat uygulamaları

##### 4.1. Additive manufacturing practices in the aviation industry

Havacılık uygulamaları için katmanlı imalat teknolojileri genellikle; doğrudan dijital baskı (DDB), hızlı kalıplama, hızlı prototip oluşturma ve onarım için kullanılmaktadır. DDB, uçakta kullanılacak mukavemeti yüksek parçaların üretimini ifade etmektedir. Bu tür parçalar; nozullar, yanma odaları gibi önemli olanlar ile kirişler, armatürler ve diğer aksesuarlar gibi daha az önemli olan parçalardır. Günümüzde katmanlı imalatın havacılık sektöründe birçok uygulaması bulunmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak Şekil 11'de TWI (The Welding Institute) şirketinin beş eksenli LMD (Lazer Metal Biriktirme) sistemi ile IN718 helikopter motoru yanma odası üretimi gösterilmektedir.



**Şekil 11.** TWI şirketine ait IN718 helikopter motoru yanma odası üreten LMD yazıcısı (Najmon vd., 2019)

**Figure 11.** LMD printer producing IN718 helicopter engine combustion chamber from TWI company (Najmon et al., 2019)

Başka bir firma anten tutucu aparatlarının ağırlığını azaltmak için katmanlı imalat uygulamalarından olan SLS yöntemini kullanmıştır. Üretilen anten tutucunun malzemesi olarak alüminyum alaşımı seçilmiş ve böylece ağırlık yüksek miktarda düşürülmüştür (Najmon vd., 2019). Boeing'in 787 Dreamliner uçağında maliyetleri oldukça azaltacak, titanyum parça basımında katmanlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Başka bir firma, DMLS yöntemini kullanarak 248 parçalı kompleks yapıyı tek seferde basmıştır (Najmon vd., 2019). Yine havacılık sektöründen bir firma ses altı ve ses üstü aralıkta uçakların şiddetli gerilimlerine dayanacak şekilde tasarlanmış kompakt, tek parçalı bir akış ölçüm cihazı üretmek için DMLS yöntemini kullanmıştır.

Titanyum alaşımından oluşan türbin kanatları ve yapısal uçak gövdesi bileşenlerinin üretimi için katmanlı imalat yöntemlerinden olan FDM yöntemi kullanılmaktadır. Uçakların mekanik ve yapısal bileşenleri genellikle metalden yapılırken, diğer bağlantılar ve iç aksesuarlar hem ağırlıktan hem de maliyetten tasarruf etmek için genellikle metal dışı malzemelerden yapılmaktadır. Boeing 777 uçağındaki polimer malzemeden yapılan koltuk işaretleri FDM yöntemi ile üretmiştir. Havacılık sektöründe önemi gittikçe artan insansız araç sistemlerinin mühendislik parçalarını üretmek için SLS teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca SLS yöntemi ile yapılan başka bir uygulama da İHA'nın kontrol panelinin muhafazasının üretiminde kullanılmasıdır (Najmon vd., 2019). Havacılık uygulamalarında katmanlı imalat yöntemlerinin kullanıldığı diğer bir alan kalıplamadır. Bu yöntemle yapılan kalıp ile Airbus A320 modelinin kapı menteşelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir (Liu vd., 2017). Bu uygulama Şekil 12'de gösterilmektedir.



**Şekil 12.** Airbus A320 kapı menteşesi (Najmon vd., 2019)

**Figure 12.** Airbus A320 door hinge (Najmon et al., 2019)

Havacılık sektöründe katmanlı imalatın diğer bir uygulaması da hızlı prototiplemedir. Genel olarak, SLA veya FDM gibi polimer bazlı eklemeli imalat uygulamaları, prototip testi için yeterli mukavemette ve üretilecek modelin tasarımına uygun test araçlarının üretilmesinde kullanılmaktadır. Böylece polimerin hızlı prototiplenmesi ile fiziksel özellikleri ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellerini doğrulamak için üretimi ve maliyeti fazla olan metallerin testlerde kullanılması azaltılarak hem maliyet hem de işçilik konusunda tasarruf sağlanmaktadır (Najmon vd., 2019). PolyJet yöntemi, İHA uygulamaları için hızlı bir şekilde prototip oluşturmak ve çeşitli kanat tasarımlarını test etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. NASA, katmanlı imalat yöntemlerini kullanarak yeni uçak modellerinin prototipleri yapmaktadır (Najmon vd., 2019). Şekil 13'te gösterildiği gibi Airbus, yapısının %90'ı plastik PA tozundan üretilen küçük boyutlu insansız hava aracının üretimini katmanlı imalat yöntemiyle 8 haftada tamamlamıştır. Katmanlı imalat yöntemleri ile pahalı parçaların, hurdaya ayrılıp değiştirilmesi yerine onarılması sağlanarak maliyet tasarrufu gerçekleştirilmektedir (Walachowicz vd., 2017). Bu yöntemler ile yapılan onarımların geleneksel yöntemlere göre daha estetik olduğu görülmüştür.



**Şekil 13.** Airbus'ın ürettiği dünyanın ilk katmanlı imalat uçağı (Najmon vd., 2019)

**Figure 13.** The world's first additive manufacturing aircraft produced by Airbus (Najmon et al., 2019)

#### 4.2. Medikal sektörde katmanlı imalat uygulamaları

##### 4.2. Additive manufacturing applications in the medical industry

Katmanlı imalat yöntemleri medikal sektörde; hastalık modelleme, tıbbi ekipman üretimi, dişçilik, deri mühendisliği ve teçhizat üretimi uygulamalarında da geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yöntem hassas dental uygulamalarında; diş köprüleri, implantlar ve kuronlar üretmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra çene implantları, kalça, diz ve omuz protezleri uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır (Özer vd., 2020). Günümüzde bire bir yapay organ üretilmesine de ameliyat öncesinde doktorlar çektikleri MR'lar yardımı ile ameliyat edilecek bölgenin 3 boyutlu topografik haritasını oluşturulmaktadır. Bu harita 3B yazıcılar yardımı ile somut objeler haline getirilerek baskısı alınmaktadır. Bozuk diş anatomisi için kullanılan diş hizalayıcılar, diş hekimliğinde 3B baskının en çok kullanıldığı alanlardır. Böylelikle dental alanında 3B baskı daha az maliyetle kontrollü bir tedavi imkanı sunmaktadır. Herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmadığı için üretim hızı daha yüksek olmaktadır. Katmanlı imalatın diş anatomisindeki uygulanabilirliğine bir örnek Şekil 14'te gösterilmiştir.

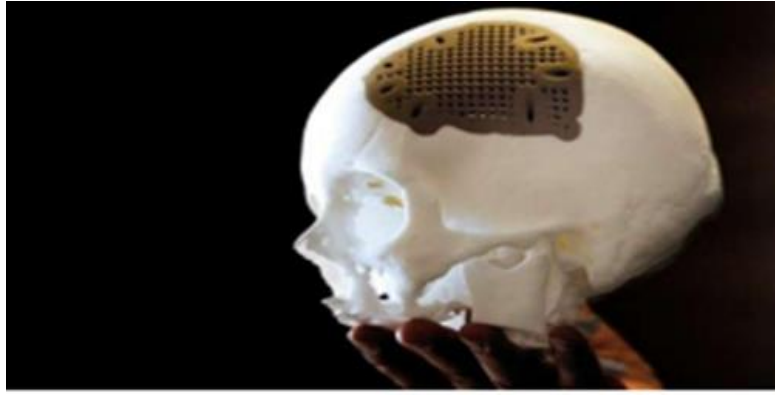


**Şekil 14.** Katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş diş-çene iskeleti (Özer vd., 2020)

**Figure 14.** Tooth-jaw skeleton produced by the additive manufacturing method (Özer et al., 2020)

Medikal implant sektöründe katmanlı üretimin 2025 yılına kadar 0,27 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. 3 boyutlu baskı ile oluşturulan ürünler; tasarım, üretim ve maliyet açısından geleneksel implant yöntemlerinden daha iyi performans göstermektedir. Silikon kalp kapakçıkları, karbon yapay retina, diş protezi, implantlar, özelleştirilmiş mikro gözenekli kemikler, PEEK köprücük kemiği implantı, kulak ve çene gibi pek çok alanda uygulanmaktadır. Medikal uygulamalarda biyo-uyumluluğu açısından en çok kullanılan malzeme titanyumdur (Çelebi vd., 2017). Şekil 15'te biyo-uyumlu parça örneği verilmiştir.

SLA yöntemi ortodonti uygulamalarıyla beraber kalp damar hastalıklarının tedavisinde, doku, beyin cerrahisi, omurga cerrahisi uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 16'da SLA yöntemi ile üretilmiş olan ortodonti uygulaması gösterilmiştir.

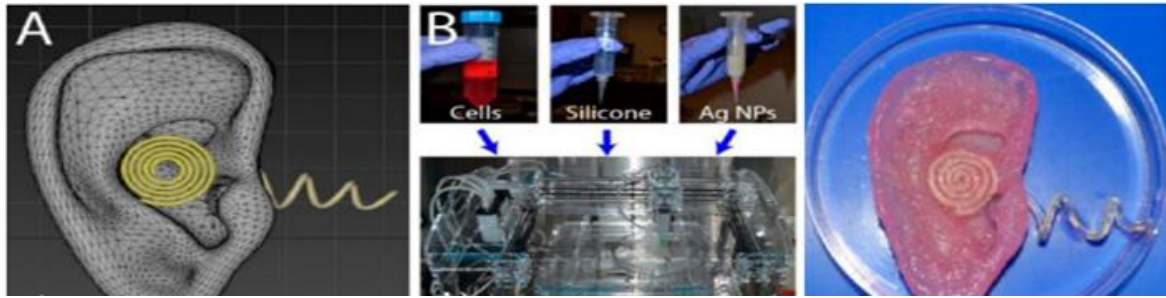


**Şekil 15.** Katmanlı imalat ile üretilen biyo-uyumlu parça (Çelebi vd., 2017)  
**Figure 15.** Biocompatible part produced by additive manufacturing (Çelebi et al., 2017)



**Şekil 16.** SLA yöntemi ile üretilmiş cerrahi kılavuz örneği (Çelik vd., 2017)  
**Figure 16.** Example of a surgical guide produced by the SLA method (Çelik et al., 2017)

DLP yöntemi gözenekli, oyuk yapıların basılmasında SLA yöntemi ile karşılaştırıldığında, çok daha karmaşık şekilli parçalarda kullanılabilir olduğu bilinmektedir. DLP projektör lensleri, küçük ve karmaşık parçaların daha detaylı ve yüksek kalitede basılabilmesi için değiştirilebilmektedir. SLM yöntemi, polimerlerin işlenmesi dışında; Ni, Al ve Ti gibi implant uygulamalarında biyo-uyumluluğu yüksek malzemelerin şekillendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Çelik vd., 2017). FDM yöntemi, daha çok polimer malzeme uygulamalarında kullanılan ve herhangi bir kalıba ihtiyaç duymayan katmanlı imalat yöntemlerindedir. Şekil 17’de Princeton ve Johns Hopkins Üniversiteleri tarafından katmanlı imalat yöntemi ile üretilen yapay kulak CAD modeline yer verilmiştir.



**Şekil 17.** Katmanlı imalat ile üretilen yapay kulak CAD modeli (Çelebi vd., 2017)  
**Figure 17.** Artificial ear CAD model produced by additive manufacturing (Çelebi et al., 2017)

Katmanlı imalat yöntemi tanı test kiti, ventilatörler (solunuma yardımcı tıbbi cihaz), maske ve yüz siperlikleri başta olmak üzere geneli polimer malzeme içerikli tıbbi kişisel ekipmanların üretiminde kullanılmaktadır. Ayrıca tüm dünyada etkili olan ve etkisi günümüzde de devam eden COVID- 19 salgınından korunmak için katmanlı imalat yöntemleri ile üretilen maske ve kişisel ekipmanlar kullanılmaya devam etmektedir. Bu ekipmanlardan bazıları Şekil 18’de gösterilmiştir.



**Şekil 18.** Katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş yüz siperlikleri (Vafadar vd., 2021)  
**Figure 18.** Face shields produced by the additive manufacturing method (Vafadar et al., 2021)

#### 4.3. Yapı sektöründe katmanlı imalat uygulamaları

##### 4.3. Additive manufacturing practices in the building industry

Yapı sektöründeki katmanlı imalat üretimleri, Dr. Behrokh Khoshnevis'in Nasa çalışmaları kapsamında, Güney Kaliforniya Üniversitesi'nde yaptığı araştırmalar sonucunda başlamıştır (Çalışkan vd., 2020). Günümüzde yapı alanında bu yöntemin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Örnek bir uygulamaya Şekil 19'da yer verilmiştir.



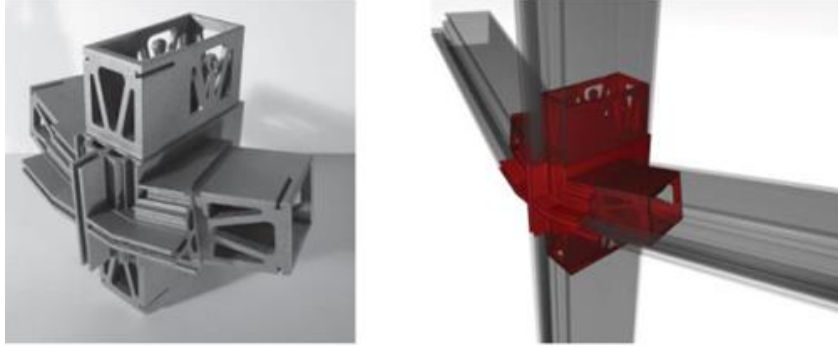
**Şekil 19.** Kontur üretimi sistemi, vinç uygulaması (Çelik vd., 2017)  
**Figure 19.** Contour generation system, crane application (Çelik et al., 2017)

Yapı sektöründe katmanlı imalat yönteminin uygulanabilirliği için kullanılan malzeme ve oluşturulan kontur önem arz etmektedir. Günümüzde farklı konturda yapılar üretmek için birçok bilim insanı ve şirketler ar-ge süreci yürütmektedir. Yapılan yoğun çalışmalar sonucunda birçok farklı üç boyutlu yazdırılabilir malzemeler, kompozit karışımlar, farklı teknolojik makineler ve nozul modelleri geliştirilmiştir (Çalışkan vd., 2020). Örnek bir uygulaması Şekil 20'de gösterilmektedir.



**Şekil 20.** İtalya'da kerpiç malzeme kullanılarak katmanlı imalat ile üretilen köy evi (Çalışkan vd., 2020)  
**Figure 20.** Village house produced with additive manufacturing using mud brick material in Italy (Çalışkan et al., 2020)

Yapı sistemlerinde özellikle metal parçaların üretiminde SLS ve DMLS yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile yapılan çalışmalar daha çok alüminyum ve polimer malzemeler üzerinden ilerlemektedir. Şekil 21’de DMLS yöntemi ile üretilmiş olan parçaya yer verilmiştir.



**Şekil 21.** DMLS yöntemi ile üretilmiş cephe bileşeni (Çelik vd., 2017)  
**Figure 21.** Facade component produced by DMLS method (Çelik et al., 2017)

Yapı sektöründeki FDM teknolojisi daha çok dekoratif ve yapının korunması amacıyla polimer panellerin üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknoloji yapılan bazı çalışmalarda, karmaşık iç geometriye sahip panellerin ve profil çalışmalarının, ısı yalıtımı sağlaması, ısı köprüsü probleminde çözüm üretmesi amacıyla kullanılmıştır (Çalışkan vd., 2020). Örnek bir uygulama Şekil 22’de verilmiştir.



**Şekil 22.** FDM teknolojisi ile üretilmiş cephe bileşeni (Çalışkan vd., 2020)  
**Figure 22.** Facade component designed with FDM technology (Çalışkan et al., 2020)

Yapı sektöründe kullanım alanı bulan diğer bir katmanlı imalat uygulaması da LENS ve EBM uygulamalarıdır. Bu yöntemlerle daha çok metal yapıların oluşturulması sağlanmaktadır. Ayrıca “Tel Ark Katmanlı İmalatı” olarak bilinen WAAM yönteminde metal tel eritilerek üretim gerçekleştirilmektedir (Çelik vd., 2017). Bu yöntem ile üretilen metal bir köprü Şekil 23’te gösterilmektedir.

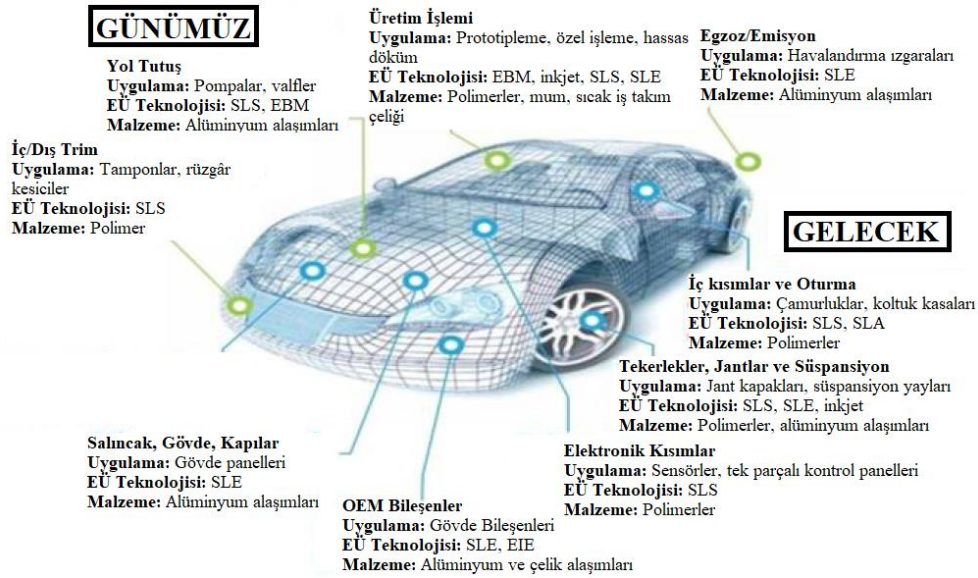


**Şekil 23.** WAAM katmanlı imalat sisteminde üretilen metal köprü (Çelik vd., 2017)  
**Figure 23.** Metal bridge fabricated on the WAAM additive manufacturing system (Çelik et al., 2017)

#### 4.4. Otomotiv sektöründe katmanlı imalat uygulamaları

##### 4.4. Additive Manufacturing Applications in the Automotive Industry

Katmanlı imalat teknolojileri karmaşık ve hafif yapıları oluşturma üstünlükleri nedeni ile otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Bu teknoloji, otomotiv sektöründe özellikle yapısal kompozit bileşenler, motor vanaları ve turboşarj türbinlerinin üretilmesinde kullanılmaktadır (Özer vd., 2020). Şekil 24'te katmanlı imalatın otomotiv sektöründeki uygulama alanları gösterilmiştir. 2011 yılında Kor firması, Ecologic Urbee otomobil modelini tanıtmıştır. Bu otomobilin en ilgi çekici yanı gövdeyi oluşturan tüm parçaların katmanlı üretim teknolojilerinden EBM yöntemiyle imal edilmiş olmasıdır. Otomobilin fazla ağırlık oluşturan ve maliyeti arttıran karmaşık parçaları bu yöntem ile performansı yüksek ve maliyeti düşük bir Şekilde üretilmiştir.



Şekil 24. Otomotiv sanayisinde katmanlı üretim uygulamaları (Özer, 2020)

Figure 24. Additive manufacturing applications in the automotive industry (Özer, 2020)

#### 5. Tartışma ve sonuçlar

##### 5. Discussion and conclusions

Üretim hatlarının değiştiği ve bilginin dijital olarak aktarıldığı çağımızda endüstrinin dördüncü devrimi (Endüstri 4.0) ile katmanlı imalatın geniş çapta yayılacağı tahmin edilmektedir. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor, detaylı ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesini sağlayan, üretim hattına ve kalıba ihtiyaç duymayan, işlem süresini kısaltarak zamandan ve malzemeden tasarruf sağlayan katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı otomotiv, havacılık, eğitim, sağlık, gıda ve eğlence gibi birçok farklı alanda giderek yaygınlaşmaktadır.

Katmanlı imalat yöntemleri özellikle prototip doğrulaması, özel parça imalatı ve ara işlem gerektiren parçaların tek seferde basılmasında yaygın bir Şekilde kullanılmaktadır. Ancak, tezgahların maliyetleri ve küçük boyutları, hammadde olarak kullanılan metal tozlarının “gaz atomizasyonu” benzeri tekniklerle ve haliyle yüksek maliyette temini, bu yöntemlerin otomotiv, beyaz eşya gibi çok ağır rekabetin olduğu sektörlerde yaygın olarak kullanılmasına engel oluşturmaktadır. Havacılık malzemeleri nispeten pahalı olduğu için katmanlı imalat uygulamaları sıklıkla bu sektörde kendine yer bulmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ve imalat alanında geleneksel yöntemlerin beklentilere karşılık verememesi katmanlı imalat yöntemlerini akademik alanda ve şirketlerin ar-ge birimleri tarafından araştırılan popüler konulardan birisi haline getirmiştir. Bu yenilikçi ve devrimci imalat yöntemlerinin önündeki en büyük engellerden birisi malzemelerin oluşturduğu sınırlamadır. Sınırsız tasarımın ürüne dönüştürülebildiği bu yöntemlerde sadece belirli malzemelerle üretim gerçekleştirilmektedir. Kullanılan malzemelerdeki sınırlamalar ve yöntemlerin hala pahalı olması bu teknolojinin geniş kitlelerce ve seri üretimde kullanılmasını sınırlandırmaktadır.

Malzeme bilimindeki gelişmeler, teknolojik çalışmalaradaki ilerlemeler ve sektörlerdeki talepler göz önüne alındığında katmanlı imalat yöntemlerinin; medikalden, inşaat sektörüne; makineden, elektronik sektörüne ve

dolayısıyla uzay-havacılık, otomotiv, bilişim, gıda, onarım ve daha birçok alanda geleneksel imalatın yerini alacak yenilikçi ve devrimci bir yöntem olarak geleceğe emin adımlarla ilerlemektedir. Katmanlı imalat yöntemleri şimdiden geleneksel ve yüksek teknoloji sektörlerini etkilemekte ve endüstriyel dönüşümün bir parçası olduğunu göz önüne sermektedir.

### **Yazar katkısı**

#### *Author contribution*

Birinci yazar araştırma konusunun seçiminde, araştırma kurgusunun oluşturulmasında, literatür araştırması ve makalenin son yazım aşamalarında, ikinci yazar katmanlı imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler ve literatür araştırması aşamalarında, üçüncü yazar katmanlı imalat teknolojilerinin uygulama alanları aşamasında, dördüncü yazar katmanlı imalat teknolojilerinin sınıflandırılmasında ve makalenin son yazım aşamalarında katkı sunmuştur.

### **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*

- Baca, D., & Ahmad, R. (2020). The impact on the mechanical properties of multi-material polymers fabricated with a single mixing nozzle and multi-nozzle systems via fused deposition modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9-10), 4509-4520. <http://doi.org/10.1007/s00170-020-04937-3>
- Badiru, A. B., Valencia, V. V., & Liu, D. (2017). *Additive manufacturing handbook: Product development for the defense industry* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119106>
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2021). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209-225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659-681. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- Brandl, E., Palm, F., Michailov, V., Viehweger, B., & Leyens, C. (2011). Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire. *Materials and Design*, 32(10), 4665-4675. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.062>
- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2017). *3D printing and additive manufacturing: Principles and applications of rapid prototyping* (5th ed.). World Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.1142/10200>
- Cuchet, C., Muster, A., Germano, P., & Perriard, Y. (2017). *Soft magnets implementation using a stereolithography-based 3D printer*. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (ss. 1-5). Sydney: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056301>
- Çalışkan, C. İ., & Arpacioğlu, Ü. (2020). Yapı üretiminde eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 1117-1136. <https://doi.org/10.17482/uumfd.696952>



- Çelebi, A., Tosun, H., & Önçağ, A. Ç. (2017). Hasarlı bir kafatasının üç boyutlu yazıcı ile imalatı ve implant tasarımı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 27-35.
- Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107-121.
- Diksu, S. (2021). *Eklemeli imalat teknolojisi eriyik biriktirme modelleme yöntemi için kompozit ABS filament üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Duda, T., & Raghavan, L. V. (2016). 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>
- Dudek, P. (2013). FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(4), 1415-1418. <https://doi.org/10.2478/amm-2013-0186>
- Dupláková, D., Hatala, M., Duplák, J., Radchenko, S., & Steranka, J. (2018). Direct metal laser sintering—Possibility of application in production process. *SAR Journal*, 1(4), 123-127. <https://doi.org/10.18421/SAR14>
- Falahati, M., Ahmadvand, P., Safaee, S., Chang, Y. C., Lyu, Z., Chen, R., & Lin, Y. (2020). Smart polymers and nanocomposites for 3D and 4D printing. *Materials Today*, 40, 215-245. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.06.001>
- Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917-1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Gardan, J. (2019). Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(1), 1-18. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1518016>
- Gökhan, Ö. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.626011>
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 215-243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
- Jin, J., Yang, J., Mao, H., & Chen, Y. (2018). A vibration-assisted method to reduce separation force for stereolithography. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 793-801. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.052>
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals*, 47(2), 525-540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)
- Krznar, M., & Dolinsek, S. (2010). *Selective laser sintering of composite materials technologies*. 2010 21st International DAAAM Symposium (ss. 1527-1529). DAAAM: Vienna.
- Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J. (2017). Laser additive manufacturing: Aerospace applications of laser additive manufacturing. In H. Cain (Ed.), *Aerospace applications of laser additive manufacturing* (s. 351-371). Woodhead. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>
- Mazzanti, V., Malagutti, L., & Mollica, F. (2019). FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. *Polymers*, 11(7), 1094. <https://doi.org/10.3390/polym11071094>
- Meier, H., Haberland, C., & Frenzel, J. (2011). *Innovative developments in design and manufacturing: Advanced research in virtual and rapid prototyping* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203859476>
- Melchels, F. P., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>
- Mower, T. M., & Long, M. J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science Engineering: A*, 651, 198-213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.068>
- Nabipour, M., Akhoundi, B., & Bagheri Saed, A. (2020). Manufacturing of polymer/metal composites by fused deposition modeling process with polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(21), 48717. <https://doi.org/10.1002/app.48717>

- Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Additive manufacturing for the aerospace industry. In C. Gifford, & A. Akeh (Eds.), *Review of Additive Manufacturing Technologies and Applications in the Aerospace Industry* (ss. 7-31). Matthew Deans. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>
- Negi, S., Nambolan, A. A., Kapil, S., Joshi, P. S., Karunakaran, K. P., & Bhargava, P. (2020). Review on electron beam based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), 485-498. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2019-0182>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Özkan, D.Ç. (2019.) Hızlı prototipleme teknolojisinin gelişimi, çeşitleri ve imalat sektöründe sağladığı avantajlar. *Mühendis ve Makine*, 3(1), 34-41.
- Özsolak, O. (2019). Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*. 3(1), 9-14.
- Patterson, A. E., Messimer, S. L., & Farrington, P. A. (2017). Overhanging features and the SLM/DMLS residual stresses problem: review and future research need. *Technologies*, 5(2), 15. <https://doi.org/10.3390/technologies5020015>
- Santoliquido, O., Colombo, P., & Ortona, A. (2019). Additive manufacturing of ceramic components by digital light processing: A comparison between the “bottom-up” and the “top-down” approaches. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(6), 2140-2148. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.044>
- Shah, M., Patel, D. R., & Pande, S. (2022). Additive manufacturing integrated casting- A review. *Materials Today: Proceedings*, 62(13), 7199-7203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.413>
- Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., & Malek, S. (2019). Review of emerging additive manufacturing technologies in 3D printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment*, 4, 85. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085>
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Berto, F. (2020). 3D Printing of polymer composites: A short review. *Material Design & Processing Communications*, 2(2), 97. <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>
- Smith W. F. (1986). *Principles of materials science and engineering* (1st ed.). Elsevier. <https://stars.library.ucf.edu/scopus1980/168/>
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Swetham, T., Reddy, K. M. M., Huggi, A., & Kumar, M. N. (2017). A critical review on of 3D printing materials and details of materials used in FDM. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 3(2), 353-361.
- Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 343-353. <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>
- Udroiu, R., & Braga, I. C. (2017). *Polyjet technology applications for rapid tooling*. 2017 21st Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference (MATEC) (ss. 1-6). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711203011>
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, 11(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- Walachowicz, F., Bernsdorf, I., Papenfuss, U., Zeller, C., Graichen, A., Navrotsky, V., & Kiener, C. (2017). Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing. *Journal of Industrial Ecology*, 21(1), 203-215.
- Wohlers, T., & Caffrey, T. (2014). *Wohlers report 2014: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. <https://wohlersassociates.com/2014contents.htm>

- Wojtyła, S., Klama, P., & Baran, T. (2017). Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and Nylon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), 80-85. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1285489>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 1-10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, 4(5), 729-742. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- Zhang, X., Fan, W., & Liu, T. (2020). Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications*, 21, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>
- Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.

## Adsorption of methylene blue dye onto alginate-bioglass membranes: response surface method, isotherm, and kinetic studies

*Metilen mavisi boyasının aljinat-biyocam membranlara adsorpsiyonu: Cevap yüzey yöntemi, izoterm ve kinetik çalışmalar*

Hasan TÜRE \*<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Ordu Üniversitesi, Fatsa Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, 52200, Ordu

• Received: 31.01.2023

• Accepted: 28.04.2023

### Abstract

In this research, environment-friendly composite membranes based on alginate (ALG) and bioglass nanoparticles (BGs) were prepared by the solvent casting technique and utilized as adsorbents for the elimination of methylene blue (MB) from water. Zeta potential of the particles was determined to be -24.9 mV by laser dynamic light scattering (DLS), and their sizes were found to be 773 and 777 nm by transmission electron microscopy (TEM) and DLS analysis, respectively. Atomic force microscope (AFM) analysis revealed that increasing the BGs content from 1 to 5% w/v caused the root mean square roughness of membranes to increase from 159.38 to 182.03 nm. The adsorption process was successfully modeled and optimized using a hybrid response surface methodology integrated central composite design (RSM-CCD). A statistical analysis was utilized to examine and optimize the effects of three important independent variables (concentration of BGs (1-5% w/v), pH of the solution (3-9), and initial dye level (15-45 mg L<sup>-1</sup>)) on MB adsorption performance. The findings indicated that the quadratic model was suitable for prediction of MB's removal. Optimized experimental parameters were found to be a pH of 9, a contact time of 120 min, an initial MB concentration of 45 mg L<sup>-1</sup>, and a BGs concentration of 1% (w/v). Freundlich isotherm and pseudo-second-order kinetic models were found to be the best-fitting models in isotherm and kinetic studies, respectively. Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherm model predicted a chemical mechanism for MB adsorption onto the composite alginate membranes.

**Keywords:** Alginate, Bioactive glass, Methylene blue, Optimization, Response surface method

### Öz

*Bu çalışmada, solvent çözücü döküm yöntemi ile aljinat (ALG) ve biyocam nanopartikül (BGs) bazlı çevre dostu kompozit membranlar hazırlanmış ve metilen mavisinin (MB) sudan uzaklaştırılması için adsorban olarak kullanılmıştır. Partiküllerin zeta potansiyeli, lazer dinamik ışık saçılımı (DLS) ile -24,9 mV olarak belirlenmiş ve boyutları, transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve DLS analizi ile sırasıyla 773 ve 777 nm olarak bulunmuştur. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizi, BGs içeriğinin %1'den %5'e çıkarılmasının, membranların karekök ortalama pürüzlülüğünün 159,38 nm'den 182,03 nm'ye çıkmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Adsorpsiyon süreci, hibrit cevap yüzey metodolojisi ile bütünleşmiş merkezi bileşik tasarım (RSM-CCD) kullanılarak başarılı bir şekilde modellenmiş ve optimize edilmiştir. Üç önemli bağımsız değişkenin (BGs konsantrasyonu (%1-5 a/h), solüsyonun pH'ı (3- 9), ve başlangıç boya konsantrasyonu (15-45 mg L<sup>-1</sup>)) MB adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve optimize etmek için istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ikinci dereceden modelin MB'nin uzaklaştırılmasının tahmini için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Optimize edilmiş deneysel parametreler, pH=9, 120 dk temas süresi, 45 mg L<sup>-1</sup> başlangıç MB konsantrasyonu ve %1 (a/h) BGs konsantrasyonu olarak tespit edilmiştir. Freundlich izotermi ve yalancı ikinci dereceden kinetik modellerinin sırasıyla izoterm ve kinetik çalışmalarda en uygun modeller olduğu bulunmuştur. Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modeli, kompozit aljinat membranlara MB adsorpsiyonu için kimyasal bir mekanizma öngörmüştür.*

**Anahtar kelimeler:** Aljinat, Biyoaktif cam, Metilen mavisi, Optimizasyon, Cevap yüzey yöntemi

\* Hasan TÜRE; hasanture@odu.edu.tr

## 1. Introduction

Hazardous dye concentrations in waste water are increasing as a result of industrial activity, which has been considered a significant environmental issue worldwide (Oladipo et al., 2014; Tkaczyk et al., 2020). Many treatment approaches, such as chemical coagulation, various forms of oxidation processes, and biological processes, are being investigated for elimination of toxic dyes like methylene blue (MB) (Nidheesh et al., 2018; Katheresan et al., 2018; Baloch et al., 2018). Adsorption is regarded as promising treatment approach among these because of its affordability, simplicity, eco-friendliness, and high efficacy (Dlamini et al., 2020). Elimination of dyes from aqueous solutions has been accomplished over the last few decades using a variety of natural and synthetic adsorbents (Zhou et al., 2019; Mensah et al., 2022; Suba & Rathika, 2016). However, due to technological or economic limitations, the majority of these adsorbents were not applied on a widespread scale. Thus, there is a significant need for the creation of new, inexpensive adsorbents that are also effective, such as those made of natural materials (Allouss et al., 2019).

A silica-based material, such as bioglass (BGs), has a wide range of uses as catalytic support, adsorbents, and catalysts owing to its superior surface qualities when compared to zeolites and clays. Because of the surfaces' negative charges, BGs can be considered good MB adsorbents (Li et al., 2016). However, the use of BGs in powder form restricts their recovery and reusability (Godiya et al., 2019). Designing composite adsorbents by incorporating BGs into biopolymers could be considered one of the most efficient approaches to address this problem.

Due to their affordability, biocompatibility, and environmental friendliness, natural polysaccharide-based adsorbents like sodium alginate (ALG) have recently attracted a lot of attention for their ability to eliminate water contaminants. (Godiya et al., 2019; Sabbagh et al., 2021; Wang et al., 2019). Furthermore, existence of hydroxyl and carboxylic groups on ALG makes it a promising adsorbent for electrostatic interactions with cationic dyes (Djelad et al., 2019). ALG has been demonstrated to form promising composite adsorbents with organic and inorganic components, and both composites were shown to be efficient at MB adsorption (Alver et al., 2020; Boukoussa et al., 2021; Boukhalfa et al., 2019). Numerous operating factors interact nonlinearly during the adsorption process. Owing to the high number of experimental runs and time commitment, the common and traditional strategy for adsorption optimization seems to be no longer practical in this situation (Allouss et al., 2019; Karimifard & Moghaddam, 2018). The adsorption process is optimized by researchers utilizing statistical experimental design methods like response surface methodology (RSM) to overcome these limits. RSM is known as an effective mathematical and statistical method for carrying out experiments and building models by simultaneously changing a number of operating factors. RSM's main objective is to establish ideal working conditions quickly and with the fewest possible experiments (Ma et al., 2019). Among the several response surfaces designs, the central composite design (CCD) is one of the most effective and fruitful designs because it can evaluate variables of the quadratic model, produce serial designs, and notice a model-related lack of fit (Sabbagh et al., 2021). As far as I'm aware, no research has been done on removal of MB from aqueous solutions utilizing ALG-BGs membranes with precision RSM-CCD-based optimization.

In this study, BGs were prepared using the Stöber method, and then alginate membranes including varying concentrations of BGs (1, 3, and 5% w/v) were produced using the solvent casting approach, which was then crosslinked with calcium chloride. The developed membranes were used as adsorbents to take MB out of water.

Variables affecting MB removal efficiency, such as initial MB level, BGs level, and solution pH, were optimized using RSM-CCD. Furthermore, the obtained data were analyzed using isotherms (Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich) and kinetics (pseudo-first-order and pseudo-second-order) models to better examine adsorption behavior and mechanism. It should be noted that characterization of obtained samples is not the primary aim of this study.

## 2. Material and method

### 2.1. Materials

Ethanol (98%), calcium nitrate tetrahydrate (99%), sodium alginate, and tetraethyl orthosilicate (TEOS, 98%) were purchased from Sigma-Aldrich, Germany. Ammonium hydroxide (28%), HCl, CaCl<sub>2</sub>, and NaOH were received from Tekkim, Turkey. MB was provided from Pancreac, Spain.

### 2.2. Synthesis of bioglass

The BGs were synthesized according to my previous work (Türe, 2019). Briefly, a solution including 10 ml of ethanol, 4.5 ml of ammonium hydroxide, and 15 ml of deionized water was incorporated into another solution having 25 ml of ethanol and 3 ml of TEOS. After 30 minutes of stirring, 1.59 g of calcium nitrate tetrahydrate were added. The suspension was mixed for 90 minutes and centrifuged at 5000 rpm for 10 minutes. Resulting slurry was then rinsed with a water-and-ethanol solution (2:10 v/v). Then, leftovers were dried overnight at 60 °C and calcined for 2 hours at 700 °C.

### 2.3. Preparation of bioglass-containing alginate membranes

ALG powder was dissolved in deionized water utilizing magnetic stirrer at 25°C to obtain an ALG mixture (2% w/v). To make BGs-filled alginate membranes, a suitable number of BGs (1, 3, and 5% w/v) was added to solution, which was then homogenized at 2000 rpm for 20 minutes (WVR VDI 25, Germany). Then, the obtained solution was sonicated using a digital ultrasonic bath (WF-UD6, 50 kHz, Turkey) for 30 minutes at 40 °C. After that, mixture was put into petri dishes and dried for 48 hours at 40 °C. Following the drying stage, the films were removed from the petri plates and were cut into 25-mm-diameter discs. Then, the prepared films were soaked in 100 mL of a 2% (w/v) CaCl<sub>2</sub> solution for 10 minutes to allow cross-linking. Finally, films were treated several times with deionized water to eliminate any remaining CaCl<sub>2</sub> and dried for 24 hours at 40 °C. Samples are coded based on the amount of bioglass they contain; for example, ALG-1 is a membrane that includes 1% (w/v) BGs.

### 2.4. Transmission electron microscopy (TEM)

BGs were dissolved in deionized water using magnetic stirrer for 10 minutes at a concentration of roughly 0.1 g/L for TEM examination. Thereafter, a transmission electron microscope was used to quickly collect micrographs after pipetting a single drop of solution onto a carbon-coated grid without any additional steps. (Hitachi HighTech HT7700, Japan).

### 2.5. Analysis of the zeta potential, particle size, and the polydispersity index of BGs

A laser-based dynamic light scattering device (Malvern Instruments, UK) was utilized to measure the zeta potential, polydispersity index (PDI), and particle size of BGs at room temperature. Measurements were carried out after suspending the powdered BGs in water at pH 6.4.

### 2.6. Atomic force microscopy (AFM)

Tapping mode was used to perform AFM measurements (Picoforce SPM, US). Standard silicon cantilevers with spring constants of 40 N m<sup>-1</sup> were utilized. Maximum scan rate used for the measurements was 1 Hz. Three AFM height pictures taken at three separate locations on the membranes were used to calculate the root mean square roughness (Rq).

### 2.7. Process variables and RSM

BGs concentration, pH of the MB solution, and initial MB level were chosen as three independent variables to examine their effects. These factors were selected in accordance with publications in the literature on dye adsorption and the results of preliminary laboratory tests. Contact time, agitation speed, and temperature were set at 120 minutes, 150 rpm, and 25±2 °C, respectively. Design-Expert statistical software package 8.0 was utilized to create all of the trials, producing 20 runs for the face central CCD mode (Table 1).

**Table 1.** CCD experimentation factors and levels

Factors	Levels		
	Low	Central	High
(A) pH			
(B) BGs concentration (w/v)			
(C) Initial dye concentration (mg/L)	(-1)	0	(+1)
Runs	A	B	C
1	3	1	15
2	3	5	15
3	3	3	30
4	3	1	45
5	3	5	45
6	6	3	15
7	6	1	30
8	6	3	30
9	6	3	30
10	6	3	30
11	6	3	30
12	6	3	30
13	6	3	30
14	6	5	30
15	6	3	45
16	9	1	15
17	9	5	15
18	9	3	30
19	9	1	45
20	9	5	45

## 2.8. Adsorption experiments

Adsorption studies were carried out in beakers including 25 mL of a known concentration of MB solution (15-45 mg/L) and an adequate weight of ALG-BGs membranes. The beakers were shaken in an orbital shaker (WiseCube, WIS-20R, Germany) at a constant speed of 150 rpm for 120 minutes. Adsorption experiments were performed at  $25 \pm 2$  °C and at pH (3- 9). Based on the RSM-CCD approach, operating parameters including BGs concentration, initial MB level, and pH were researched and adjusted for maximal MB elimination. Following the reaction period, the membranes were simply removed, and amount of the dye adsorption was evaluated utilizing a UV-vis spectrophotometer (Shimadzu-UVmini-1240) at 664 nm. The following formula was used to get the adsorption capacity:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

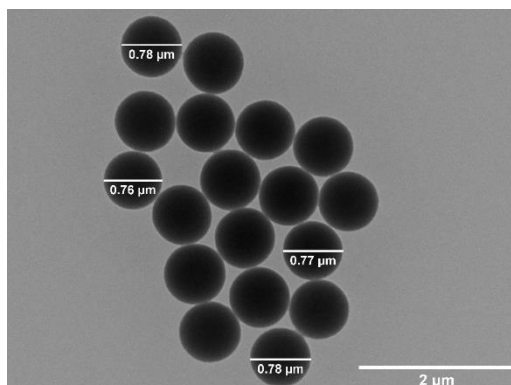
where  $C_e$  (mg/L) and  $C_0$  (mg/L) are equilibrium and initial dye levels, respectively;  $m$  (g) is weight of dry adsorbent, and  $V$  (L) is volume of dye solution.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Characterization of adsorbents

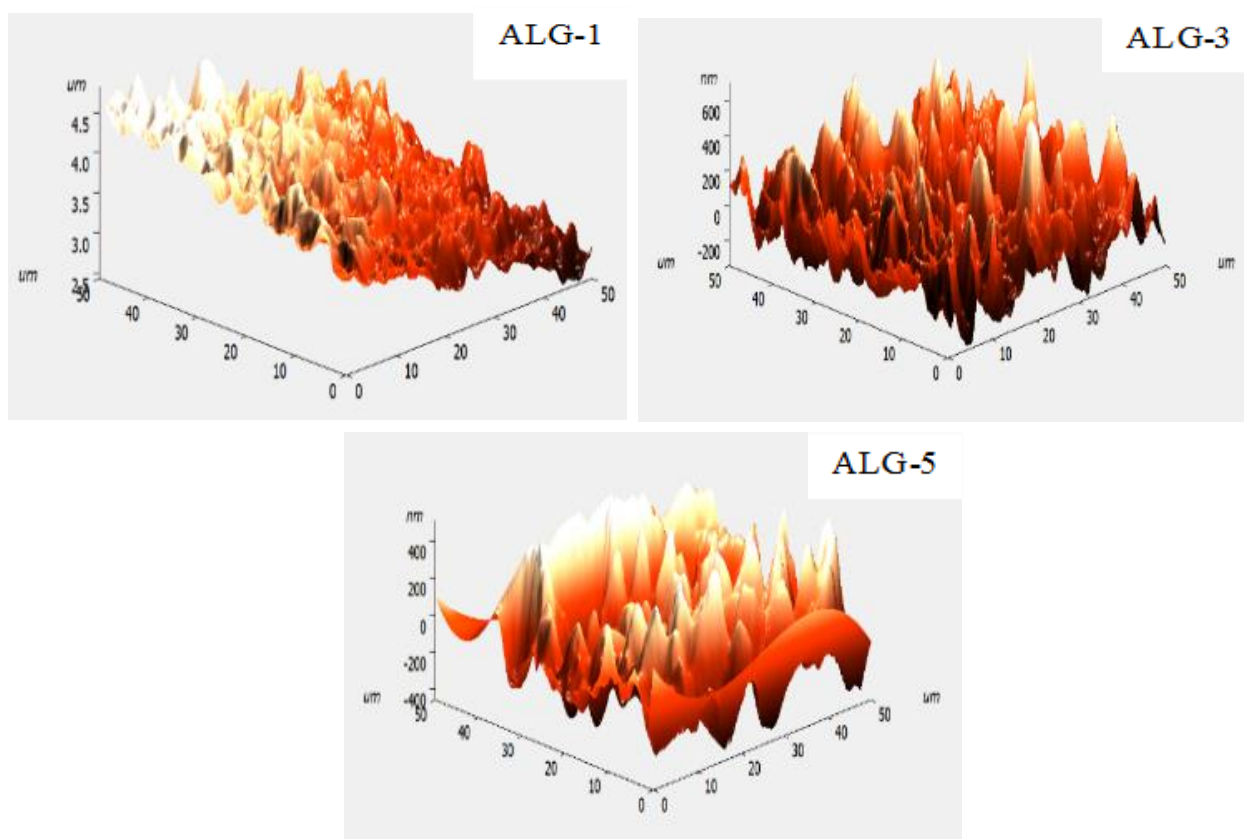
The particles were spherical in form and had an average diameter of 773 nm, according to TEM analysis (Figure 1). The size of the obtained particles was estimated by DLS analysis to be 777 nm, which is in line with the result of TEM analysis. The particles displayed a narrow particle size distribution with a PDI of about 0.3, which is typical of highly monodispersed systems, according to DLS analysis (Mostafa et al., 2021). DLS analysis also showed that the particles' zeta potential was found to be -24.9 mV, indicating that the BGs were negatively charged and thus sufficiently stable in water to be used in the development of composite membranes

(Zheng et al., 2017; Zheng et al., 2018). In the previous study, it was detected that zeta potential value and the size of the particles obtained by same method were higher. The reason for this can be clarified by the fact that the addition of copper causes an increase in the diameter and zeta potential value of the particles (Türe, 2019).



**Figure 1.** TEM image of obtained BGs particles

The AFM 3D-surface images of the ALG-1, ALG-3, and ALG-5 samples are demonstrated in Figure 2



**Figure 2.** AFM-3D surface ALG membranes containing 1-5 % w/v BGs

AFM was used to assess the roughness of alginate membranes and the effect of BGs addition. The  $R_q$  values of ALG-1, ALG-3 and ALG-5 membranes were calculated as 159.38, 168.17 and 182.03, respectively. More uniform BGs dispersion and homogenous morphological structures produced by intermolecular interactions between various phase constituents are two factors that contribute to lower surface roughness (Abdullah et al., 2019). Dziadek et al. (2015) also reported surface roughness increased when bioactive glass particles were incorporated into Poly( $\epsilon$ -caprolactone) films. The properties of bioglass-containing alginate membranes, such as swelling, mechanical properties, and interactions between ALG and BGs, can be obtained from my previously published work (Türe, 2019).



### 3.2. RSM modeling using CCD

The typical "one factor at a time" optimization used in adsorption procedures to achieve maximal dye removal is time-consuming and labor-intensive. RSM has recently been shown to be a successful strategy for reducing experimentation costs and time. In this section of the experiment, RSM and CCD were used to determine the ideal circumstances for removing MB from ALG-BGs membranes (Al-Sakkari et al., 2020). The following second-order polynomial equation represents the most prevalent empirical model in RSM that explains how design parameters relate to response (Allouss et al., 2019).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \quad (2)$$

where,  $\beta_0$  represents constant coefficient, coefficients for linear, interaction, and quadratic terms are  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$  and  $\beta_{ii}$  li, respectively,  $k$  indicates number of independent factors,  $x_i$  and  $x_j$  are input variables, and  $Y$  is predicted response used as dependent variable.

The mathematical equation that explains how the current adsorption process responds to three selected variables given by the software is as follows:

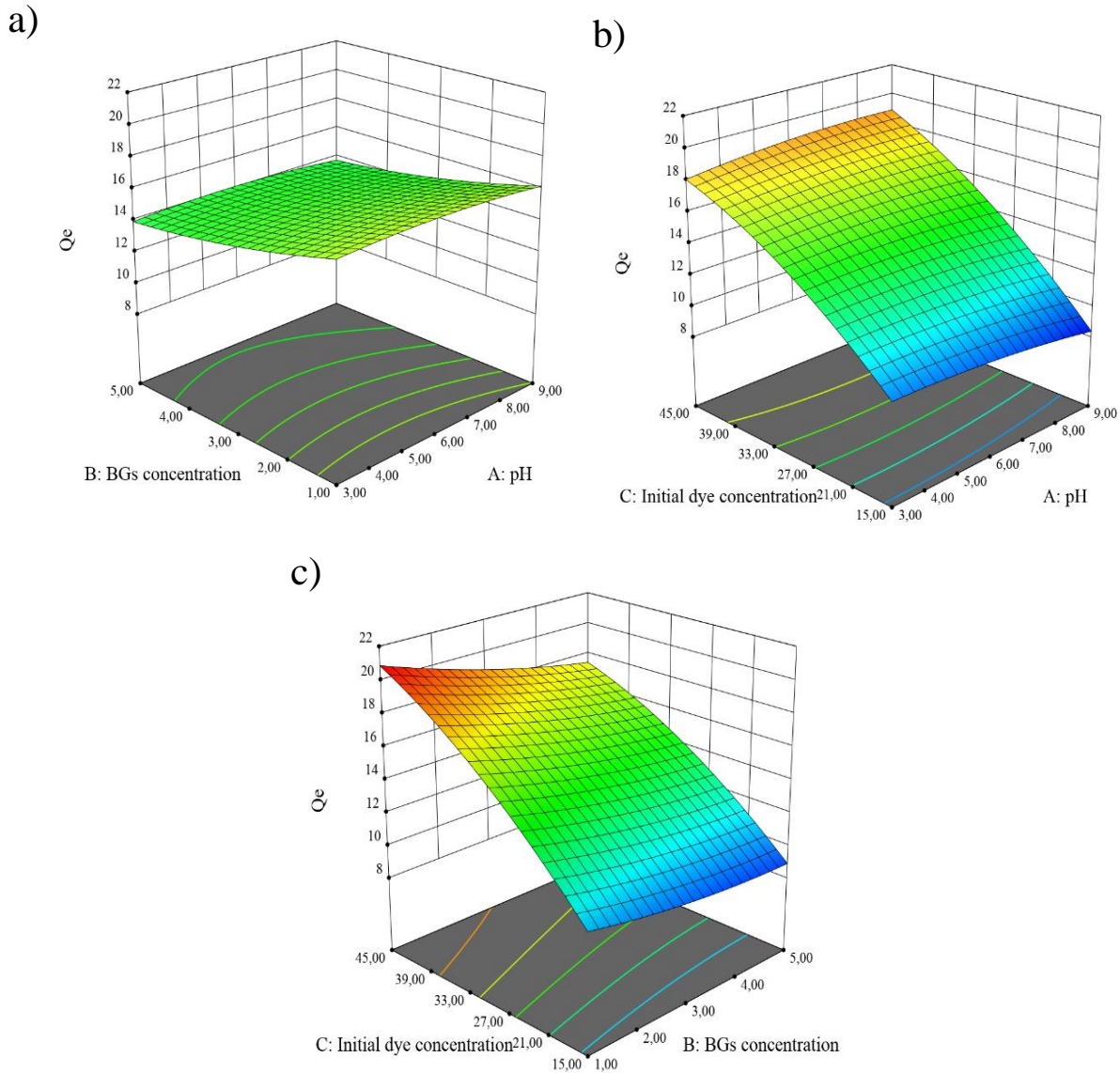
$$Q_e = 15.08 + 0.13A - 1.25B + 4.74C + 0.02AB + 0.54AC - 0.46BC - 0.30A^2 + 0.35B^2 - 1.01C^2 \quad (3)$$

**Table 2.** ANOVA analysis of MB removal

Source	Sum of squares	df	F-value	p value	
<b>Model</b>	249.39	9	120.63	<0.0001	significant
<b>A</b>	0.1701	1	0.7406	0.4096	
<b>B</b>	15.66	1	68.19	<0.0001	
<b>C</b>	224.38	1	976.76	<0.0001	
<b>AB</b>	0.0042	1	0.0182	0.8952	
<b>AC</b>	2.31	1	10.06	0.01	
<b>BC</b>	1.71	1	7.43	0.0213	
<b>A<sup>2</sup></b>	0.2418	1	1.05	0.3291	
<b>B<sup>2</sup></b>	0.3415	1	1.49	0.2507	
<b>C<sup>2</sup></b>	2.79	1	12.12	0.0059	
<b>Residual</b>	2.30	10			
<b>Lack-of-fit</b>	0.9887	5	0.7556	0.6170	not significant
<b>Pure error</b>	1.31	5			
<b>Cor total</b>	251.69	19			
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9909				
<b>R<sup>2</sup> Adj</b>	0.9827				

The information in Table 2 shows the  $R^2$  value (0.9909) and adjusted  $R^2$  value (0.9827 values) are highly correlated and, as a result, are in good settlement for quadratic model. This implies a link between process variables and response, which is very well explained by quadratic model. The  $R^2$  value of 0.9909 shows that proposed mathematical model can explain 99.09% of the total variation in MB adsorption data and that it cannot explain just 0.91% of the total variation. According to the ANOVA findings (Table 2), model's  $F$ -level of 120.63 and  $p$ -level of 0.0001 indicate it is statistically important. Furthermore,  $p$ -values were used to assess the relevance of each of linear terms (A, B, and C), interaction terms (AB, AC, and BC), and quadratic terms ( $A^2$ ,  $B^2$ , and  $C^2$ ) on the response. The literature states that a  $p$ -value of less than 0.05 for each factor in an ANOVA table indicates that related factor is significant at a 95% confidence level. Since the  $p$ -values for the BGs concentration (B), initial dye concentration (C), AC, BC, and  $C^2$  are all less than 5%, these terms were all chosen as highly important model terms. Terms B (BGs concentration) and C (initial dye level) in the tested range are important parameters favorably affecting the MB adsorption on ALG-BGs, based on data in Table 2. Term B has negative coefficient values, indicating that these factors have a negative impact on response (i.e., adsorption capacity declines). According to the results of the ANOVA, lack of fit is not important in comparison to error, so that model adequately explains the data (Marzban et al., 2021).

In Figure 3, 3D-response surface plots for the MB adsorption capacity illustrate graphical representations of the regression equation. From these graphical representations, it is obvious that capacity of MB adsorbed gets increased with a rise in the initial MB level, which enhances interaction between MB and ALG-BGs membranes. pH of solution had little impact on adsorption process, and increasing the pH was beneficial. Marzban et al. (2021) reported a similar observation in alginate beads containing kaolin. However, the adsorption capability of the membranes reduced as the BGs concentration increased. Optimized experimental parameters providing the highest measured MB removal (99.56%) are: agitation speed of 150 rpm,  $T = 25 \pm 2$  °C, initial dye concentration of  $45 \text{ mg}^{-1}$ , time of 120 min, pH of 9, 0.05 g, and BGs concentration of 1% (w/v).

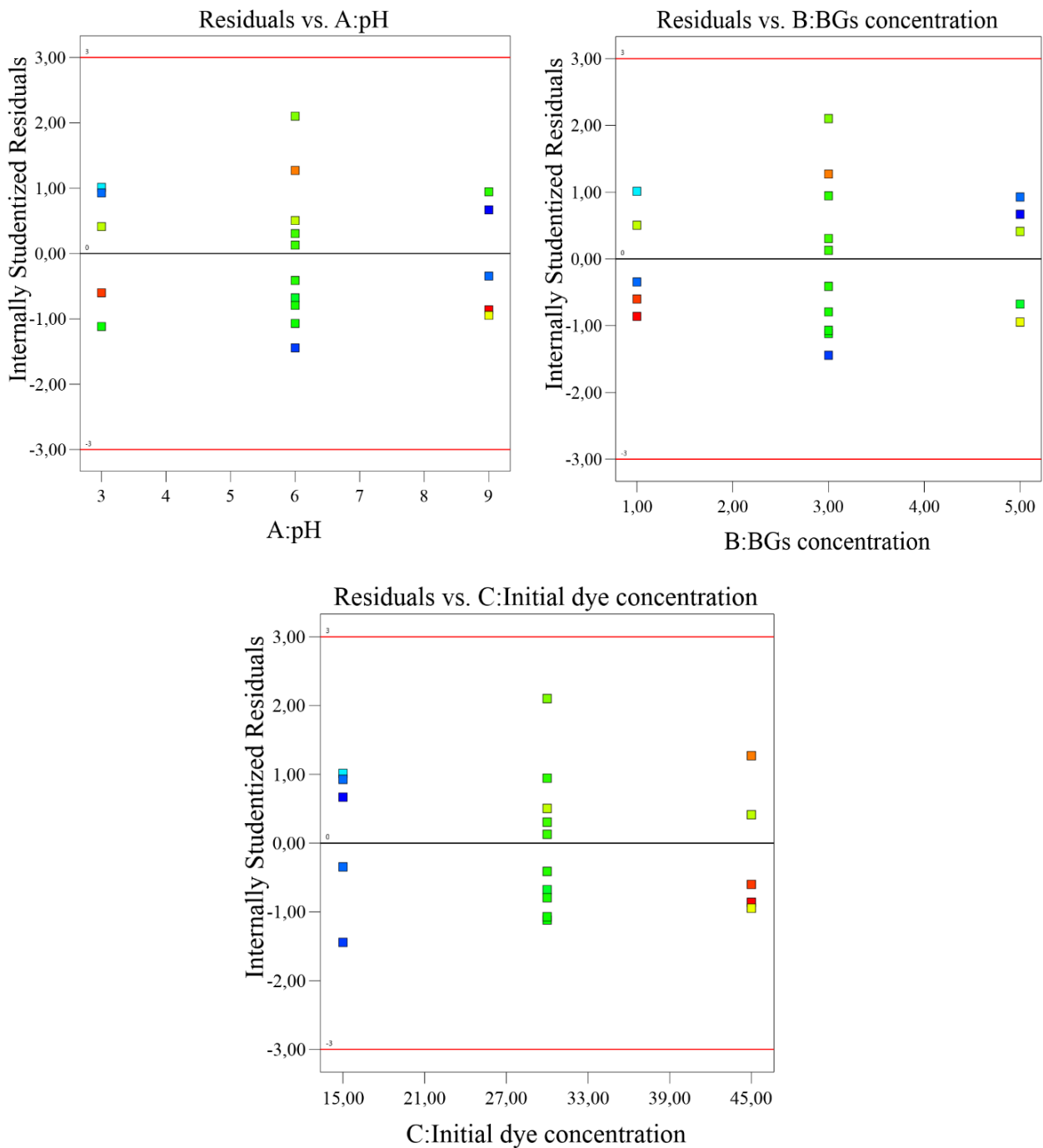


**Figure 3.** Effects of (a) BGs concentration-pH, (b) initial dye level-pH, and (c) initial dye concentration-BGs level on yield of MB elimination by ALG-1 membranes are shown in 3D surface plots

### 3.3. Verification of models

To validate the model, comparison graphs and diagnostic plots have been studied. The residuals' placement close to the straight line, as seen in Figure 4, supports the model's fitting. Figure 5(a) shows the probability of the outcomes plotted against the residuals. There is no stray point in the line. The residuals and predicted responses are displayed in Figure 5 (b). The red line's upper limit contains all of the data. Thus, it can be said that the model is appropriate. Figure 5(c) depicts a comparison of the actual and projected values. The linear

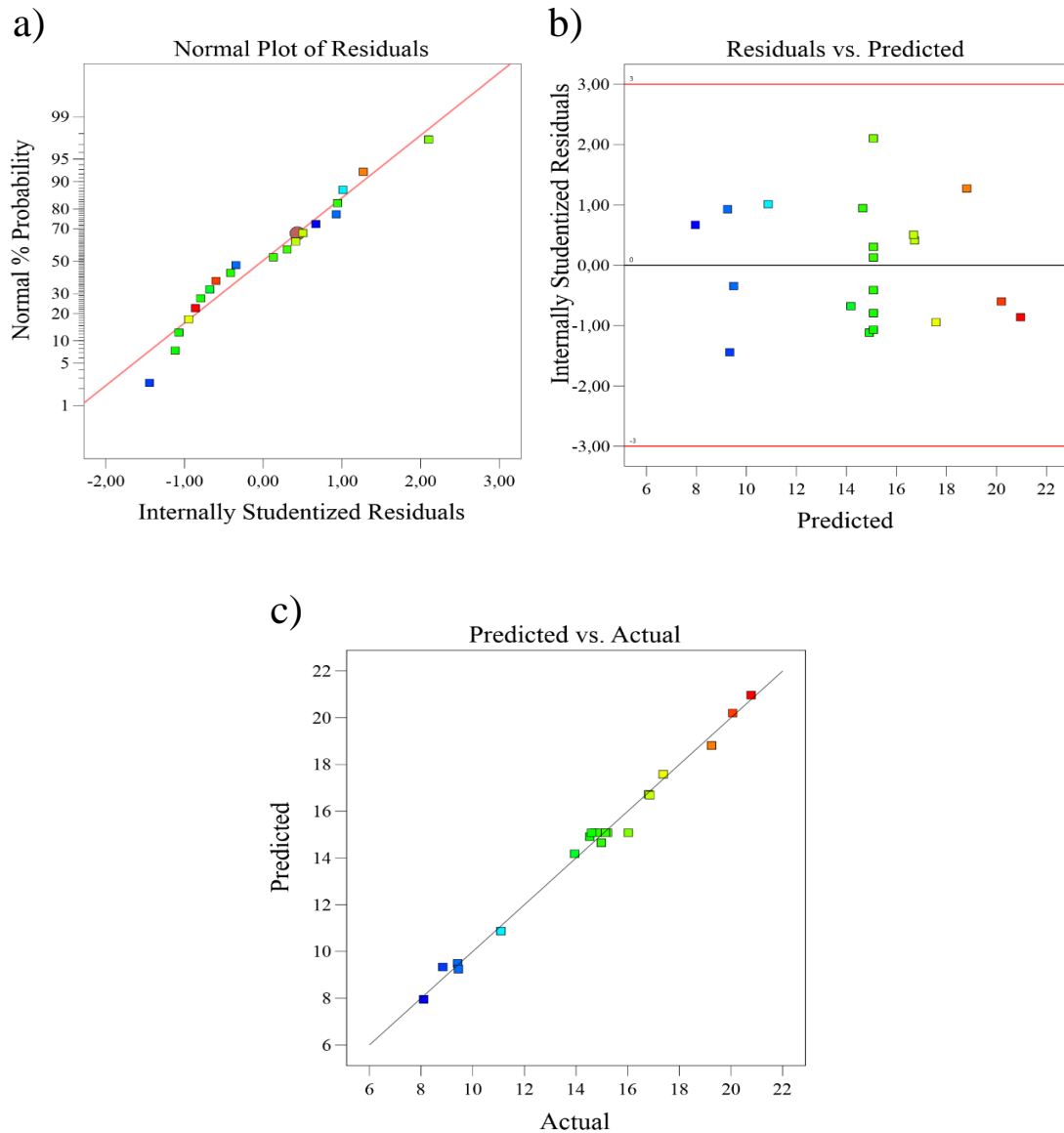
line becomes the center of all points. Given these findings, it is reasonable to infer that the suggested mathematical model was suitable and efficient for the evaluation of MB adsorption by ALG-BGs membranes.



**Figure 4.** Diagnostic plots of residuals against factors

### 3.4. Isotherms studies

Adsorption tests using an ALG-1 membrane were carried out with starting MB levels ranging from 5 to 45 mg L<sup>-1</sup> in order to learn more about how the initial MB level impacts the effectiveness of the adsorption process. The pH and contact time in this experiment were kept constant at 9 and 120 min, respectively. To accurately describe the relationship between MB and ALG-1 adsorbents at equilibrium, various models, including the Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich (D-R) isotherms, were utilized to explain results. These models provide some understanding of how the accessible adsorption sites are distributed throughout the surface of adsorbent and aid in understanding mechanism of adsorption.



**Figure 5.** Diagnostic plots of normal probability against residuals (a), residuals against predicted responses (b), and predicted results against actual results (c)

Linear forms of Langmuir, Freundlich, and Dubinin-Radushkevich isotherms are defined by equations (4), (5), and (6), respectively (Allouss et al., 2019).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{bq_m C_e} \tag{4}$$

$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \tag{5}$$

$$\ln(q_e) = \ln(q_m) - \beta \varepsilon^2 = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e}\right) \tag{6}$$

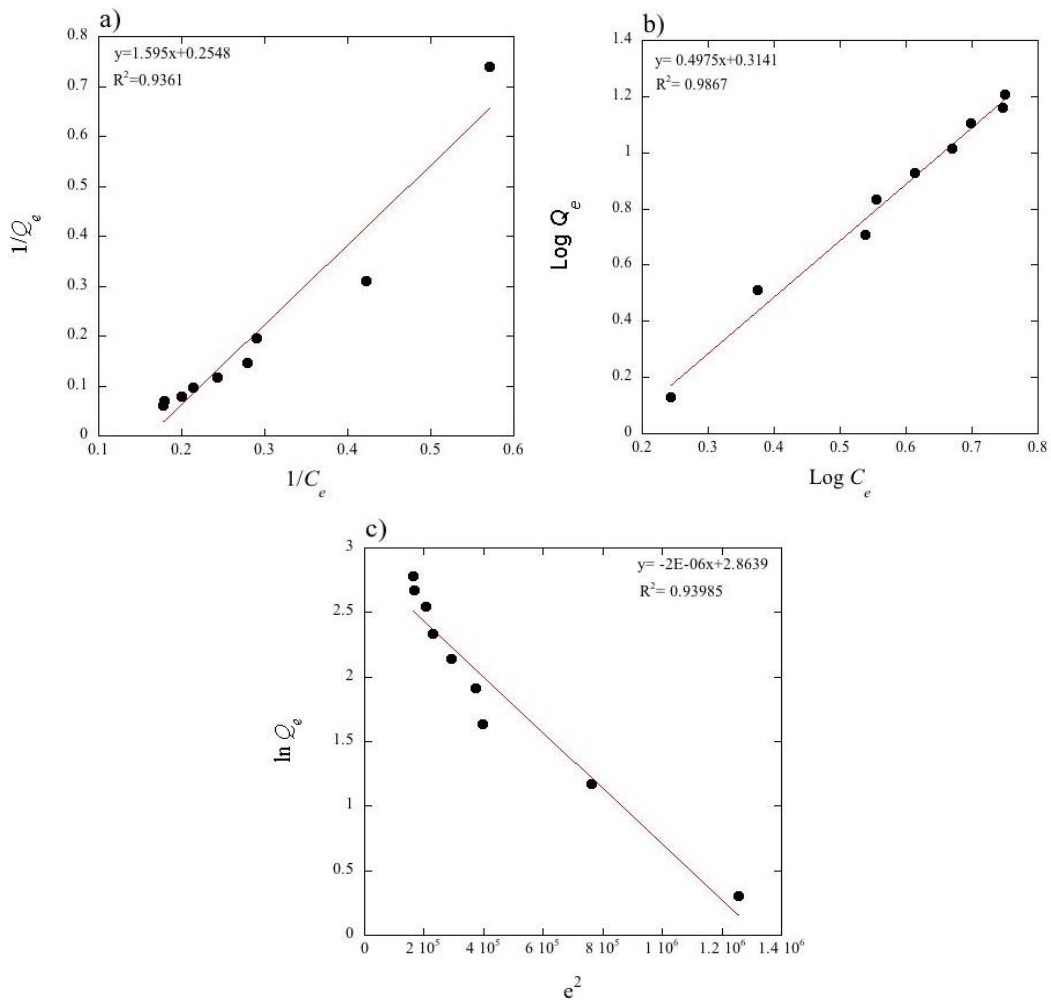
where  $q_e$  represents the equilibrium adsorption capacity ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $C_e$  indicates dye level at equilibrium ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $b$  shows Langmuir constant ( $\text{L mg}^{-1}$ ),  $q_m$  demonstrates maximum capacity for adsorption ( $\text{mg g}^{-1}$ ),  $K_F$  represents Freundlich constant,  $n$  is heterogeneity factor and  $\beta$  shows a constant linked to free energy ( $\text{mol}^2 \text{kJ}^{-2}$ ),  $R$  and  $T$  indicates the gas constant ( $8.314 \text{ J/ mol/K}$ ), absolute temperature (K), respectively. Linear fitting of Langmuir and Freundlich models to equilibrium data is shown in Figures 6 (a) and (b), respectively. Experimental constants for Langmuir and Freundlich are demonstrated in Table 3. We can reasonably infer from the high correlation coefficient ( $R^2$ ) that Freundlich model offered a more accurate description of the

isotherm data when ALG-1 was used as an adsorbent. This demonstrates that MB is adsorbed onto the ALG-BGs membrane using a multilayer process on a heterogeneous surface (Marzban et al., 2021). Freundlich isotherm was utilized to reveal adsorption of MB onto hydrogel beads made of carboxymethyl cellulose, alginate, and graphene oxide, according to Allouss et al. (2019). In addition, results showed that  $K_F$  was 2.06 for linear approaches of the Freundlich adsorption isotherm that is in range of 1-20, which would be considered promising for adsorption. Similar to this, if the value of  $n$  is greater than 1, adsorption intensity indicated by  $n$  reveals the suitability of the model for adsorption purposes (Batool et al., 2018).

Experimental adsorption data have been fitted employing Dubinin-Radushkevich isotherm model to investigate whether adsorption is a chemical or physical process (Figure 6 (c)). Table 3 contains the D-R isotherm constants for this model's adsorption free energy and the maximum adsorption determined by eq (7) for each. The following equation was employed to calculate mean free energy of adsorption ( $E_a$ ) using value of D-R isotherm constant ( $\beta$ ):

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \tag{7}$$

On the basis of the literature, chemisorption is the rate-limiting step when free energy ( $E_a$ ) value is higher than  $16 \text{ kJ mol}^{-1}$ , while physisorption is appropriate when the value is less than  $8 \text{ kJ mol}^{-1}$  (Tan et al., 2018; Allouss et al., 2019). Since the value of  $E_a$  in this study was higher than  $8 \text{ kJ mol}^{-1}$  (Table 3), it is possible that chemical binding is the cause of the MB adsorption on the ALG-1 membrane. This leads to the conclusion that chemical processes rather than physical processes underlie the majority of MB binding to the ALG-BGs.



**Figure 6.** Linear fitting plots of the (a) Langmuir, (b) Freundlich, and (c) Dubinin–Radushkevich isotherms.

**Table 3.** Parameters of the isotherm for MB adsorption on the membranes of ALG-1

Models	Parameters	Values
Langmuir	$q_m$ (mg g <sup>-1</sup> )	3.92
	$b$ (L mg <sup>-1</sup> )	0.16
	$R^2$	0.9361
Freundlich	$K_F$	2.06
	$n$	2.01
	$R^2$	0.9867
Dubinin-Radushkevich	$q_m$ (mg g <sup>-1</sup> )	17.53
	$\beta$ (mol <sup>2</sup> K <sup>-2</sup> J <sup>-2</sup> )	2x10 <sup>-6</sup>
	$E_a$ (KJ mol <sup>-1</sup> )	500
	$R^2$	0.9399

### 3.5. Adsorption kinetics

The kinetics of adsorption were evaluated using an ALG-1 sample with an initial MB level of 45 mg<sup>-1</sup>, pH of 9.0, and a contact time of 5 to 120 min. To understand adsorption kinetics of MB onto ALG-1 membrane, pseudo-1<sup>st</sup>-order and pseudo-2<sup>nd</sup>-order models were used to fit experimental results (Ma et al., 2019). Eq (8) represents equation of a pseudo-1<sup>st</sup>-order kinetic model.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (8)$$

where  $q_e$  and  $q_t$  indicate amounts of dye adsorbed on adsorbent (mg g<sup>-1</sup>) at equilibrium and at time  $t$ , respectively, and  $k_1$  is equilibrium rate constant of pseudo-1st-order model (min<sup>-1</sup>), Table 4 shows levels of rate constant  $k_1$ , predicted  $q_e$ , and  $R^2$ .

Linear equation for the pseudo-2<sup>st</sup> order kinetic model is depicted in equation below:

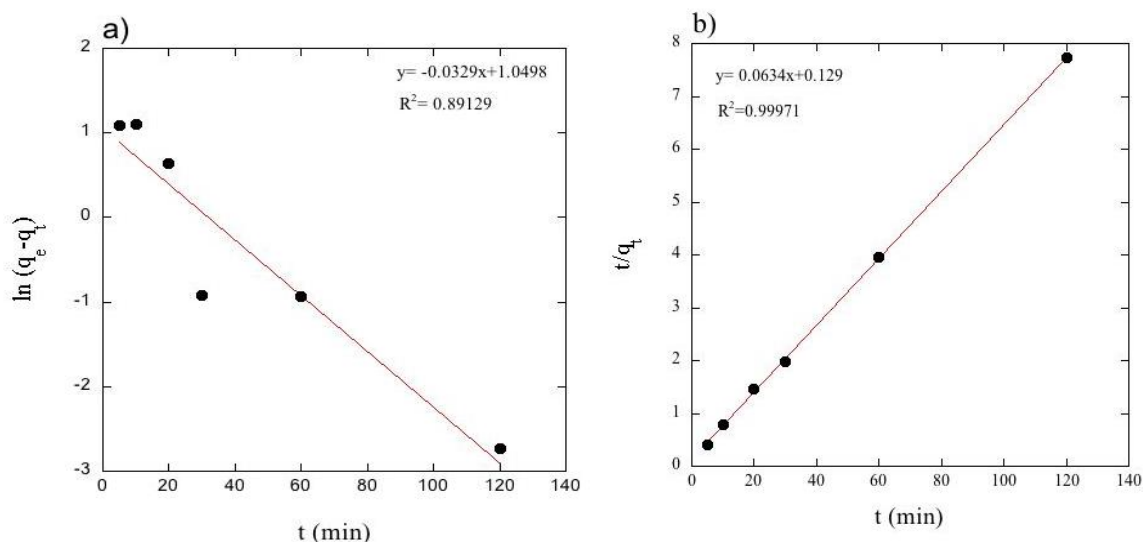
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (9)$$

where  $q_e$  and  $q_t$  indicates adsorption capacities (mg g<sup>-1</sup>) at equilibrium and time ( $t$ ), respectively, and  $k_2$  is pseudo-2<sup>nd</sup>-order model's equilibrium rate constant (g mg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>). Table 4 lists values of rate constant  $k_2$ , predicted  $q_e$ , and  $R^2$ .

Adsorption kinetics parameters for pseudo-1<sup>st</sup>-order and pseudo-2<sup>nd</sup>-order models, respectively, were estimated using linear plots in Figures 7 (a) and (b), and findings are listed in Table 4. The information in Table 4 indicates that pseudo-second-order kinetic model's  $R^2$  for a level of 45 mg L<sup>-1</sup> is significantly higher than pseudo-first-order kinetic model's  $R^2$ . The fact that theoretical  $q_e$  values agree with the experimental data reveals that this adsorption process is governed by pseudo-second-order kinetics. The pseudo-second-order model, in which amount of accessible active sites in the ALG-BGs adsorbent greatly influences MB adsorption efficiency, is therefore a better fit for experimental kinetic data for MB adsorption (Allouss et al., 2019; Alver et al., 2020).

**Table 4.** Parameters for kinetic model of MB adsorption on the ALG-1 membrane

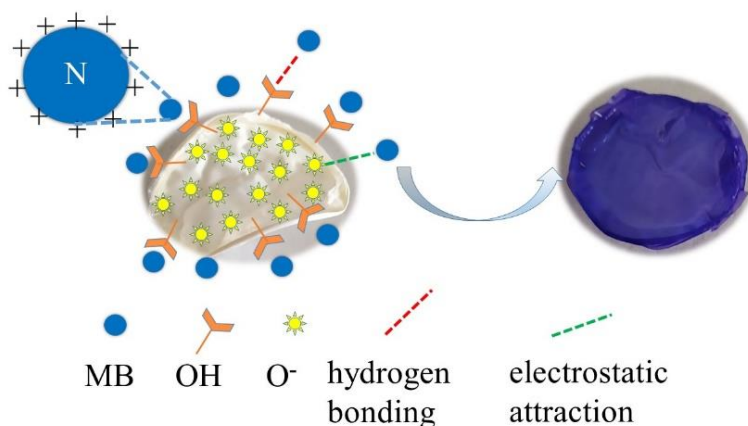
Models	Parameters	Values
Pseudo-first order kinetic	$q_{e, exp}$ (mg g <sup>-1</sup> )	2.86
	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	0.00027
	$q_{e, calc}$ (mg g <sup>-1</sup> )	15.5
	$R^2$	0.8913
Pseudo-second order kinetic	$q_{e, exp}$ (mg g <sup>-1</sup> )	15.5
	$k_2$ (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	0.03116
	$q_{e, calc}$ (mg g <sup>-1</sup> )	15.7
	$R^2$	0.9997



**Figure 7.** Kinetics of adsorption of MB dye on ALG-1 membrane: (a) Pseudo-first order-kinetic; (b) Pseudo second-order kinetic models

### 3.6. Proposed adsorption mechanism

The nature of an adsorbate, the characteristics of an adsorbent, and any potential interactions between an adsorbate and an adsorbent all affect how a pollutant is absorbed onto that material. A model of the MB adsorption mechanism was presented (Figure 8). The electrostatic forces and hydrogen bonds formed by the free Si-O<sup>-</sup> present in BGs, as well as some alginate OH groups that did not interfere with the crosslinking process, could be used to deduce the MB dye removal mechanism. As shown, the mechanism is connected to two different interactions. The electrostatic attraction force was attributed to the first interaction, which results from the difference in charges between the molecules of MB and surface material of the BG. Hydrogen bonding between dye's amine groups and the hydroxyl groups in adsorbent membranes was said to be responsible for the second one (Boukoussa et al., 2021; Mokhtar et al., 2020).



**Figure 8.** Proposed adsorption mechanism of MB on ALG-BGs membrane

### 4. Conclusions

In this work, BGs particles obtained by the modified Stöber method were incorporated into an alginate biopolymer to prepare composite membranes for the removal of MB dye. DLS analysis and TEM results showed that BGs particles exhibited good water dispersibility and were homogeneous in size and form. According to an AFM analysis, the roughness of the membranes increased with BGs concentration. An efficient and trustworthy strategy for maximizing adsorption parameters for MB removal was offered by the RSM-CCD model. Significant regression coefficients were achieved ( $R^2$ -value 99.09% and adjusted  $R^2$ -value 98.27%), which demonstrated that adsorption process is controlled by a polynomial quadratic model. At pH =

9, initial MB level of 45 mg L<sup>-1</sup>, and BGs concentration of 1% w/v, the optimal values were found, at which point maximum removal rate was attained. The Freundlich model provided a good description of experimental data on adsorption. ( $R^2= 0.9867$ ). Kinetics studies indicated that the MB adsorption process on ALG-1 membrane was dominated by a pseudo-second-order mechanism ( $R^2= 0.9997$ ). Based on value of  $E_a$  obtained from D–R model, the dominant mechanism of MB adsorption was chemical adsorption. Due to their biocompatibility and biosafety, the produced ALG-BGs membranes could therefore be used as candidates for the removal of dye pollutants.

### Author contribution

Hasan Türe completed all stages of the study, including the preparation and characterization of samples, research, statistical analysis, etc.

### Declaration of ethical code

For this investigation, no specific ethical approval was required.

### Conflicts of interest

There are no apparent conflicts.

### References

- Abdullah, Z. W., Dong, Y., Han, N., & Liu, S. (2019). Water and gas barrier properties of polyvinyl alcohol (PVA)/starch (ST)/glycerol (GL)/halloysite nanotube (HNT) bionanocomposite films: Experimental characterisation and modelling approach. *Composites Part B: Engineering*, 174, 107033. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107033>
- Allouss, D., Essamlali, Y., Amadine, O., Chakir, A., & Zahouily, M. (2019). Response surface methodology for optimization of methylene blue adsorption onto carboxymethyl cellulose-based hydrogel beads: adsorption kinetics, isotherm, thermodynamics and reusability studies. *RSC Advances*, 9(65), 37858-37869. <https://doi.org/10.1039/c9ra06450h>
- Al-Sakkari, E. G., Abdeldayem, O. M., Genina, E. E., Amin, L., Bahgat, N. T., Rene, E. R., & El-Sherbiny, I. M. (2020). New alginate-based interpenetrating polymer networks for water treatment: A response surface methodology based optimization study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 772-785. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.220>
- Alver, E., Metin, A. Ü., & Brouers, F. (2020). Methylene blue adsorption on magnetic alginate/rice husk bio-composite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.330>
- Baloch, H. A., Nizamuddin, S., Siddiqui, M. T. H., Riaz, S., Jatoi, A. S., Dumbre, D. K., Griffin, G. (2018). Recent advances in production and upgrading of bio-oil from biomass: A critical overview. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(4), 5101-5118. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.050>
- Batool, F., Akbar, J., Iqbal, S., Noreen, S., & Bukhari, S. N. A. (2018). Study of isothermal, kinetic, and thermodynamic parameters for adsorption of cadmium: an overview of linear and nonlinear approach and error analysis. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, <https://doi.org/10.1155/2018/3463724>
- Boukhalfa, N., Boutahala, M., Djebri, N., & Idris, A. (2019). Kinetics, thermodynamics, equilibrium isotherms, and reusability studies of cationic dye adsorption by magnetic alginate/oxidized multiwalled carbon nanotubes composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 539-548. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.102>
- Boukoussa, B., Mokhtar, A., El Guerdaoui, A., Hachemaoui, M., Ouachtak, H., Abdelkrim, S., Bengueddach, A. (2021). Adsorption behavior of cationic dye on mesoporous silica SBA-15 carried by calcium alginate beads: Experimental and molecular dynamics study. *Journal of Molecular Liquids*, 333, 115976. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115976>



- Djelad, A., Mokhtar, A., Khelifa, A., Bengueddach, A., & Sassi, M. (2019). Alginate-whey an effective and green adsorbent for crystal violet removal: Kinetic, thermodynamic and mechanism studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 139, 944-954. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.068>
- Dlamini, D. S., Tesha, J. M., Vilakati, G. D., Mamba, B. B., Mishra, A. K., Thwala, J. M., & Li, J. (2020). A critical review of selected membrane-and powder-based adsorbents for water treatment: Sustainability and effectiveness. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123497. <https://doi.org/j.jclepro.2020.123497>
- Dziadek, M., Menaszek, E., Zagrajczuk, B., Pawlik, J., & Cholewa-Kowalska, K. (2015). New generation poly ( $\epsilon$ -caprolactone)/gel-derived bioactive glass composites for bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 56, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.06.020>
- Godiya, C. B., Liang, M., Sayed, S. M., Li, D., & Lu, X. (2019). Novel alginate/polyethyleneimine hydrogel adsorbent for cascaded removal and utilization of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  ions. *Journal of Environmental Management*, 232, 829-841. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.131>
- Karimifard, S., & Moghaddam, M. R. A. (2018). Application of response surface methodology in physicochemical removal of dyes from wastewater: a critical review. *Science of the Total Environment*, 640, 772-797. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.355>
- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(4), 4676-4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- Li, L., Chen, L., Shi, H., Chen, X., & Lin, W. (2016). Evaluation of mesoporous bioactive glass (MBG) as adsorbent for removal of methylene blue (MB) from aqueous solution. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(2), 1451-1459. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.01.039>
- Ma, Y., Qi, P., Ju, J., Wang, Q., Hao, L., Wang, R., Tan, Y. (2019). Gelatin/alginate composite nanofiber membranes for effective and even adsorption of cationic dyes. *Composites Part B: Engineering*, 162, 671-677. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.048>
- Marzban, N., Moheb, A., Filonenko, S., Hosseini, S. H., Nouri, M. J., Libra, J. A., & Farru, G. (2021). Intelligent modeling and experimental study on methylene blue adsorption by sodium alginate-kaolin beads. *International Journal of Biological Macromolecules*, 186, 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.006>
- Mensah, K., Mahmoud, H., Fujii, M., Samy, M., & Shokry, H. (2022). Dye removal using novel adsorbents synthesized from plastic waste and eggshell: mechanism, isotherms, kinetics, thermodynamics, regeneration, and water matrices. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03304-4>
- Mokhtar, A., Abdelkrim, S., Djelad, A., Sardi, A., Boukoussa, B., Sassi, M., & Bengueddach, A. (2020). Adsorption behavior of cationic and anionic dyes on magadiite-chitosan composite beads. *Carbohydrate Polymers*, 229, 115399. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115399>
- Mostafa, A. A., El-Sayed, M. M., Emam, A. N., Abd-Rabou, A. A., Dawood, R. M., & Oudadesse, H. (2021). Bioactive glass doped with noble metal nanoparticles for bone regeneration: in vitro kinetics and proliferative impact on human bone cell line. *RSC Advances*, 11(41), 25628-25638. <https://doi.org/10.1039/d1ra03876a>
- Nidheesh, P., Zhou, M., & Oturan, M. A. (2018). An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 197, 210-227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.195>
- Oladipo, A. A., Gazi, M., & Saber-Samandari, S. (2014). Adsorption of anthraquinone dye onto eco-friendly semi-IPN biocomposite hydrogel: equilibrium isotherms, kinetic studies and optimization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(2), 653-664. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.07.013>
- Sabbagh, N., Tahvildari, K., & Sharif, A. A. M. (2021). Application of chitosan-alginate bio composite for adsorption of malathion from wastewater: Characterization and response surface methodology. *Journal of Contaminant Hydrology*, 242, 103868. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103868>
- Suba, V., & Rathika, G. (2016). Novel adsorbents for the removal of dyes and metals from aqueous solution—a review. *Journal of Advanced Physics*, 5(4), 277-294. <https://doi.org/10.1166/jap.2016.1269>

- Tan, C. H. C., Sabar, S., & Hussin, M. H. (2018). Development of immobilized microcrystalline cellulose as an effective adsorbent for methylene blue dye removal. *South African journal of chemical engineering*, 26, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.08.001>
- Tkaczyk, A., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2020). Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of the Total Environment*, 717, 137222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>
- Türe, H. (2019). Development of copper-doped bioglass/alginate composite membranes: Preliminary results on their characterization and antimicrobial properties. *Materials Today Communications*, 21, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100583>
- Wang, B., Wan, Y., Zheng, Y., Lee, X., Liu, T., Yu, Z., Gao, B. (2019). Alginate-based composites for environmental applications: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(4), 318-356. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1547621>
- Zheng, K., Dai, X., Lu, M., Hüser, N., Taccardi, N., & Boccaccini, A. R. (2017). Synthesis of copper-containing bioactive glass nanoparticles using a modified Stöber method for biomedical applications. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 150, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.11.016>
- Zheng, K., Wu, J., Li, W., Dippold, D., Wan, Y., & Boccaccini, A. R. (2018). Incorporation of Cu-containing bioactive glass nanoparticles in gelatin-coated scaffolds enhances bioactivity and osteogenic activity. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 4(5), 1546-1557. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.8b00051>
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: a review. *Environmental Pollution*, 252, 352-365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>

## Beyaz hindibadan (*Cichorium intybus* L.) antioksidan maddelerin ultrasonik destekli ekstraksiyon parametrelerinin kemometrik optimizasyonu

*Chemometric Optimization of Ultrasonic Assisted Extraction Parameters of Antioxidants from White Chicory (Cichorium intybus L.)*

Açelya AKLAN<sup>1</sup> , Önder AYBASTIER\*<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Bursa, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 20.01.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 03.05.2023

### Öz

Beyaz hindiba yapraklarından fenolik bileşiklerin ultrasonik destekli ekstraksiyonu için deneysel koşulları optimize etmek amacıyla beş seviyeli beş faktörlü yanıt yüzey yöntemi kullanılmıştır. Yanıt verileri olarak toplam fenolik madde ve antioksidan kapasite seçilerek beş bağımsız değişken; süre (dk), HCl derişimi (mol/L), sıcaklık (°C), sıvı/katı oranı (mL/g) ve metanol derişimi (%) kullanılarak 48 deney gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda en yüksek toplam fenolik madde için optimum koşullar, sıcaklık 73 °C, süre 69 dk, metanol derişimi %84, HCl derişimi 0.57 mol/L ve sıvı/katı oranı 33.97 mL/g olarak belirlenmiştir. En yüksek antioksidan kapasite için optimum koşullar sıcaklık 73 °C, süre 69 dk, metanol derişimi %85, HCl derişimi 0.47 mol/L ve sıvı/katı oranı 33.99 mL/g olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullarda gerçekleştirilen ekstraksiyon sonucunda elde edilen beyaz hindiba ekstraktının toplam fenolik madde içeriği 33.5±0.5 mg GAE/g kuru bitki ve antioksidan kapasite 7.2±0.1 mg TE/g kuru bitki olarak bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Antioksidan kapasite, *Cichorium intybus* L, Fenolik madde, Kemometrik optimizasyon, Yanıt yüzey yöntemi

### Abstract

In order to optimize the experimental conditions for the ultrasonic assisted extraction of phenolic compounds from chicory leaves, a five level five factor central composite design response surface methodology was used. Total phenolic content and antioxidant capacity were selected as the response and 48 experiments were performed using five independent variables; time (min), HCl concentration (mol/L), temperature (°C), liquid/solid ratio (mL/g) and methanol concentration (%). As a result of optimization, optimum conditions, for maximum total phenolic content were determined as temperature 73 °C, time 69 min, methanol 84%, HCl concentration 0.57 mol/L and liquid/solid ratio 33.97 mL/g. The optimum conditions, for maximum antioxidant capacity were temperature 73 °C, time 69 min, methanol 85%, HCl concentration 0.47 mol/L and liquid/solid ratio 33.99 mL/g. The total phenolic content of white chicory extract obtained as a result of extraction under optimum conditions was determined as 33.5±0.5 mg GAE/g dried plant and antioxidant capacity as 7.2±0.1 mg TE/g dried plant.

**Keywords:** Antioxidant capacity, *Cichorium intybus* L., Phenolic substance, Chemometric optimization, Response surface methodology

\*Önder AYBASTIER; aybastier@uludag.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Ülkemizde beyaz hindiba olarak bilinen *Asteraceae* (papatyagiller) familyasına ait *Cichorium intybus* L., Hindistan, Kuzey ve Güney Avrupa ve Türkiye'de yaygın olarak bulunmaktadır. Bu türün kökeni Avrupa-Akdeniz olarak kabul edilmektedir. Hindiba, kökleri için yetiştirildiğinde sıcak ve nemli bir iklim gerektirir; fakat tohum için yetiştirildiğinde, kuru ılıman iklime sahip bölgelerde (orta Asya, kuzey Afrika, doğu ABD, Avustralya) daha iyi yetiştirilmektedir. (Bais & Ravishankar, 2001; Wang & Cui, 2011; Al-Snafi, 2016). Yaygın dağılımı nedeniyle bitkinin pek çok kısmı dünya çapında geleneksel ilaçlarda kullanılmıştır. Türk halk hekimliğinde de kökleri ve yaprakları çeşitli amaçlar için kullanılmıştır (Sezik vd., 1991).

Beyaz hindiba (*C. intybus* L.), yaklaşık 80-90 cm yüksekliğe, 20-100 cm uzunluğunda geniş yapraklara, genellikle parlak mavi, nadiren beyaz veya pembe çiçeklere ve yaklaşık 75 cm uzunluğa, etli kazık köklere sahip, oldukça odunsu ve çok yıllık bir bitkidir. Temmuz'dan Eylül'e kadar çiçek açmaktadır. Öğle vakti çiçekler kapanır ve sabah saatlerinde tekrar açılır. Bu bitkinin pek çok bölgesi olduğu gibi kök kısmı da şifalı olarak kullanılır ve inülin, şeker gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Kök kısmı uçucu yağ ve glikozitler içermektedir. Başta C vitamini olmak üzere vitamin bakımından da oldukça zengin bir bitkidir (Kaya vd., 2004; Khaghani, 2012; Dalar & Konczak 2014; Tunçtürk vd., 2018).

Beyaz hindiba'nın tedavi amaçlı kullanımı insanlık tarihiyle başlamıştır. Uzun kullanım geleneğine rağmen, bitki Avrupa Farmakopesi'nde veya bir Avrupa Birliği Üye Devletinin herhangi bir resmi farmakopesinde tanımlanmamıştır. (Cadalen vd., 2010; Al-Snafi, 2016). Beyaz hindiba bitkisinde tespit edilen çeşitli besinsel açıdan önemli bileşikler, zengin ve çok yönlü besin bileşimini göstermiştir. Karbonhidratlar, fenolik bileşikler, flavonoidler, yağ ve amino asitler, laktonlar, vitaminler, mineraller, antosiyaninler, inülin, alkaloidler, kumarinler, seskiterpenler, doymamış steroller, klorofil pigmentleri, saponinler, sinnamik ve kinik asit türevleri gibi bir dizi önemli bileşik içermektedir ve bu içeriklerinden dolayı büyük bir kullanım alanı zenginliğine sahiptir (Molan vd., 2003; Muthusamy vd., 2008).

Tıbbi amaçlar için en yaygın kullanım şekli bitkinin taze ve kurutulmuş formudur (Janda vd., 2021). Yapraklar iyi bir potasyum, kalsiyum ve fosfor kaynağı iken, A ve C vitaminleri açısından da oldukça zengindir (Mulabagal vd., 2009; Koner vd., 2011). Hindiba ekstraktları enerji içeceği üretimi için kullanılırken, hindiba köklerinden etanol ve fruktoz şurubu üretiminde faydalanılmaktadır (Bais & Ravishankar, 2001). Bitkinin kavrulmuş kökleri kahve yerine kullanılmıştır. Köklerden fırında yakılarak elde edilen kül, tereyağı ile karıştırılarak yara iyileşmesi için ve cilt bozuklukları tedavisinde de merhem olarak kullanılmıştır (Sezik vd., 1991). Halk hekimliğinde bu bitki ishal tedavisinde, karaciğer rahatsızlıklarının tedavisinde, akciğer hastalığı ve öksürük tedavisinde, ateş ve kusma tedavisinde, tip 2 diyabet tedavisinde kullanılmıştır (Bais & Ravishankar, 2001; Ahmed vd., 2003; Muthusamy vd., 2008; Street vd., 2013). Ayrıca fenolik asitlere atfedilen diüretik etkisi de vardır. Unani ve Ayurvedik tıp sistemlerinde beyaz hindiba tohumları etkili bir şekilde kullanılmıştır (Rahimullah vd., 2018). Ek olarak, hindiba hepatoprotektif, antiinflamatuvar, antioksidan, sedatif, immünolojik, kardiyovasküler, hipolipidemik, antidiyabetik, antikanser, gastro-koruyucu, antimikrobiyal gibi birçok biyolojik aktivite de gösterir (Bahmani vd., 2015; Al-Snafi, 2016). Hindibadan izole edilen laktosin ve laktokosiprin gibi seskiterpenlerin, antibakteriyel ve antimalaryal aktiviteleri bulunmaktadır. Antifungal ve böcek öldürücü etkilerinin de olduğu pek çok kaynaktaki ifade edilmektedir (Nandagopal & Kumari, 2007).

Fenolik bileşikler pek çok meyve, sebze ve bitkisel ürünler de doğal olarak bulunan ve bu ürünlerin renk, tat, koku gibi çeşitli spesifik özelliklerini oluşturan fitokimyasallardır. Doğal antioksidan kaynaklarını genel olarak bitki fenolik maddeleri oluşturmaktadır. Aynı zamanda fenolik bileşikler, bitkilerin savunma mekanizmasında rol oynayarak virüsler ve parazitler gibi çeşitli zararlılara karşı etki gösterirler (Atoui vd., 2005; Huang vd., 2005; Skerget vd., 2005; Mathew & Abraham, 2006; Bohn, 2014). Son yıllarda, fenolik bileşikler için ekstraksiyon süresini kısaltmak, verimi artırmak ve daha az çözücü kullanmak amacıyla yeni ve yeşil ekstraksiyon tekniklerinin geliştirilmesine ilgi artmıştır (Chemat vd., 2019; Chen vd., 2018). Bu amaçla ultrasonik destekli ekstraksiyon, mikrodalga destekli ekstraksiyon, süperkritik akışkan ekstraksiyonu ve hızlandırılmış çözücü ekstraksiyonu gibi teknikler kullanılmaktadır. Bu ekstraksiyon tekniklerinin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Mikrodalga destekli ekstraksiyonun, yüksek maliyetli olması ve çözücülerin mikrodalga absorplama yeteneklerine göre seçilmesi; süperkritik akışkan ekstraksiyonunun, yüksek maliyetli ve matriks yapısına bağlı olması; hızlandırılmış çözücü ekstraksiyonunda da maliyetin yüksek olması ve ekstraksiyonun matrise bağımlı olması gibi dezavantajları vardır (Büyüktuncel, 2012). Bunların yanında

ultrasonik destekli ekstraksiyon, maliyetinin düşük olması, az zaman alması ve yüksek ekstraksiyon verimi gibi özelliklerinden dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir. Ultrasonik destekli ekstraksiyonda örneğe 20 kHz üstündeki frekanslarla akustik titreşimler uygulanır. Bu titreşimler sıvının içinden geçtiğinde kavitasyon (boşluk oluşumu) meydana gelir. Ultrasonik enerjinin neden olduğu kavitasyon olarak bilinen bu etki sıvı ortamda çok sayıda ufak kabarcıklar üretir ve katıların mekanik olarak sarsılmasına neden olarak partiküllerin kopmasını, hücre duvarlarının parçalanmasını ve hücre zarında gerçekleşen kütle transferini sağlar (Pan vd., 2011).

Son yıllarda, daha az reaktif kullanımı ve daha az laboratuvar çalışması ile yürütülmesi gereken çalışmalarda deney sayısında azalma ve parametreler arası ilişkinin de göz önünde bulundurulması gibi avantajları sebebiyle analitik yöntemlerin optimizasyonu için kemometrik yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır (Ferreira vd., 2007). Kemometrik deneysel dizaynın amacı, deney sayısını düşürmek, maliyeti azaltmak ve zamandan tasarruf sağlamaktır. Deney sayısı ve çalışılan faktörlerin seviyeleri, kemometrik dizayna göre oluşturulan matrise bağlıdır (Ferreira vd., 2018). Merkezi kompozit dizayn (CCD), beş seviye içeren iki veya daha fazla parametrenin optimizasyonu için kullanılan bir yanıt yüzey yöntemidir. (Bezzera, 2008; Ferreira vd., 2018). CCD yöntemi, istatistiksel analiz yoluyla, sonuçlara dayanarak farklı faktörler arasındaki etkileşimi analiz edebilir. Böylece yapılan işlemde rol oynayan faktörler daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir (Youcai & Tao, 2021).

Bu çalışmada, beyaz hindiba yapraklarından antioksidan bileşiklerin ultrasonik destekli ekstraksiyonu için; süre (dk), HCl (mol/L), sıcaklık (°C), sıvı/katı (mL/g) ve metanolden (%) oluşan beş parametre incelenmiştir. Bu parametrelerin etkisini incelemek için 5 seviye-5 faktörlü bir merkezi kompozit dizayn oluşturularak 48 deney gerçekleştirilmiştir. Design Expert 7.0.0 programı yardımıyla hesaplamalar yapılarak optimum koşullar belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

#### 2.1. Materyal

##### 2.1. Material

Ticari olarak satılan beyaz hindiba (*C. intybus* L.) bitkisinin kurutulmuş yaprakları satın alınmıştır. Kurutulmuş yapraklar ekstraksiyon öncesi +4 °C'de muhafaza edilmiştir. ABTS (2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin-6-sülfonik asit), bakır (II) sülfat pentahidrat, Folin-Ciocalteu reaktifi, sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum-potasyum tartarat tetrahidrat Sigma-Aldrich (St. Louis, MO. ABD)'ten, etanol, hidroklorik asit, metanol, potasyum persülfat Merck (Darmstadt, Almanya)'ten satın alınmıştır. Tüm deneysel işlemlerde analitik saflıkta kimyasallar ve ultra saf su kullanılmıştır.

#### 2.2. Ultrasonik destekli ekstraksiyon

##### 2.2. Ultrasonic assisted extraction

Beyaz hindibanın kurutulmuş yaprakları 25 mL'lik cam viallere alınarak üzerine toplam hacim 20 mL olacak şekilde su, metanol ve hidroklorik asit ilave edilmiştir. Ultrasonik destekli ekstraksiyon sıcaklık kontrollü ultrasonik banyo kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ekstrakt süzgeç kâğıdı ile süzülerek analize hazır hale getirilmiştir. Süzülen ekstraktlar analizi yapılabilmek için +4 °C'de muhafaza edilmiştir.

#### 2.3. Deneysel dizayn

##### 2.3. Experimental Design

Merkezi kompozit dizaynda gerçekleştirilecek deney sayısı,  $N = 2^k + 2k + 1$  formülü ile belirlenir. Burada k parametre sayısıdır (Ait-Amir vd., 2015). Merkezi kompozit dizayn yanıt yüzey yöntemi deney tasarlamaya, modeller oluşturmaya, değişkenlerin veya faktörlerin etkisini değerlendirmeye ve istenen yanıtlara yol açan optimum koşulları aramaya yardımcı olur. Yanıt yüzey yönteminin amaçları, beklenen yanıtı tahmin etmek için yaklaşık bir fonksiyon oluşturmak ve yanıt fonksiyonunun optimizasyonuna yol açan en iyi değişken değerlerinin belirlenmesidir (Pattanaik vd., 2018).

Beyaz hindiba ile gerçekleştirilen ultrasonik destekli ekstraksiyonda sıcaklık, ekstraksiyon süresi, metanol yüzdesi, HCl derişimi ve sıvı/katı oranından oluşan beş parametre incelenmiştir. Bu parametrelerin etkisini incelemek için 5 seviye-5 faktörlü bir merkezi kompozit dizayn oluşturularak 48 deney gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** Merkezi kompozit dizaynda kullanılan gerçek ve kodlanmış değerler

**Table 1.** Actual and coded values used in the central composite design

Faktörler	Seviyeler				
	-2.378	-1	0	+1	+2.378
x <sub>1</sub> Sıcaklık (°C)	26	40	50	60	74
x <sub>2</sub> Süre (dk)	12	40	60	80	108
x <sub>3</sub> Metanol (%)	14.3	35.0	50.0	65.0	85.7
x <sub>4</sub> HCl (mol/L)	0.41	0.75	1.00	1.25	1.59
x <sub>5</sub> Sıvı/katı (mL/g)	8.65	16.00	21.33	26.67	34.02

Bu çalışmada, 3 boyutlu yanıt yüzey grafikleri ve ANOVA sonuçları değerlendirilerek en yüksek toplam fenolik madde ve antioksidan kapasiteyi elde etmek için optimum ekstraksiyon koşulları belirlenmiştir.

## 2.4. Toplam fenolik madde tayini

### 2.4. Total phenolic compound assay

Toplam fenolik madde tayini Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılarak yapılmıştır (Aybastier vd., 2013). Lowry A çözeltisi %0.4 NaOH ve %2 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içerecek şekilde saf su ile hazırlanmıştır. Lowry B çözeltisi %1 NaKC<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub> ve %0.5 CuSO<sub>4</sub> içerecek şekilde saf su ile hazırlanmıştır. 50:1 (h/h) oranında Lowry A ve Lowry B karıştırılarak Lowry C çözeltisi hazırlanmıştır. Analiz tüplerine konulan 0.1 mL beyaz hindiba ekstraktının üzerine 1.9 mL saf su, 2.5 mL Lowry C çözeltisi ve 1/3 oranında seyreltilmiş 0.25 mL Folin-Ciocalteu çözeltisi eklenerek tüpler vorteks karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. 30 dk karanlıkta bekletilen tüplerin 750 nm'de UV-Vis spektrofotometresi yardımıyla absorbansları ölçülmüştür. Kalibrasyon grafiği için standart gallik asit çözeltisi kullanılmıştır. Elde edilen doğru denklemi kullanılarak beyaz hindiba örneklerindeki toplam fenolik madde içeriği mg gallik asit eşdeğeri (GAE)/g kuru bitki olarak hesaplanmıştır.

## 2.5. Antioksidan kapasite tayini

### 2.5. Antioxidant capacity assay

Antioksidan kapasite tayini ABTS yöntemi kullanılarak yapılmıştır (Aybastier vd., 2013). ABTS stok çözeltisi 7.0 mmol/L ABTS reaktifi ve 24.5 mmol/L K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> içerecek şekilde saf su ile hazırlanmıştır. Bir gün karanlıkta bekletildikten sonra saf su ile 10 kat seyreltilerek kullanılmıştır. Her örnek için 200 µL örnek alınıp üzerine 3800 µL etanol ve 1 mL ABTS eklenerek 6 dk sonunda 734 nm de absorbansı UV-Vis spektrofotometresi yardımıyla okunmuştur. Ölçümler sonucunda örneklerin ve standartların % inhibisyon değerleri hesaplanmıştır. Kalibrasyon grafiği için standart troluks çözeltisi kullanılmıştır. Elde edilen doğru denklemi kullanılarak beyaz hindiba örneklerindeki antioksidan kapasite mg troluks eşdeğeri (TE)/g kuru bitki olarak hesaplanmıştır.

## 3. Bulgular ve tartışma

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Ultrasonik destekli ekstraksiyon parametrelerinin optimizasyonu

##### 3.1. Optimization of ultrasonic assisted extraction parameters

Ekstraksiyon parametreleri, merkezi kompozit dizayn yanıt yüzey yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Bu çalışmada 5 tekrar içeren 48 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de yapılan tüm deney koşulları ve mg GAE/g kuru bitki, mg TE/g kuru bitki değerleri verilmiştir.

**Tablo 2.** Merkezi kompozit dizayn tablosu ve yanıt değerleri  
**Table 2.** The table of central composite design and response values

	Sıcaklık (°C)	Zaman (dk)	Metanol (%)	HCl (mol/L)	Sıvı/katı (mL/g)	mg GAE/g kuru bitki	mg TE/g kuru bitki
1	40.0	80	35.0	0.75	16.00	13.41	2.62
2	60.0	80	65.0	1.25	26.67	26.15	5.00
3	50.0	60	50.0	1.00	21.33	20.50	3.74
4	40.0	40	35.0	0.75	16.00	15.66	2.78
5	60.0	80	35.0	1.25	16.00	19.26	3.18
6	50.0	60	50.0	1.00	21.33	24.37	3.71
7	50.0	60	14.3	1.00	21.33	15.82	3.16
8	60.0	80	35.0	0.75	26.67	24.01	4.76
9	50.0	60	50.0	1.00	34.02	24.67	5.27
10	50.0	60	50.0	1.00	21.33	24.80	4.02
11	50.0	12	50.0	1.00	21.33	20.59	3.60
12	60.0	40	65.0	1.25	26.67	28.26	4.88
13	26.2	60	50.0	1.00	21.33	20.72	3.65
14	50.0	60	50.0	1.00	21.33	22.48	3.81
15	40.0	80	65.0	1.25	26.67	20.41	5.33
16	40.0	80	65.0	0.75	26.67	23.04	5.05
17	40.0	40	65.0	0.75	16.00	17.74	3.07
18	40.0	40	65.0	0.75	26.67	21.71	4.95
19	60.0	80	65.0	1.25	16.00	22.53	2.41
20	73.8	60	50.0	1.00	21.33	32.39	4.68
21	60.0	80	65.0	0.75	16.00	21.23	3.46
22	50.0	60	85.7	1.00	21.33	24.87	4.17
23	60.0	40	65.0	0.75	26.67	30.30	4.68
24	60.0	80	65.0	0.75	26.67	26.73	5.03
25	40.0	40	65.0	1.25	26.67	21.83	4.21
26	50.0	60	50.0	1.00	21.33	21.44	3.70
27	40.0	80	35.0	0.75	26.67	19.55	3.89
28	50.0	60	50.0	0.41	21.33	21.97	4.32
29	60.0	40	35.0	0.75	26.67	20.53	4.85
30	40.0	40	35.0	1.25	26.67	17.94	3.36
31	60.0	40	35.0	1.25	26.67	22.92	4.35
32	40.0	40	35.0	0.75	26.67	15.69	3.89
33	40.0	80	65.0	0.75	16.00	21.36	3.27
34	60.0	40	35.0	0.75	16.00	19.50	3.37
35	60.0	80	35.0	1.25	26.67	21.91	4.42
36	40.0	40	35.0	1.25	16.00	18.17	3.00
37	40.0	80	35.0	1.25	26.67	15.12	4.59
38	50.0	60	50.0	1.00	8.65	15.54	1.88
39	60.0	80	35.0	0.75	16.00	19.91	3.19
40	40.0	40	65.0	1.25	16.00	20.69	3.03
41	40.0	80	35.0	1.25	16.00	15.17	2.67
42	40.0	80	65.0	1.25	16.00	18.53	2.69
43	60.0	40	35.0	1.25	16.00	18.80	3.24

**Tablo 2.** Devamı  
**Table 2.** Continuing

	Sıcaklık (°C)	Zaman (dk)	Metanol (%)	HCl (mol/L)	Sıvı/katı (mL/g)	mg GAE/g kuru bitki	mg TE/g kuru bitki
44	50.0	60	50.0	1.00	21.33	25.40	4.07
45	60.0	40	65.0	0.75	16.00	20.61	3.36
46	50.0	60	50.0	1.59	21.33	24.54	3.51
47	50.0	108	50.0	1.00	21.33	18.97	3.98
48	60.0	40	65.0	1.25	16.00	24.39	3.26

En yüksek toplam fenolik madde içeriği (32.39 mg GAE/g kuru bitki) 73.8 °C, 60 dk, %50 metanol, 1 mol/L HCl, 21.33 sıvı/katı oranıyla 20. deney olmuştur. En düşük toplam fenolik madde içeriği (13.41 mg GAE/g kuru bitki) 40 °C, 80 dk, %35 metanol, 0.75 mol/L HCl, 16.00 sıvı/katı oranıyla 1. deney olmuştur. En yüksek antioksidan kapasite değeri (5.33 mg TE/g kuru bitki) 40 °C, 80 dk, %65 metanol, 0.75 mol/L HCl, 26.67 sıvı/katı oranıyla 15. deney olmuştur. En düşük antioksidan kapasite değeri (1.88 mg TE/g kuru bitki) 50 °C, 60 dk, %50 metanol, 1.0 mol/L HCl, 8.65 sıvı/katı oranıyla 38. deney olmuştur. Her faktörün etkileri ve etkileşimleri bir Design Expert programı 7.0.0 kullanılarak hesaplanmıştır. Verilerin çeşitli modellerle hesaplanması ve ardından varyans analizi (ANOVA) ile toplam fenolik madde içeriğinin ve antioksidan kapasitenin en uygun şekilde ikinci dereceden polinom modeliyle tanımlandığı belirlenmiştir. %95 güven düzeyinde F değerleri modelin anlamlı olduğunu göstermiştir.

### 3.2. Toplam fenolik madde içeriğinin yanıt yüzey analizi

#### 3.2. Response surface analysis of total phenolic content

Beyaz hindibanın kurutulmuş yapraklarında antioksidan bileşiklerin ultrasonik destekli ekstraksiyonunda HCl derişimi, metanol yüzdesi, sıcaklık, süre ve sıvı/katı oranı ekstraksiyon parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Her bir katsayının önemi, F değerleri ve *p* değerleri ile belirlenmiştir. Toplam fenolik içeriğinin yanıt yüzey analizi, toplam fenolik madde ile ekstraksiyon parametreleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. F değeri ne kadar büyük ve *p* değeri ne kadar küçükse, karşılık gelen katsayı o kadar anlamlıdır. Bu çalışmada,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_5$ ,  $x_2x_4$ ,  $x_2^2$ ,  $x_3^2$  ve  $x_5^2$  önemli parametrelerdir.  $x_2$ ,  $x_4$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_1x_4$ ,  $x_1x_5$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_2x_5$ ,  $x_3x_4$ ,  $x_3x_5$ ,  $x_4x_5$ ,  $x_1^2$  ve  $x_4^2$  parametrelerinin *p* değerleri 0.05'ten büyük olduğu için toplam fenolik madde içeriği için ultrasonik destekli ekstraksiyon üzerinde daha az etkiye sahiptir. Önemli parametreler ile oluşturulan model denklemi Tablo 3'te verilmiştir. Ekstraksiyon parametreleri ile toplam fenolik madde arasındaki ilişki, yanıt yüzey grafikleri ile araştırılmıştır. Şekil 1'de HCl derişimi ile sürenin ve Şekil 2'de sıvı/katı oranı ile sıcaklığın toplam fenolik madde üzerindeki etkileşimini göstermektedir.

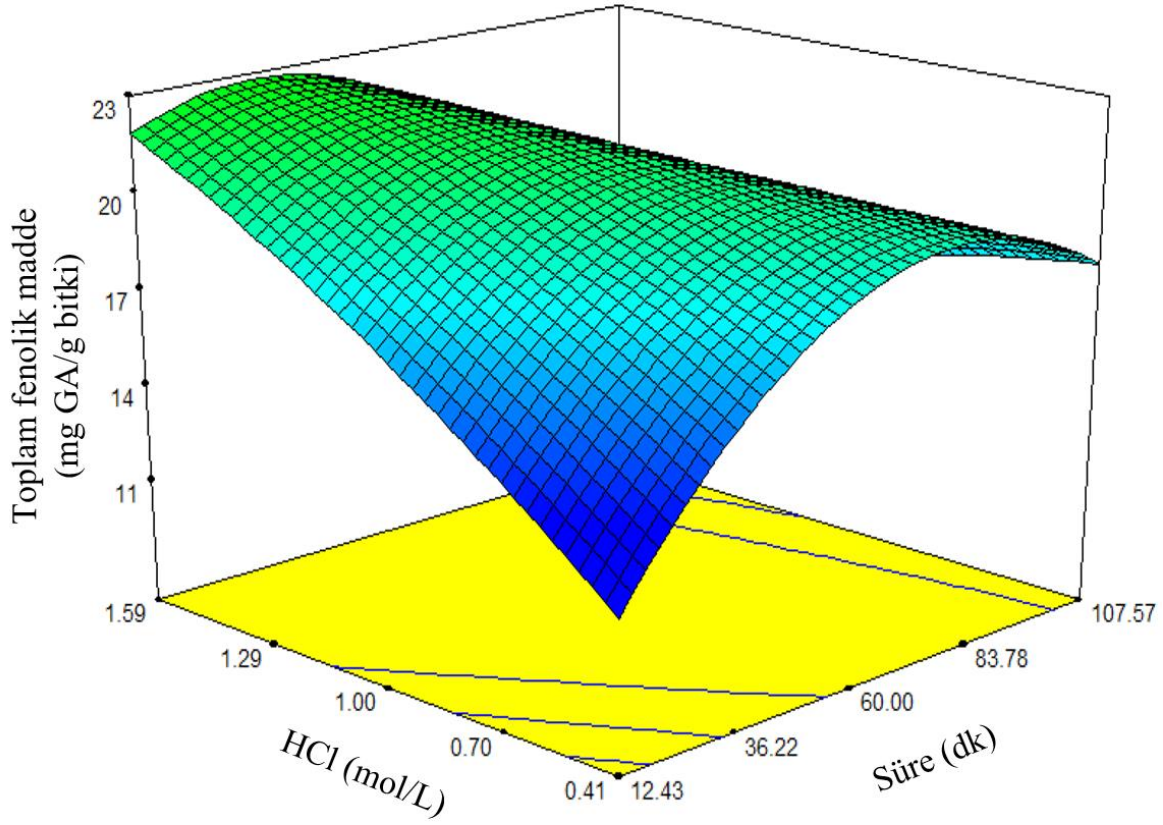
Şekil 1'de ekstraksiyon süresi kısa tutulduğunda ve HCl derişimi artırıldığında toplam fenolik madde içeriğinde artma, HCl'in düşük derişimde tutulduğu ve ekstraksiyon süresi kısa tutulduğu durumda toplam fenolik madde içeriğinde azalma gözlemlenmiştir. Şekil 2'de sıvı/katı oranının ve sıcaklığın artışı ile toplam fenolik madde içeriği artmıştır. En yüksek toplam fenolik madde içeriği, daha yüksek bir ekstraksiyon sıcaklığında gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda, birçok fenolik bileşiğin çözünürlüğü arttığından, fenolik bileşiklerin daha yüksek miktarda ekstrakte edilmesine neden olmuştur.

**Tablo 3.** Toplam fenolik içeriği için önemli parametrelerle oluşturulan model denklemi

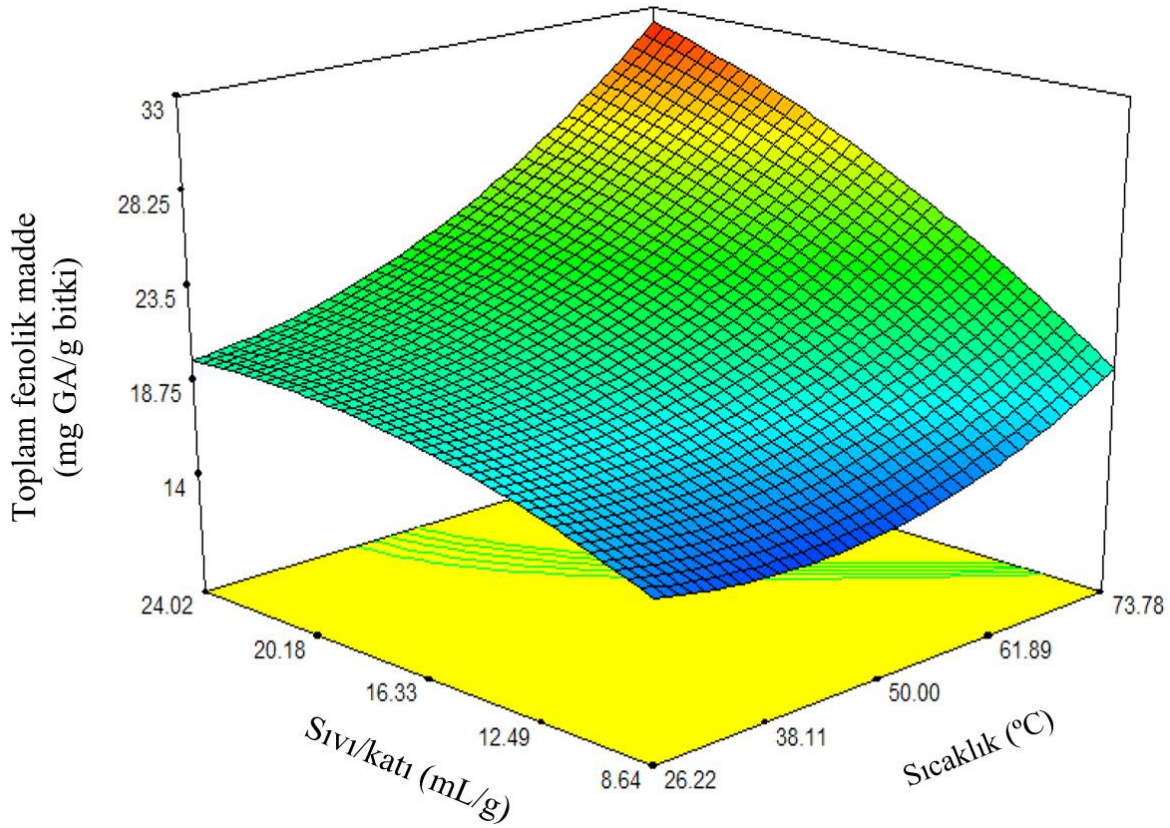
**Table 3.** Model equation with significant parameters for total phenolic content

Toplam fenolik madde	$y = 22.92 + 2.28x_1 - 0.24x_2 + 2.07x_3 + 1.64x_5 - 0.67x_2x_4 - 0.75x_2^2 - 0.65x_3^2 - 0.70x_5^2$
----------------------	--





**Şekil 1.** HCl derişimi ile sürenin toplam fenolik madde üzerine etkisinin yanıt yüzey grafiği  
**Figure 1.** Response surface plot of the effect of HCl concentration and time on total phenolic content



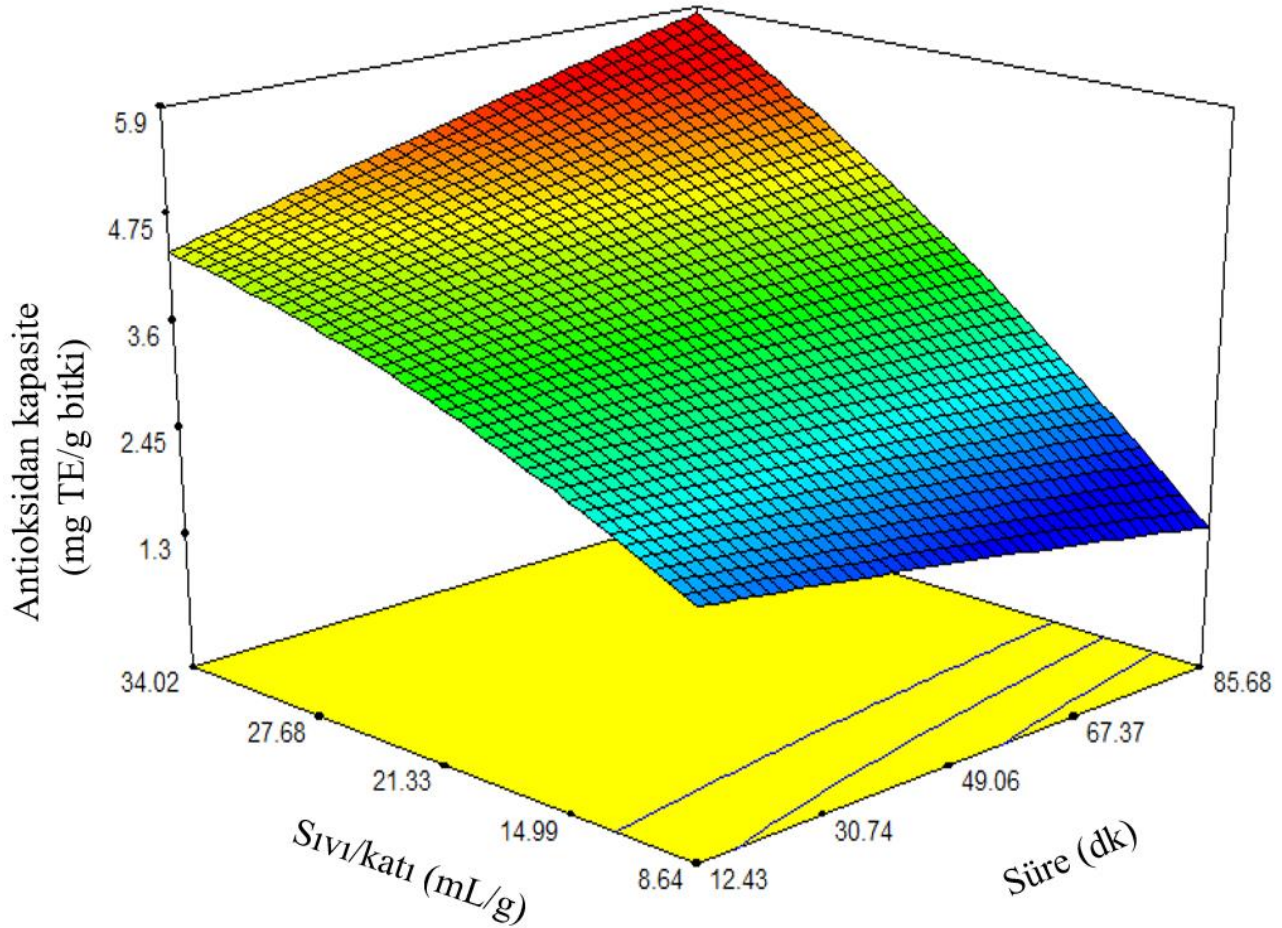
**Şekil 2.** Sıvı/katı oranı ile sıcaklığın toplam fenolik madde üzerine etkisinin yanıt yüzey grafiği  
**Figure 2.** Response surface plot of the effect of liquid/solid ratio and temperature on total phenolic content

### 3.3. Antioksidan kapasitenin yanıt yüzey analizi

#### 3.3. Response surface analysis of antioxidant capacity

Antioksidan kapasite ile HCl derişimi, metanol yüzdesi, sıcaklık, süre ve sıvı/katı oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. Her bir katsayının önemi, F değerleri ve *p* değerleri ile belirlenmiştir. Yanıt yüzey analizi antioksidan kapasite ile ekstraksiyon parametreleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. F değeri ne kadar büyük ve *p* değeri ne kadar küçükse, karşılık gelen katsayı o kadar anlamlıdır. Bu çalışmada,  $x_1$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_1x_5$ ,  $x_3x_5$  önemli parametrelerdir.  $x_2$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_1x_4$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_2x_4$ ,  $x_2x_5$ ,  $x_3x_4$  ise *p* değeri 0.05'ten büyük olduğu için antioksidan kapasite üzerinde daha az etkiye sahiptir. Önemli parametrelerin model denklemi Tablo 4'te verilmiştir. Ekstraksiyon parametreleri ile antioksidan kapasite arasındaki ilişki, yanıt yüzey grafikleri ile araştırılmıştır. Şekil 3'te sıvı/katı oranı ile sürenin ve Şekil 4'te sıvı/katı oranı ile metanol yüzdesinin antioksidan kapasite üzerindeki etkileşimini göstermektedir.

Şekil 3'e göre antioksidan kapasitenin, sıvı/katı oranı ve süre arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4'te en yüksek antioksidan kapasite, daha yüksek bir sıvı/katı oranında ve yüksek metanol yüzdesinde gözlemlenmiştir. Metanol, antioksidan bileşiklerin çoğunu sudan daha iyi çözdüğünden, çalışmamızdaki ekstraksiyonlarda metanol derişiminin artmasıyla antioksidan kapasitede artış gözlenmiştir.



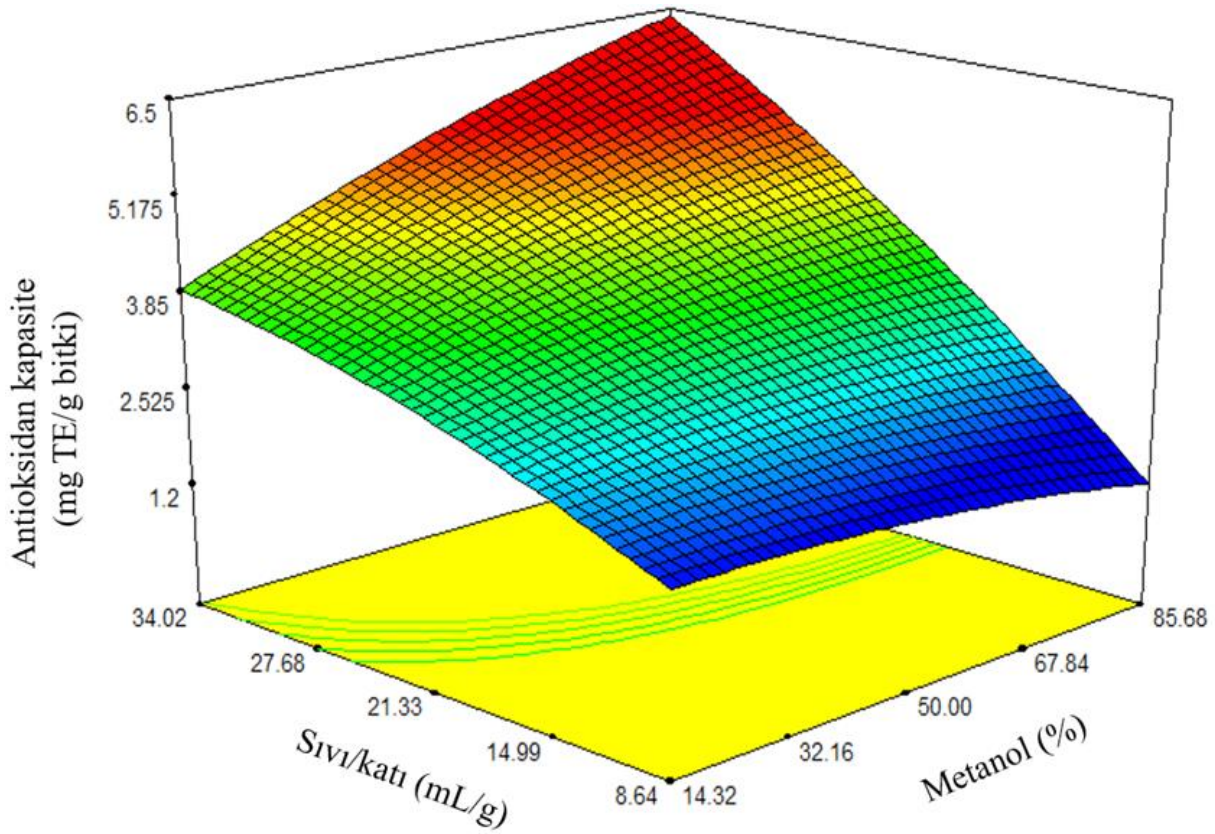
Şekil 3. Sıvı/katı oranı ile sürenin antioksidan kapasite üzerine etkisinin yanıt yüzey grafiği

Figure 3. Response surface plot of the effect of liquid/solid ratio and time on antioxidant capacity

Tablo 4. Antioksidan kapasite için önemli parametrelerle oluşturulan model denklemi

Table 4. Model equation with significant parameters for antioxidant capacity

Antioksidan kapasite	$y = 3.84 + 0.17x_1 + 0.18x_3 - 0.10x_4 + 0.76x_5 - 0.13x_1x_3 + 0.011x_1x_5 + 0.14x_3x_5$
----------------------	--



**Şekil 4.** Sıvı/katı oranı ile metanol yüzdesinin antioksidan kapasite üzerine etkisinin yanıt yüzey grafiği  
**Figure 4.** Response surface plot of the effect of liquid/solid ratio and methanol percentage on antioxidant capacity

### 3.4. Ultrasonik destekli ekstraksiyon parametrelerinin optimizasyonunun doğrulanması

#### 3.4. Verification of the optimization of ultrasonic assisted extraction parameters

Beyaz hindiba yapraklarından en yüksek toplam fenolik madde ve antioksidan kapasite için gerekli ultrasonik destekli ekstraksiyon koşulları Tablo 5’te verilmiştir. Her bir faktörün etkisi ve birbirleriyle etkileşimi Design Expert (7.0.0) programı kullanılarak hesaplanmıştır. Verilerin çeşitli modellerle birleştirilmesi ve ardından yapılan varyans analizi (ANOVA), toplam fenolik madde içeriğinin ve antioksidan kapasitenin en uygun şekilde ikinci dereceden polinom modeli ile tanımlandığını göstermiştir. İkinci dereceden polinom modeli, yanıtlar ile önemli parametreler arasındaki ilişkiyi (Folin–Ciocalteu ve ABTS için  $p < 0.0001$ ) temsil etmek için en uygun model olarak belirlenmiştir.

**Tablo 5.** Optimum koşullar, tahmini ve deneysel optimum değerler

**Table 5.** Optimum conditions, estimated and experimental optimum values

	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Metanol (%)	HCl (mol/L)	Sıvı/katı (mL/g)	Optimum değerler	
						Tahmini	Deneysel
<b>Toplam fenolik madde</b> (mg GAE/g kuru bitki)	73	69	84	0.57	33.97	39.0	33.5±0.5
<b>Antioksidan kapasite</b> (mg TE/g kuru bitki)	73	69	85	0.47	33.99	7.2	7.2±0.1

Belirlenen optimum koşullarda yapılan ekstraksiyon sonucu beyaz hindibanın toplam fenolik madde miktarı  $33.5 \pm 0.5$  mg GAE/g kuru bitki ve antioksidan kapasitesi  $7.2 \pm 0.1$  mg TE/g kuru bitki olarak belirlenmiştir. Tablo 6’da daha önce çalışılmış ekstraksiyon uygulamaları gösterilmiştir. Çalışmamızda elde ettiğimiz toplam

fenolik madde değerleri literatürdeki bu çalışmalar ile karşılaştırıldığında daha yüksek bulunmuştur. Bunun sebeplerinden biri kullandığımız ultrasonik destekli ekstraksiyon yöntemi ve çözücü seçimidir. Ultrasonik ekstraksiyon geleneksel ekstraksiyon yöntemlerine göre daha yüksek ekstraksiyon verimi sağlamaktadır. Bir diğer sebep ise literatürde yapılan çalışmaların hiçbirinde ekstraksiyon koşullarının kemometrik olarak optimize edilmemiş olmasıdır. Kemometrik yöntemle optimizasyon yapıldığında, incelenen tüm parametrelerin hem kendi etkileri hem ikinci dereceden etkileri hem de çapraz etkileşimleri göz önünde bulundurulmaktadır. Bu da ekstraksiyon koşulların en uygun şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca literatürde çalışılanlar ile bizim çalıştığımız bitkinin yetiştiği ortamdaki toprak, sıcaklık, su, ışık gibi çevresel faktörlerin de aynı olması mümkün değildir. Bu faktörlerin de bitkinin fenolik profili üzerine önemli etkileri vardır.

**Tablo 6.** Beyaz hindibanın ekstraksiyon uygulamaları  
**Table 6.** Extraction applications of white chicory

Ekstraksiyon tekniği	Kullanılan çözücü	Süre	Toplam fenolik madde	Kaynak
Geleneksel ekstraksiyon	Etanol ile 1.5 N HCl çözeltisinin 85:15 oranında hazırlanması	1 gece	33.15±0.15 mg GAE/g kuru bitki	Şahan vd., 2017
Ultrasonik ekstraksiyon	Formik asit ile metanolün 5:95 oranında hazırlanması	30 dakika	0.58 - 4.03 mg GAE/g kuru bitki	Sinkovič vd., 2015
Geleneksel ekstraksiyon	%95 Etanol	3 saat	4.3 - 7.9 mg GAE/g kuru bitki	Denev vd., 2014
Geleneksel ekstraksiyon	Etanol	40 dakika	22.6±1.0 - 22.4±0.3 mg GAE/g kuru bitki	Spina vd., 2008

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Merkezi kompozit dizayn yanıt yüzey yöntemi kurutulmuş beyaz hindiba yapraklarından fenolik bileşiklerin ekstraksiyonunu optimize etmek için başarıyla kullanılmıştır. Fenolik bileşiklerin toplam fenolik içerik ve antioksidan kapasitelerine göre en yüksek ekstraksiyon verimi için HCl (mol/L), metanol (%), süre (dk), sıcaklık (°C) ve sıvı/katı oranı (mL/g) için optimum koşullar belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda en yüksek toplam fenolik içerik için optimum koşullar; sıcaklık 73 °C, süre 69 dk, metanol yüzdesi %84, HCl derişimi 0.57 M ve sıvı/katı oranı 33.97 mL/g olarak belirlenmiştir. En yüksek antioksidan kapasite için optimum koşullar sıcaklık 73 °C, süre 69 dk, metanol yüzdesi %85, HCl derişimi 0.47 mol/L ve sıvı/katı oranı 33.99 mL/g olarak belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullar için hesaplanan tahmini değerlerin elde edilen deneysel değerlere yakın olması modelin doğruluğunu göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile beyaz hindiba yapraklarının iyi bir antioksidan kaynağı olarak kabul edilebileceği belirlenmiştir. Beyaz hindiba bitkisinin, tüketicilere fenolik ve antioksidan içeriklerinden dolayı önemli sağlık faydaları sağlayacak potansiyele sahip olduğu ortaya koyulmuştur.

#### Yazar katkısı

##### Author contribution

AA: Literatür taraması, deneysel işlemler ve makale yazımı, ÖA: Çalışmanın planlanması, hesaplamalar, makalenin organizasyonu, makalenin kontrolü.

**Etik beyanı***Declaration of ethical code*

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

**Çıkar çatışması beyanı***Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**Kaynaklar***References*

- Ahmed, B., Al Howirin, A.T. & Siddiqui, AB. (2003). Antihepatotoxic activity of seeds of *Cichorium intybus*. *Journal of Ethnopharmacology*, 87(2-3), 237-240. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00145-4](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00145-4)
- Al-Snafi, A.E. (2016). Medical importance of *Cichorium intybus* – A review. *Journal of Pharmacy*, 6(3), 41-56.
- Ait-Amir, B., Pougnet, P., & Hami, A.E. (2015). Meta-model development. *Embedded Mechatronic Systems*, 2, 157-187.
- Atoui, A.K., Mansouri, A., Boskou, G. & Kefalas, P. (2005). Tea and herbal infusions: Their antioxidant activity and phenolic profile. *Food Chemistry*, 89, (1), 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.075>
- Aybastier, Ö., Şahin, S. & Demir, C. (2013). Response surface optimized ultrasonic-assisted extraction of quercetin and isolation of phenolic compounds from *hypericum perforatum* l. by column chromatography. *Separation Science and Technology*, 48, (11), 1665-1674. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.760603>
- Bahmani, M., Rafieian-kopaei, M. & Saki, K. (2015). Chicory: A review on ethnobotanical effects of *Cichorium intybus* L. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 8(4), 672-682.
- Bais, H.P. & Ravishankar, G.A. (2001). *Cichorium intybus* L- Cultivation, processing, utility, value addition and biotechnology, with an emphasis on current status and future prospects. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81, (5), 467-484. <https://doi.org/10.1002/jsfa.817>
- Bezzera, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, P., Villar, L.S. & Escalera L.A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965–977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
- Bohn, T. (2014). Dietary factors affecting polyphenol bioavailability. *Nutrition Reviews*, 72, (7), 429-452. <https://doi.org/10.1111/nure.12114>
- Büyüktuncel, E. (2012). Gelişmiş ekstraksiyon teknikleri I. *Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy*, 2, 209-242.
- Cadalen, T., Mörchen, M. & Blassiau, C. (2010). Development of SSR markers and construction of a consensus genetic map for chicory (*Cichorium intybus* L.). *Mol Breeding*, 25, 699–722. <https://doi.org/10.1007/s11032-009-9369-5>
- Chemat, F., Abert Vian, M., Ravi, H.K., Khadhraoui, B., Hilali, S., Perino, S. & Fabiano Tixier, A.S. (2019). Review of alternative solvents for green extraction of food and natural products: Panorama, principles, applications, and prospects. *Molecules*, 24(16), 3007. <https://doi.org/10.3390/molecules24163007>
- Chen, C., Wang, L., Wang, R., Luo, X., Li, Y., Li, J., Li, Y. & Chen, Z. (2018). Ultrasound-assisted extraction from defatted oat (*Avena sativa* L.) bran to simultaneously enhance phenolic compounds and  $\beta$ -glucan contents: compositional and kinetic studies. *Journal of Food Engineering*, 222, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.002>
- Dalar, A. & Konczak, I. (2014). *Cichorium intybus* from Eastern Anatolia: Phenolic composition antioxidant and enzyme inhibitory activities. *Industrial Crops and Products*, 60, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.043>

- Denev, P., Petkova, N., Ivanov, I., Sirakov, B., Vrancheva, R., & Pavlov, A. (2014). Determination of biologically active substances in taproot of common chicory (*Cichorium intybus* L.). *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*, 18, 124-129.
- Ferreira, S.L.C., Bruns, R.E., Ferreira, H.S., Matos, G.D., Brandao, G.C, David, J.M., da Silva, E.G.P., Portugal, L.A., dos Reis, P.S., Souza, A.S. & dos Santos, W.N.L. (2007). Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597, (2), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>
- Ferreira, S.L.C., Lemos, V.A., de Carvalho, V.S., da Silva, E.G.P., Queiroz, A.F.S., Felix, C.S.A., da Silva, D.L.F., Dourado, G.B. & Oliveira, R.V. (2018). Multivariate optimization techniques in analytical chemistry—an overview. *Microchemical Journal*, 140, 176–182. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.04.002>
- Gundogdu, M., Tunçtürk, M., Berk, S., Şekeroğlu, N. & Gezici, S. (2018). Antioxidant capacity and bioactive contents of mulberry species from Eastern Anatolia Region of Turkey. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 52(4), 96-101. <https://doi.org/10.5530/ijper.52.4s.82>
- Huang, D., Ou, B. & Prior, R.L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays, Reviews. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 53, 1841-1856. <https://doi.org/10.1021/jf030723c>
- Maran, J.P. & Priya, B. (2015). Ultrasound-assisted extraction of pectin from sisal waste. *Carbohydrate Polymers*, 115, 732-738. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.07.058>
- Kaya, İ., İncekara, N. & Nemli Y. (2004). Ege Bölgesi'nde sebze olarak tüketilen yabancı kuşkonmaz, sirken, yabancı hindiba, rezene, gelincik, çoban değneği ve ebegümecinin bazı kimyasal analizleri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 14(1), 1-6.
- Khaghani, S., Shakouri, M. J., Mafakheri, S. & Aslanpour, M., (2012). Effect of different chemical fertilizers on chicory (*Cichorium intybus* L.). *Indian Journal of Science and Technology*, 5(1), 1-3. <https://dx.doi.org/10.17485/ijst/2012/v5i1.15>
- Koner, A., Ghosh, S. & Roy, P. (2011). Isolation of antimicrobial compounds from chicory (*Cichorium intybus* L.) root. *International Journal of Research in Pure and Applied Microbiology*, 1(2), 13-18.
- Mathew, S. & Abraham, T.E. (2006). Studies on the antioxidant activities of cinnamon (*Cinnamomum verum*) bark extracts, through various in vitro models. *Food Chemistry*, 94, 520-528. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.11.043>
- Molan, A.L., Duncan, A.J., Barry, T.N. & McNabb, W.C. (2003). Effects of condensed tannins and crude sesquiterpene lactones extracted from chicory on the motility of larvae of deer lungworm and gastrointestinal nematodes. *Parasitology International*, 52(3), 209-218. [https://doi.org/10.1016/s1383-5769\(03\)00011-4](https://doi.org/10.1016/s1383-5769(03)00011-4)
- Mulabagal, V., Wang, H., Ngouajio, M. & Nair, M.G. (2009). Characterization and quantification of health beneficial anthocyanins in leaf chicory (*Cichorium intybus*) varieties. *European Food Research and Technology*, 230, 47-53. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1144-7>
- Muthusamy, V.S., Anand, S., Sangeetha, K.N., Sujatha, S., Arun, B. & Lakshmi, B.S., (2008). Tannins present in *Cichorium intybus* enhance glucose uptake and inhibit adipogenesis in 3T3-L1 adipocytes through PTP1B inhibition. *Chemistry Biol Interact*, 174, (1), 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2008.04.016>
- Nandagopal, S. & Ranjitha Kumari, B.D. (2007). Phytochemical and antibacterial studies of chicory (*Cichorium intybus* L.)- a multipurpose medicinal plant. *Advances in Biological Research*, 1, (1-2), 17-21.
- Pan, Z., Qu W., Ma H., Atungulu G.G. & McHugh T.H. (2011). Continuous and pulsed ultrasound assisted extractions of antioxidants from pomegranate peel. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(2), 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.01.005>
- Pattanaik, A. & Rayasam, V. (2018). Analysis of reverse cationic iron ore fines flotation Using RSM-D-optimal design – an approach towards sustainability. *Advanced Powder Technology*, 29(12), 3404-3414. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.09.021>
- Rahimullah T.G., Shah S.T., Rehman M., & Hayat A., (2019). Phytochemical and antibacterial screening of *Cichorium intybus* seeds use in traditional medicine systems in Pakistan. *International Journal of Basic Medical Sciences and Pharmacy*, 8, (2), 46–49. <https://doi.org/10.3390/2Fmolecules25184160>

- Sahan, Y., Gurbuz, O., Guldas, M., Degirmencioglu, N., & Begenirbas, A. (2017). Phenolics, antioxidant capacity and bioaccessibility of chicory varieties (*Cichorium* spp.) grown in Turkey. *Food Chemistry*, 217, 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.108>
- Sezik, E., Tabata, M., Yeşilada, E., Honda, G., Goto, K. & Ikeshiro, Y. (1991). Traditional medicine in Turkey I. *Folk medicine in Northeast Anatolia Journal of Ethnopharmacology*, 35(2), 191-196. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(91\)90072-1](https://doi.org/10.1016/0378-8741(91)90072-1)
- Sinkovič, L., Demšar, L., Žnidarčič, D., Vidrih, R., Hribar, J., & Treutter, D. (2015). Phenolic profiles in leaves of chicory cultivars (*Cichorium intybus* L.) as influenced by organic and mineral fertilizers. *Food Chemistry*, 166, 507-513. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.024>
- Skergat, M., Kotnik, P., Hadolin, M., Hras, A.R., Simonic, M. & Knez, Z. (2005). Phenols, proanthocyanidins, flavones, and flavonol in some plant materials and their antioxidant activities. *Food Chemistry*, 89, (1), 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.02.025>
- Street, R.A., Sidana, J. & Prinsloo, G. (2013). *Cichorium intybus*: traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and toxicology. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 579319. <https://doi.org/10.1155/2013/579319>
- Youcai, Z. & Tao, Z. (2020). Pretreatment and aged refuse dosage on biohydrogen production from food waste. *Biohydrogen Production and Hybrid Process Development Energy and Resource Recovery from Food Waste*, 182, 149-238. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-821728-3.00003-7>
- Zhang, Q., Zhou, M.M., Chen, P. L., Cao, Y.Y. & Tan, X.L. (2011). Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis for the extraction of luteolin and apigenin from celery. *Journal of Food Science*, 76(5), 680-685. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02174.x>

## Gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü tasarımı ve uygulaması

### *Design and implementation of voltage and current controlled buck converter*

Tolga ÖZER\*<sup>1</sup> , Atakan KABOĞLU<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 03000, Afyonkarahisar

• Geliş tarihi / Received: 07.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 12.05.2023

#### Öz

Bu çalışmada gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü devresinin tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Alçaltıcı tip dönüştürücü devresinin giriş ve çıkış gerilimleri sırasıyla 20-24V ve 5V olarak tasarlanmıştır. Devrenin tasarımı çıkış akımı 10 Amper'e dayanabilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı uygulamada mikrodenetleyici olarak PIC16F877, anahtarlama elemanı olarak ise IRFZ44N tip MOSFET kullanılmıştır. Geliştirilen devrenin anahtarlama frekans değeri 10kHz olarak belirlenmiştir. Devre tasarımında MOSFET sürücü entegresi olarak IR2101 kullanılmıştır. Tasarım aşamasında belirlenen değerlere göre komponentler seçilmiş olup devrenin ilk etapta simülasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında geliştirilen model ile tasarlanan DA düşürücü çeviricinin simülasyon ve deneysel verileri karşılaştırılmış ve sonuçların birbirini desteklediği gözlenmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı devre uygulamasında 0.5Ω ile 4.8Ω değerleri arasında yedi farklı durum için yük testleri gerçekleştirilmiştir. Hem simülasyon hem de deneysel olarak PWM sinyalleri, yük akımı ve yük gerilimi değerleri gözlenmiştir. Gerçek zamanlı devre uygulamasında sistemin verim değerleri %70-%77 aralığında elde edilmiştir. Böylelikle geliştirilen gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü devresinin başarılı bir şekilde simülasyonu ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Akım denetimi, Düşüren Dönüştürücü, Gerilim denetimi, PIC16F877 Mikrodenetleyici, PWM

#### Abstract

*In this study, the voltage and current-controlled buck converter circuit design and implementation was carried out. The input and output voltages of the buck converter circuit were designed as 20-24V and 5V, respectively. The design of the circuit was carried out so that the output current could be withstand 10 Amperes. PIC16F877 is used as a microcontroller, and IRFZ44N type MOSFET is used as a switching element in simulation and real-time application. The switching frequency value of the developed circuit is determined as 10kHz. IR2101 is used as the MOSFET driver IC in the circuit design. Components were selected according to the determined values during the design phase. The simulation and experimental data of the designed DC step-down converter were compared. It was observed that the results supported each other. It has been ensured that the systems work in harmony with each other. The load tests were performed for seven situations between 0.5Ω and 4.8Ω values in the simulation and real-time circuit application. PWM signals, load current, and load voltage values were observed both in simulation and experimentally. The efficiency values of the system were obtained in the range of 70%-77% in the real-time circuit application. Thus, a successful simulation and application of the developed voltage and current controlled buck converter circuit was realized.*

**Keywords:** Current controlled, Buck Converter, Voltage controlled, PIC16F877 Microcontroller, PWM

\*Tolga ÖZER; [tolgaozer@aku.edu.tr](mailto:tolgaozer@aku.edu.tr)



## 1. Giriş

### 1. Introduction

Enerji, insanoğlunun vazgeçilmezleri arasında yer almaktadır. Geçmişten günümüze uluslar enerji için birbirleri ile rekabet içerisinde bulunmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisine hemen hemen her alanda ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrik enerjisi insanoğlunun yaşantısında çok büyük bir öneme sahip olup, kullandıkları çoğu eşyada yer almaktadır. Artmakta olan insan nüfusu ve elektriğe olan talep nedeni ile elektrik üretim kapasiteleri arttırılmaktadır. Üretilen elektrik, enerji iletim hatları vasıtasıyla konutlarımıza kadar ulaştırılmaktadır (Cebeci & Yaşa, 2016). Konutlara ulaştırılan elektrik 220V gerilim genliğinde alternatif akım (AA) formundadır. Ancak kullanılan elektronik eşyaların besleme gerilimleri alternatif veya doğru gerilim olmak üzere değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle elektrik sinyalinin formunun ya da genliğinin farklı değer aralıklarına dönüştürülmesi gerekebilmektedir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için ise güç kaynakları kullanılmaktadır (Liu vd., 2020). Güç kaynakları yapısal olarak ikiye ayrılır. Bunlar doğrusal (lineer) güç kaynakları ve anahtarlamalı mod güç kaynaklarıdır. Doğrusal güç kaynaklarında şebekeden alınan AA gerilimin genliği transformatör yardımı ile değiştirilebilmektedir. AA gerilimi, diyotlar ile kurulu köprü tipi tam dalga doğrultma devresi ile doğru akım (DA) gerilimine dönüştürülmektedir. DA gerilimine, filtre ve regüle devreleri uygulanarak çıkışta istenilen seviyede regüleli DA gerilim elde edilebilmektedir (Evrans, 2019). Bu tip devrelerde transformatörün bulunması, kayıp güçlerin ısı olarak harcanması nedeni ile soğutuculara ihtiyaç duyulmasından dolayı doğrusal güç kaynakları daha büyük ve daha ağır olmaktadır (Köse vd., 2017). Aynı zamanda kayıp güçlerin fazla olmasından dolayı verimleri düşüktür. Yükün ihtiyaç duyduğu gerilim, anahtarlamalı güç kaynakları tarafından da sağlanabilmektedir. Anahtarlamalı güç kaynakları yüksek frekanslarda çalışırlar ve DA'dan DA'a gerilim genliğinde dönüşümü gerçekleştirirler. Bu devre mantığında yüksek frekanslarda çalışabilen anahtarlama elemanları (MOSFET, transistör) kullanılır. Bu tip devrelerde kayıp güç az olduğundan verimleri yüksektir (Çalışkan vd., 2017). Bunun yanında hacimsel olarak küçük ve ağırlıkları düşük seviyelerdedir. Düşürücü tip devre topolojisi anahtarlamalı güç kaynakları sınıfından biri olup uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. DA'dan DA'a alçaltıcı tip dönüştürücü devre topolojisinde giriş gerilimi, anahtarlama elemanın iletimde ve kesimde tutulma süresi değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Giriş geriliminin seviyesi düşürülerek çıkışa aktarılmaktadır. Devrenin çıkışındaki gerilim seviyesi anahtarlama elemanın iletimde ve kesimde olma süresi ile ilişkilidir. Anahtarlama elemanı kontrol devresi ile sürülmektedir ve böylelikle çıkışta istenilen gerilim seviyesi elde edilir (Kim vd., 2014). Babaoğlu ve Salihmuhsin, (2016) yapmış oldukları çalışmada DA-DA düşürücü dönüştürücü devre tasarımında kontrol devresi için oransal (Proportional - P) kontroller kullanılarak gerçek zamanlı düşürücü dönüştürücü tasarımı yapılmaktadır. Bu çalışmada; giriş gerilimi 20-30V aralığında farklı yük değerleri ile yüklenmesi durumuna karşı çıkış gerilimi sabit 15V olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımın kontrol devresinde PIC18 serisi bir mikrodenetleyici kullanılmıştır (Babaoğlu & Salihmuhsin, 2016). Mamur (2012) yapmış olduğu bu çalışmada kararlı ve yük değişimlerinden etkilenmeyen bir çıkış gerilimi üreten DA-DA düşürücü dönüştürücü devre tasarımını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada paralel çalışabilmesi ve programlama üstünlüğünden dolayı kontrol devresinde Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array - FPGA) kullanılmıştır. Bu çalışmada anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmış olup FPGA üzerinden ADC okuma yapılarak akım ve gerilim kontrolü yapılmaktadır (Mamur, 2012). Ürgün vd. (2008) yapmış oldukları çalışmada temel DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının teorik olarak analizini ve simülasyon ortamında tasarımını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada maliyeti düşürmek adına düşürücü dönüştürücünün kontrol devresinde DsPIC mikrodenetleyici kullanılmıştır (Ürgün vd., 2008). Özer ve Kelebekler (2021) yapmış oldukları çalışmada TS-EN 61000-3-2 standartlarının gerekliliğini dikkate alarak DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağı tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada DA-DA düşürücü dönüştürücünün şebekede oluşturdukları harmoniklerin TS-EN 61000-3-2 standartlarına uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır (Özer & Kelebekler, 2021). Özdemir (2018) yapmış olduğu çalışmada sürekli iletim modunda çalışan bir DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağı tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada sürekli akım modunda çalıştırılan DA-DA düşürücü dönüştürücüler için ayırık zamanda üç ayrı tip kontrolör tasarımı yapılmaktadır (Özdemir, 2018). Birkan (2021) yapmış olduğu bu çalışmada DA-DA düşürücü dönüştürücü devresini matematiksel olarak modellemiş ve benzetim modelini MATLAB/Simulink ortamında oluşturmuştur. Benzetim çalışması sonucunda düşürücü dönüştürücünün çalışma prensibi ve sürekli durumdaki kararlılık analizi açıklanmıştır (Birkan, 2021).

Bu çalışmada giriş gerilimi 20-24V aralığında çıkış gerilim değeri 5V olacak şekilde 50W'lık gerilim ve akım kontrollü bir düşürücü tip dönüştürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Devre yapısını oluşturan bileşenler hesaplanmış ve tasarım öncelikle simülasyon programı ile test edilmiştir. Tasarım simülasyon programında gerçekleştirildikten sonra uygulama aşamasına geçilmiştir. Tasarlanan dönüştürücü devresinin simülasyon ve

gerçek zamanlı ortamda farklı yüklerdeki tepkisi incelenerek sistemin başarılı bir şekilde çalıştırılması gerçekleştirilmiştir.

## 2. Materyal ve metot

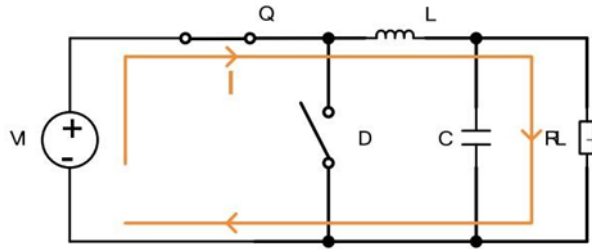
### 2. Material and method

#### 2.1. Düşürücü tip dönüştürücü

##### 2.1. Buck type converter

Anahtarlamalı mod DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynakları diğer adıyla azaltan dönüştürücü, girişine uygulanan DA gerilimini çıkışında daha düşük bir DA gerilimine düşürme işlemini gerçekleştirirler. Temel olarak bir düşürücü dönüştürücü devresinde anahtarlama elemanı (MOSFET, transistör), hızlı diyot, bobin ve kondansatör bulunur. Bu devre topolojisinde anahtarlama elemanı kullanılarak çıkışta, girişten küçük olma koşulu ile istenilen gerilim seviyesi elde edilir. Azaltan dönüştürücülerin topolojisinde kontrol devresi bulunur ve bu devre ile anahtarlama elemanı olan MOSFET anahtarlanır. Anahtarlama elemanın iletimde ve kesimde olmasıyla iki durum söz konusu olmaktadır.

**MOSFET iletimde iken (On State):** Bu durumda giriş akımı MOSFET üzerinden akar ve MOSFET kısa devre olarak düşünülebilir. Diyotun devredeki bağlantı durumundan dolayı diyot açık devre olmaktadır. MOSFET'den akan akım bobin, kondansatör ve yük direnci üzerinden devresini tamamlar ve bu süre boyunca bobin ve kondansatör enerji depolarlar ve yük direnci üzerinde gerilim düşümü olur. Anahtarlama elemanının iletimde olduğu süre  $t_{on}$ , kesimde olduğu süre  $t_{off}$  'tur. Anahtarlama elemanının çalışma periyodu (iletim ve kesimde olduğu süre) ise  $T$  'dir.



**Şekil 1.** MOSFET'in iletimde olduğu durum  
**Figure 1.** The state of the MOSFET in conduction

Görev oranı DA-DA düşürücü dönüştürücülerde anahtarlama elemanının ne kadar süre iletimde ne kadar süre kesimde olacağını belirler. Başka bir ifade ile Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) kontrol sinyalinin doluluk oranını verir. Görev oranı (Duty Cycle - D) eşitliği (1) numaralı denkleme görülmektedir.

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}, t_{on} = DT, t_{off} = (1 - D)T \quad (1)$$

DA-DA düşürücü dönüştürücü devresi analiz edildiğinde;  $0 \leq t \leq DT$  süresinde MOSFET'in iletimde, diyotun kesimde olması durumunda bobin akımındaki değişim (2), (3) ve (4) numaralı denklemlerde sırasıyla ifade edilmiştir.

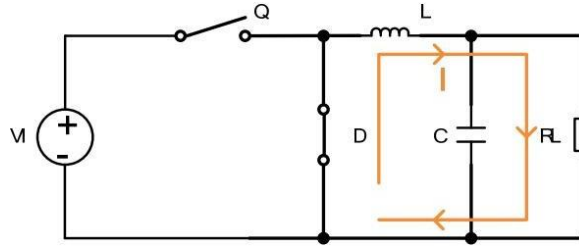
$$V_L = V_{in} - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta DT} = \frac{V_{in} - V_o}{L} \quad (3)$$

$$\Delta i_{L(iletim)} = \left( \frac{V_{in} - V_o}{L} \right) DT \quad (4)$$

**MOSFET Kesimde İken (Off State):** MOSFET kesime alındığında açık devre olur ve üzerinden akım akmaz. Bu durumda diyot iletime geçer ve kısa devre olarak düşünülebilir. Bobin ve kondansatör üzerinde depolanan

enerji bu durumda diyot üzerinden devresini tamamlayarak deşarj olurlar. MOSFET'ler yüksek anahtarlama frekansları ile çalıştırılarak yüksek hızlarda anahtarlama yaparlar. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin çalışma modları Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. MOSFET'in kesimde olduğu durum  
Figure 2. The state of the MOSFET on cut

$DT \leq t \leq T$  süresinde MOSFET'in kesimde, diyotun iletimde olması durumunda bobin akımındaki değişim (5), (6) ve (7) numaralı denklemlerde sırasıyla gösterilmiştir.

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta(1-D)T} = \frac{-V_o}{L} \quad (6)$$

$$\Delta i_{L(kesim)} = \left(\frac{-V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (7)$$

Sürekli çalışma durumunda;

$$\Delta i_{L(iletim)} + \Delta i_{L(kesim)} = 0 \quad (8)$$

olduğundan dolayı (8) numaralı denkleme (4) ve (7) numaralı bağıntıların eklenmesi ile;

$$\left(\frac{V_{in}-V_o}{L}\right)DT + \left(\frac{-V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (9)$$

(9) numaralı denklem elde edilmiştir. Sadeleştirme işleminin yapılması sonucunda;

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (10)$$

Görev oranı (10) numaralı bağıntıda elde edilmiştir. Denklemlerde yer alan sembollerin açıklaması aşağıda yer almaktadır.

$V_{in}$ : giriş gerilimi,  $V_o$ : çıkış gerilimi,  $V_L$ : bobin gerilimi,  $di_L$ : bobin akımındaki değişim,  $dt$ : zamandaki değişimi,  $D$ : görev oranı,  $L$ : endüktans değeri,  $T$ : anahtarlama elemanının periyodu

DA-DA düşürücü dönüştürücü Sürekli Akım Koşulu (Continuous Current Mode - CCM) ve Süreksiz Akım Koşulu (Discontinuous Current Mode - DCM) modları olmak üzere iki farklı modda çalışabilmektedir. Sürekli akım koşulunda endüktans akımı 0A'e düşmemektedir ancak süreksiz akım koşulunda endüktans akımı 0A'e düşmektedir. Sürekli akım koşulu (CCM) denklem (11)'de, süreksiz akım koşulu (DCM) Denklem (12)'de verilmektedir.

$$\frac{\Delta i_L}{2} < I_{o(min)} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta i_L}{2} > I_{o(min)} \quad (12)$$

$I_{o(min)}$ : yük altındaki minimum çıkış akımı,  $\Delta I_L$ : bobin akımındaki tepeden tepeye dalgalanma

Denklem (11) ve (12) incelendiğinde düşürücü dönüştürücünün sürekli akım koşulunda (CCM) çalışması için yük altındaki minimum çıkış akımının, endüktans akımındaki dalgalanmanın yarısından büyük olmalıdır. Bu koşul sağlanırsa düşürücü dönüştürücü sürekli akım koşulunda çalışmaktadır. Bu nedenle devreye bağlanan yükün değeri önem arz etmektedir.

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (13)$$

Düşürücü dönüştürücünün CCM koşulunda çalışması için yük değeri, denklem (14)'te elde edilen  $R_{(kritik)}$  değerinden küçük olmalıdır. ( $R < R_{(kritik)}$ )

$$R_{(kritik)} = \frac{2L}{(1-D)T} \quad (14)$$

## 2.2.Düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının tasarımı

### 2.2.Design of buck converter power supply

Bu çalışmada giriş gerilimi 20-24V aralığında çıkış gerilimi 5V ve yük akımı 10A için DA-DA düşürücü tip dönüştürücü devresinin devre elemanlarının değerleri hesaplanmıştır. DA-DA azaltan dönüştürücü de görev oranı, çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı ile elde edilir. D görev periyodu,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $V_{in}$  giriş gerilimi olarak sembolize edilmiş ve Denklem (15)'de verilmiştir.

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{5}{24} = 0.208 \quad (15)$$

DA-DA azaltan dönüştürücüde giriş gerilimi, anahtarlama elemanın görev oranı süresi ile iletimde olmasıyla çıkış gerilimine düşürülmektedir. Denklem (15) incelendiğinde düşürücü tip dönüştürücüler için  $D$  değerinin 0 ile 1 arasında yer aldığı görülmektedir. DA-DA düşürücü dönüştürücü devresinde bulunan bobin, akımın dalgalanma miktarını belirlemektedir. Bobinin endüktans değeri denklem (16)'da ifade edildiği gibi bulunabilmektedir.  $L$  endüktansı,  $D$  görev döngüsünü,  $f_s$  anahtarlama frekansını,  $V_{in}$  giriş gerilimini,  $V_o$  çıkış gerilimini ve  $\Delta I_o$  çıkış akımındaki dalgalanma oranını sembolize etmektedir.

$$L = \frac{(V_{in}-V_o)*D}{f_s*\Delta I_o} = \frac{(24-5)*0.208}{10000*2} = 198\mu H \quad (16)$$

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde  $\Delta I_o$  değeri %20 - %40 aralığında olduğu görülmektedir (Hauke, 2015). Bu çalışmada  $\Delta I_o$  değeri %20 olacak şekilde belirlenerek ilgili hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda devrede kullanılması gereken minimum endüktans değeri  $198\mu H$ 'dir. Tasarlanan devrede kullanılan bobinin endüktans değeri ise  $220\mu H$ 'dir. DA-DA düşürücü dönüştürücü devresinde bulunan kondansatör gerilimin dalgalanma miktarını belirlemektedir. Kondansatörün kapasite değeri denklem (17)'de verilen eşitlikten faydalanılarak bulunabilmektedir.  $C$  kapasite,  $f_s$  anahtarlama frekansı,  $\Delta I_o$  çıkış akımındaki dalgalanma ve  $\Delta V_o$  çıkış gerilimindeki dalgalanma sembolleri olarak verilmiştir.

$$C = \frac{\Delta I_o}{8*f_s*\Delta V_o} = \frac{2}{8*10000*0.05} = 500\mu F \quad (17)$$

Alçaltıcı tip dönüştürücü devresi uygulamalarında  $\Delta V_o$  değerinin %1 oranında belirlenerek tasarımlar gerçekleştirilebilmektedir (Hauke, 2015). Bu çalışmada da literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak  $\Delta V_o$ , %1 olarak belirlenmiş ve ilgili hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda devrede kullanılması gereken kapasite değeri  $500\mu F$ 'tır. Güç kaynağının yüklenme durumunda çıkış gerilimindeki dalgalanma artacağından dolayı uygulama devresinde kullanılan kapasitenin değeri  $3300\mu F$  olarak belirlenmiştir.

Alçaltıcı tip dönüştürücü devresinin CCM modda çalışabileceği kritik yük değerinin belirlenmesi için  $R_{kritik}$  değerinin hesaplanması gerekmektedir.  $R_{kritik}$  değeri (18) numaralı bağıntı kullanılarak hesaplanabilmektedir;

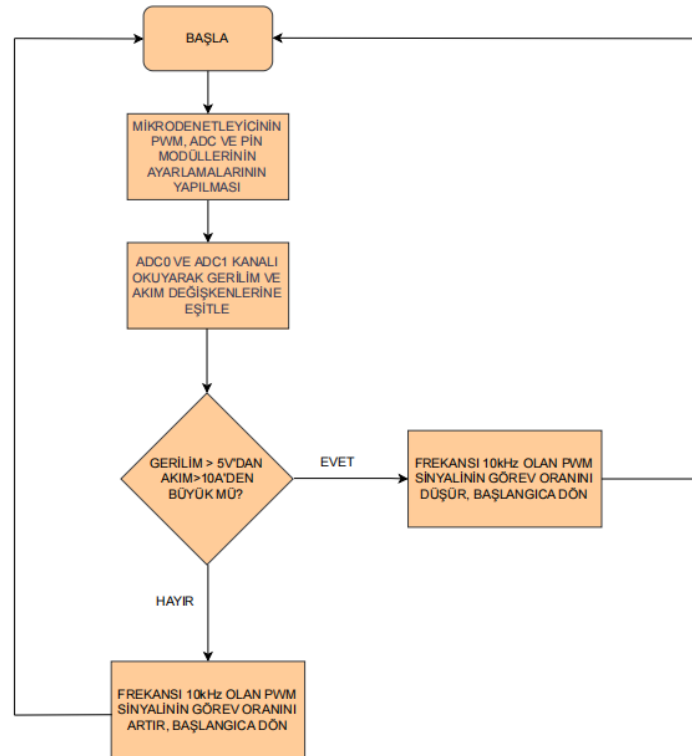
$$R_{(kritik)} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^{-6}}{(1 - 0.208) \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 5.556 \Omega \quad (18)$$

Düşürücü dönüştürücünün CCM koşulunda çalışabilmesi için devrenin çıkışına bağlanacak yük değerinin  $5.556 \Omega$  değerinden küçük olması gerekmektedir. Alçaltıcı devrenin gerçek zamanlı testlerinde devrenin çıkışına  $0.5 \Omega$  ile  $4.8 \Omega$  arasında farklı değerlere sahip yükler bağlanarak testler CCM modda gerçekleştirilmiştir.

### 2.3. Düşürücü tip dönüştürücünün kontrol algoritması

#### 2.3. Control algorithm of the buck converter

Yapılan bu uygulamada gerilim kontrolünü sağlamak için iki adet  $10k\Omega$ 'luk dirençler kullanılarak düşürücü dönüştürücünün çıkışında gerilim bölücü direnç devresi kullanılmıştır. Devrenin çıkış gerilimi  $5V$ 'tur. Çıkışa paralel birbiriyle seri olan iki adet  $10k\Omega$ 'luk dirençlerden birinin üzerine  $2.5V$  gerilim düşümü meydana gelmektedir. Dirençlerin orta noktasından PIC16F877A'nın RA0 analog pinine bağlantı yapılarak çıkış geriliminin değeri belirlenmektedir. PIC16F877A'nın analog pinleri 10 bitlik çözünürlüğe sahiptir. Çıkıştaki analog gerilim değeri  $5V$  olduğunda dijital karşılığı  $1023$ 'e eşit olmaktadır. Gerilim bölücü direnç üzerinde  $2.5V$  gerilim düşümü meydana gelir ve bu gerilimin dijital karşılığı  $512$ 'dir. Gerilim bölücü dirençlerden okunan değerin  $253$  ve  $512$  değerleri arasında kıyaslanması sonucu PWM sinyalinin görev periyodunun ayarlanması gerçekleştirilir. Böylelikle çıkış gerilimi değerinin minimum  $2.5V$  olması sağlanırken sabit  $5V$ 'da kalacak şekilde PWM ayarlanması yapılır. Düşürücü tip dönüştürücü devresinde akım kontrolü yüke seri olarak bağlı  $22m\Omega$ ,  $5W$ 'lık taş bir direnç ile yapılmıştır. Yüke bağlı seri direncin üzerine düşen gerilimin okunması için PIC16F877A'nın RA1 pinine bağlantı gerçekleştirilmiştir. Devrenin tasarımında çıkışından yükü besleyebilecek maksimum akım değeri  $10A$  olarak belirlenmiştir. Yük akımının  $10A$ 'i geçmesi durumunda akım koruması devreye girmektedir. Yüke bağlı seri taş direnç üzerinden maksimum  $10A$  geçmesi durumunda taş direnç üzerinde  $220mV$  gerilim düşümü meydana gelmektedir.  $220mV$  gerilimin dijital karşılığı  $45$ 'e eşit olmaktadır. Akım kontrolü, taş direnç üzerinden okunan değerin  $45$  değeri ile kıyaslanması ile gerçekleştirilir. Okunan değere göre PWM sinyalinin görev periyodu değiştirilir. DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağında ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) değer okuma işlemi yapılarak PWM sinyalinin oluşturulması için yazılan kodun algoritması Şekil 3'te verilmiştir.

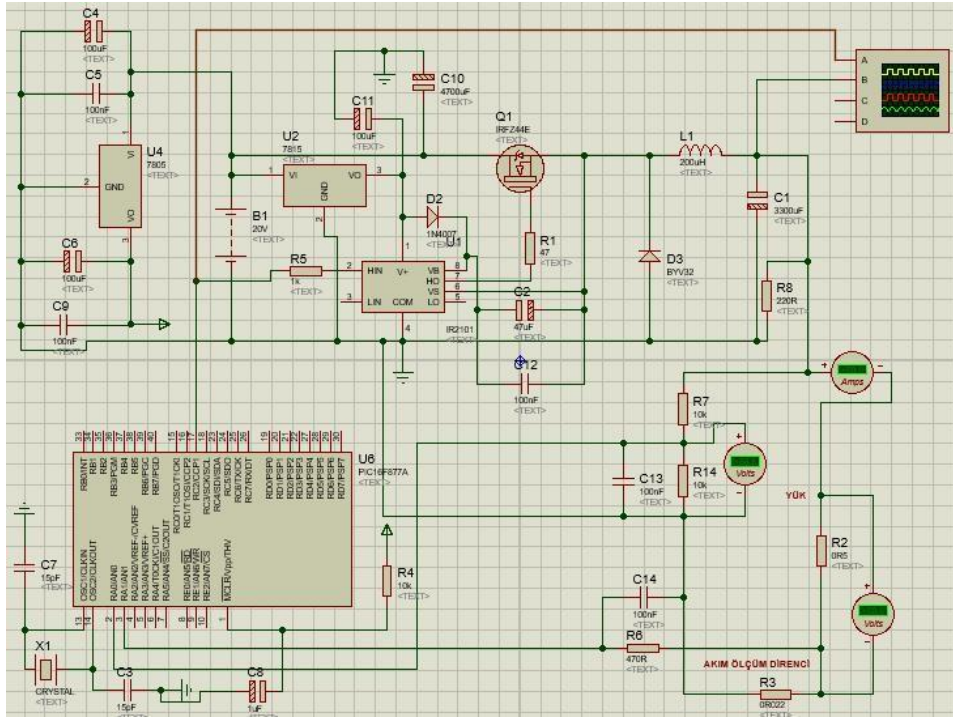


Şekil 3. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin kontrol algoritması  
Figure 3. Control algorithm of the buck converter circuit

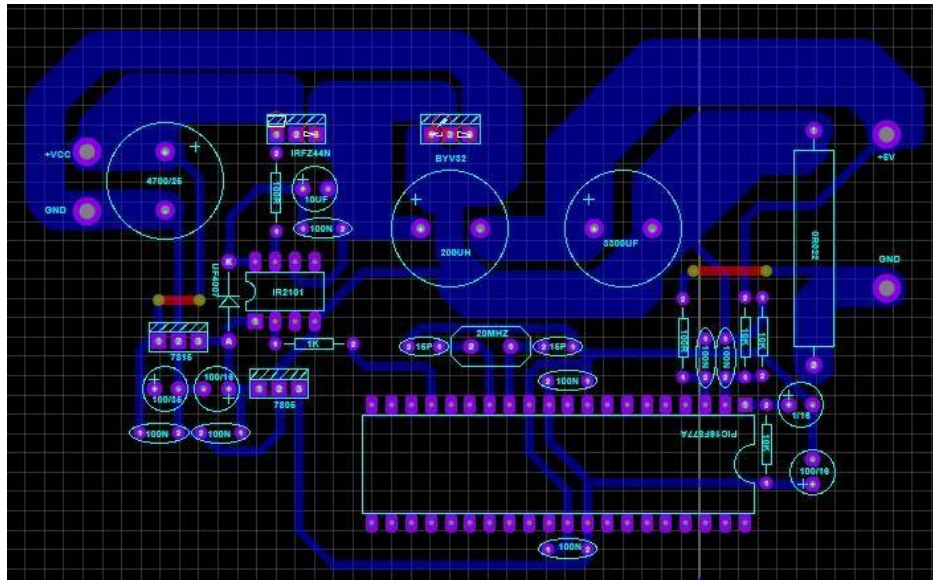
## 2.4. Düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının simülasyonu

### 2.4. Simulation of buck converter power supply

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının devresi Proteus programı üzerinde kurularak devrenin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon uygulamasında mikrodenetleyici olarak PIC16F877 entegresi kullanılmıştır. Yarı iletken anahtarlama elemanı olarak düşük iç direncinin olmasından dolayı IRFZ44N tip MOSFET seçilmiştir. Geliştirilen devrenin anahtarlama frekans değeri 10kHz olarak belirlenmiştir. Devre tasarımında MOSFET sürücü entegresi olarak IR2101 kullanılmıştır. Geliştirilen düşürücü tip dönüştürücü devresinin şeması Şekil 4'te görülmektedir. Tasarlanan sisteme göre devrenin baskı devresi ARES programında gerçekleştirilmiştir. Tasarımda yüksek akımın geçeceği yolların yüzey alanı geniş olacak şekilde tasarlanmıştır. Düşürücü dönüştürücünün baskı devresi Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin Proteus programı simülasyonu  
Figure 4. Proteus program simulation of buck converter circuit

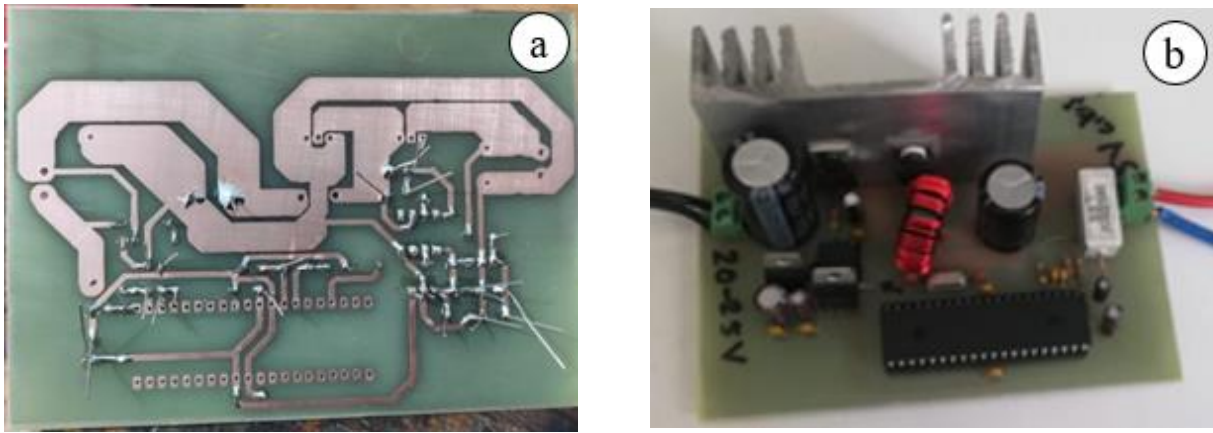


Şekil 5. ARES devre çizimi  
Figure 5. ARES circuit drawing

## 2.5. Düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının uygulaması

### 2.5. Implementation of buck converter power supply

Mikrodenetleyici PIC16F877A ve IR2101 entegresini besleyebilmek için +5V ve +15V gerilim değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Devrenin girişinden uygulanan 20-24 V gerilimden, LM7805 ve LM7815 gerilim entegrelerini kullanılarak sabit +5V, +15V gerilimler elde edilmiştir. PIC 16F877A ve IC2101 entegrelerinin beslemeleri bu gerilimlerle gerçekleştirilmiştir. Düşürücü tip dönüştürücü devresinde hızlı tipteki BYV32 diyotu kullanılmıştır. MOSFET ve hızlı diyotta istenilirse de kayıplar meydana gelecektir ve bu kayıplar ısı olarak etkisini gösterecektir. Bu durumu önlemek adına düşürücü tip dönüştürücü devresinde MOSFET ve hızlı diyot soğutucu panele takılarak devreye yerleştirilmiştir. Dönüştürücü devresinin girişinde anlık kesilmeler meydana gelmesi durumunda devrenin çalışmasını etkilememesi için giriş kondansatörü kullanılmıştır. Baskı devrenin üretilerek komponentlerin lehimlenmesi aşaması ve devrenin tamamlanmış hali Şekil 6'da görülmektedir.



**Şekil 6.** (a) Baskı devrenin üretilerek komponentlerin lehimlenmesi, (b) Devrenin tamamlanmış hali.

**Figure 6.** (a) Production of the printed circuit board and soldering of the components, (b) Completed circuit

## 3. Bulgular

### 3. Results

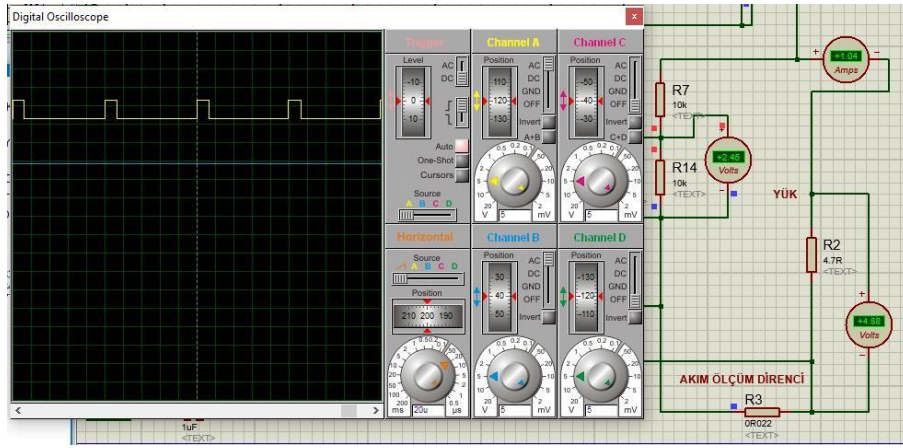
Bu bölümde tasarlanan düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının simülasyon ve gerçek zamanlı testlerden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Gerçek zamanlı teste geliştirilen düşürücü tip güç kaynağına farklı değerlerdeki yükler bağlanarak devrenin çıkışından elde edilen gerilim, akım ve verim sonuçları incelenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

### 3.1. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin Proteus simülasyonunda test edilmesi

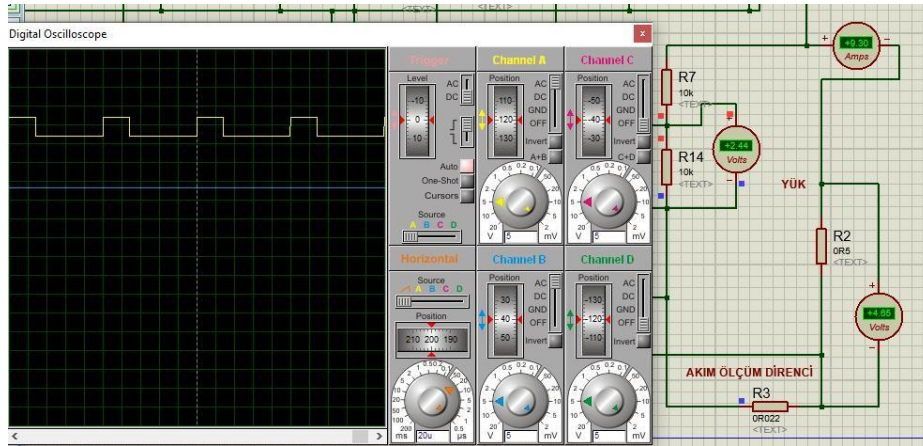
#### 3.1. Testing the buck converter circuit in Proteus simulation

Bu bölümde DA-DA düşürücü tip dönüştürücü güç kaynağının Proteus programındaki simülasyon devresinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Simülasyon devresinde 4,7Ω ile 0,5Ω aralığındaki yedi farklı değişken yükteki PWM sinyali, akım ve gerilim değeri sonuçları incelenmiştir. Simülasyonda yer alan sarı sinyal MOSFET'i sürmek için kullanılan PWM sinyalidir. Mavi sinyal ise çıkış gerilimini vermektedir. Simülasyonda yapılan test sonucunda devreye 4.7Ω yük bağlanması durumunda çıkış gerilimi 4.88V, yük akımı 1.04A olarak Şekil 7'deki gibi ölçülmüştür.

Tasarlanan DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının Proteus simülasyonuna 0.5Ω yük bağlayarak test sonucunda elde edilen ölçümler not edilmiştir. Simülasyonda yer alan sarı sinyal MOSFET'i sürmek için kullanılan PWM sinyalidir. Mavi sinyal ise çıkış gerilimini vermektedir. Simülasyonda yapılan test sonucunda devreye 0.5Ω yük bağlanması durumunda çıkış gerilimi 4.65V, yük akımı 9.3A olarak Şekil 8'deki gibi ölçülmüştür.



Şekil 7. Proteusta  $R_L = 4.7\Omega$  yük testi  
Figure 7.  $R_L = 4.7\Omega$  load test in Proteus



Şekil 8. Proteusta  $R_L = 0.5\Omega$  yük testi  
Figure 8.  $R_L = 0.5\Omega$  load test in Proteus

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağı devresi simülasyon ortamında farklı yükler ile beslenmesi durumunda çıkış gerilimi ve çıkış akımları not edilmiştir. Test sonucunda elde edilen ölçümler Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Simülasyon ortamında farklı yüklerle gerçekleştirilen testlerin sonuçları  
**Table 1.** Results of tests performed with different loads in the simulation environment

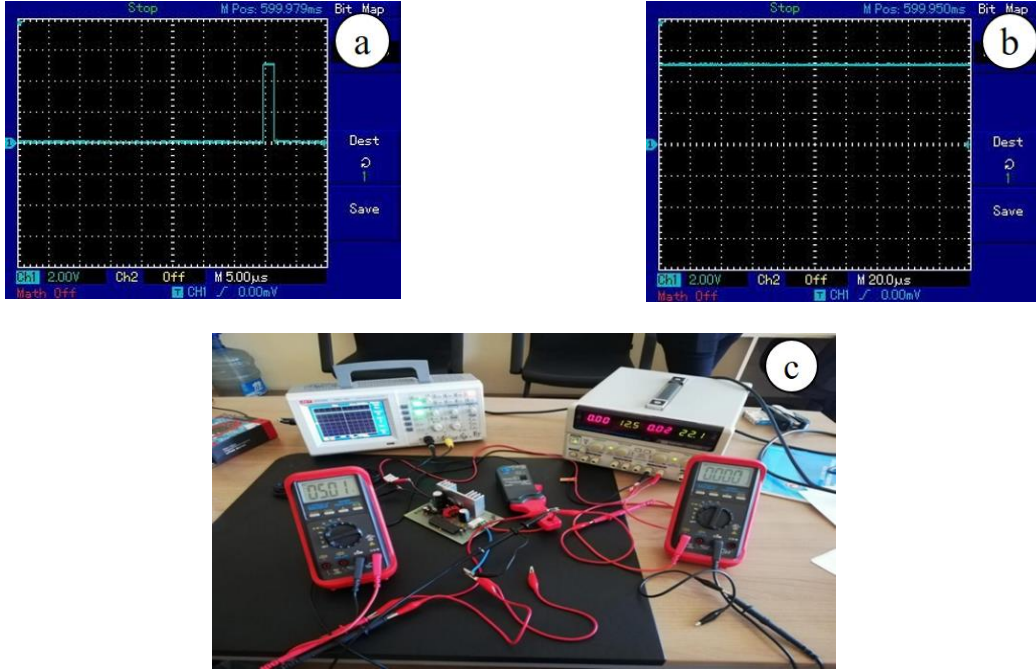
Giriş gerilimi	Çıkış gerilimi	Çıkış akımı	Ryük ( $\Omega$ )	Çıkış gücü
22V	4.88V	1.04A	4.7 $\Omega$	5.07W
22V	4.92V	1.97A	2.5 $\Omega$	9.69W
22V	4.86V	3.24A	1.5 $\Omega$	15.75W
22V	4.95V	4.13A	1.2 $\Omega$	20.44W
22V	4.83V	6.03V	0.8 $\Omega$	29.12W
22V	4.96V	7.08A	0.7 $\Omega$	35.12W
22V	4.65V	9.3A	0.5 $\Omega$	43.24W



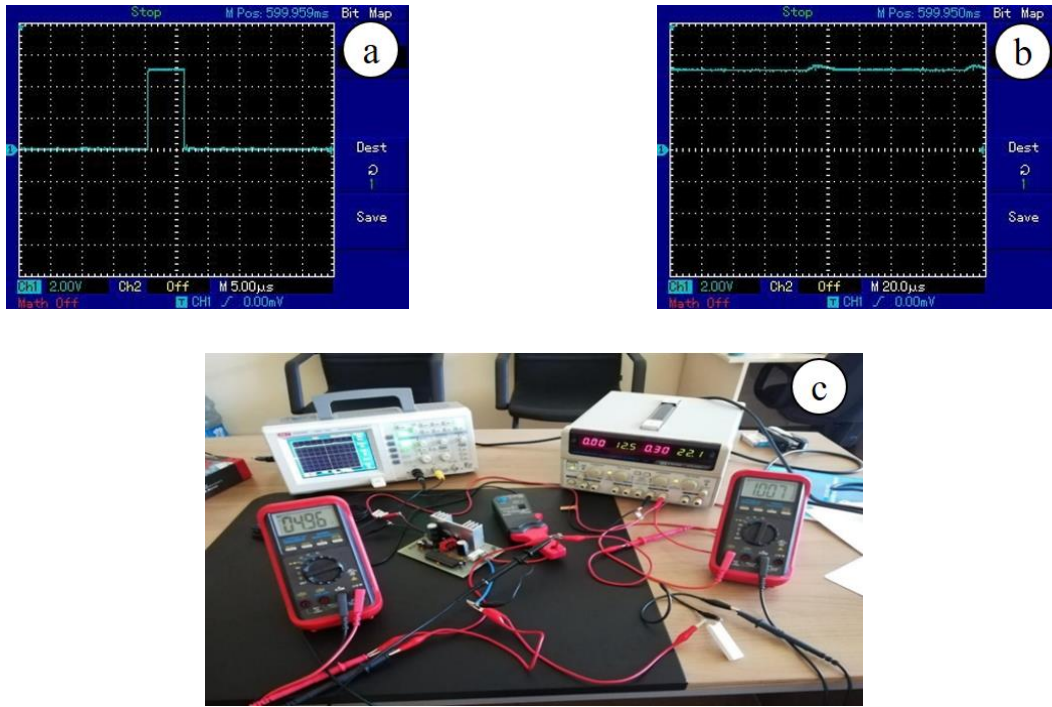
### 3.2. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin gerçek zamanlı olarak test edilmesi

#### 3.2. Real-time testing of buck converter circuit

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının yüksüz şekilde boşa çalışması test edilmiştir. Çıkış gerilimi multimedre ile ölçülmüştür. Osiloskoptan PWM sinyali ile çıkış geriliminin sinyal çıktıları Şekil 9'da verilmiştir. Çıkış geriliminin değerin 5.01V olduğu verilen şekilden görülmektedir.

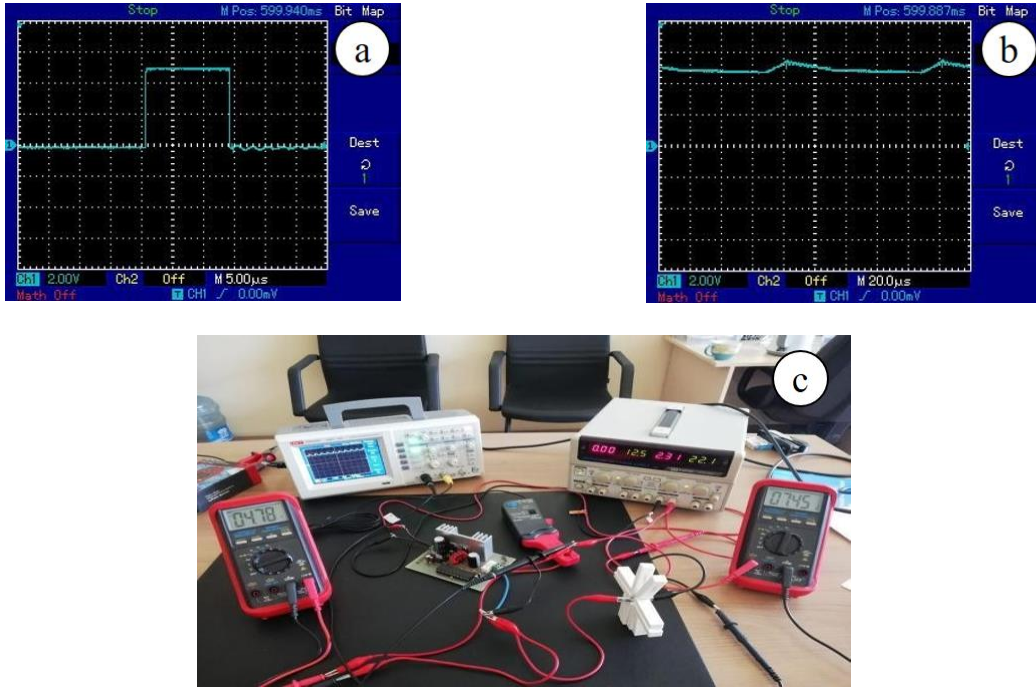


Şekil 9. Yüksüz çalışma testi, (a) PWM sinyali, (b) Çıkış gerilimi, (c) Devrenin bağlantısı  
Figure 9. No-load test, (a) PWM signal, (b) Output voltage, (c) Circuit connection



Şekil 10. 4.8Ω Yük testi, (a) PWM sinyali, (b) Çıkış gerilimi, (c) Devrenin bağlantısı  
Figure 10. 4.8Ω Load test, (a) PWM signal, (b) Output voltage, (c) Circuit connection

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının çıkışına 4.8Ω'lık yük bağlanarak test edilmiştir. Burada çıkış gerilimi ve çıkış akımı multimetre ile ölçülmüştür. Multimetre gerilim ölçümü için devreye paralel, akım ölçümü için ise devreye seri olarak bağlanmıştır. Ölçüm sonucunda PWM ile çıkış gerilimi sinyallerinin osiloskop çıktıları elde edilmiştir.  $V_o$  ve  $I_o$  değerleri sırası ile 4.96V, 1.007A olarak ölçülmüştür. Elde edilen osiloskop görüntüleri ile deneysel düzenek Şekil 10'da verilmiştir.



**Şekil 11.** 0.6Ω Yük testi, (a) PWM sinyali, (b) Çıkış gerilimi, (c) Devrenin bağlantısı  
**Figure 11.** 0.6Ω Load test, (a) PWM signal, (b) Output voltage (c) Circuit connection

DA-DA düşürücü dönüştürücü güç kaynağının çıkışına 0.6Ω'lık yük bağlanarak test edilmiştir. Çıkış gerilimi ve çıkış akımı multimetre ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda PWM ile çıkış gerilimi sinyallerinin osiloskop çıktıları elde edilmiştir.  $V_o$  ve  $I_o$  değerleri sırası ile 4.78V, 7.45A olarak ölçülmüştür. Elde edilen osiloskop görüntüleri ile deneysel düzenek Şekil 11'de verilmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler Tablo 2'de verilmiştir. Bu verilere göre devrenin farklı yüklenme durumlarına göre verimi Denklem (19) kullanılarak hesaplanmıştır.  $\eta$  verim,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $I_o$  çıkış akımı,  $V_{in}$  giriş gerilimi,  $I_{in}$  giriş akımı,  $P_{out}$  çıkış gücü ve  $P_{in}$  giriş gücü olarak sembolize edilmiştir.

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 = \frac{V_o * I_o}{V_{in} * I_{in}} * 100 \quad (19)$$

**Tablo 2.** Gerçek zamanlı yapılan testler sonucunda hazırlanan verim tablosu  
**Table 2.** Efficiency table prepared as a result of real-time tests

Giriş gerilimi (V)	Giriş akımı (A)	Çıkış gerilimi (V)	Çıkış akımı (A)	Verim	Ryük (Ω)
22.1V	0.3A	4.96V	1.007A	%75.33	4.8Ω
22.1V	0.57A	4.96V	1.948A	%76.70	2.4Ω
22.1V	0.83A	4.95V	2.829A	%76.34	1.6Ω
22.1V	1.09A	4.92V	3.659A	%74.73	1.2Ω
22.1V	1.54A	4.85V	5.14A	%73.25	0.8Ω
22.1V	1.99A	4.84V	6.49A	%71.42	0.6Ω
22.1V	2.31A	4.78V	7.45A	%69.76	0.5Ω

#### 4. Tartışma ve sonuçlar

##### 4. Discussion and conclusions

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde alçaltıcı tip dönüştürücü devresi tasarımına yönelik farklı çalışmaların olduğu görülmektedir (Aslan, 2019). Bu çalışmalar simülasyon ortamında, gerçek zamanlı olarak veya yapısında her iki çalışma durumunu barındıracak şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Sevim & Bozkurt, 2021). Literatürde gerçek zamanlı yapılan çalışmaların bulunmasına rağmen çalışmaların ağırlıklı olarak simülasyon tabanlı olarak ortaya koyulduğu olduğu görülmektedir (Yaylacı vd., 2022). Elde edilen bu verilerden hareketle gerçek zamanlı yapılan uygulamaların sayısının diğer çalışmalara oranla daha az olduğu anlaşılmaktadır. Dönüştürücü tabanlı çalışmalarda sağlıklı bir tasarımın gerçekleştirilebilmesi için öncelikle sisteme ait simülasyonun gerçekleştirilmesi ve sonrasında uygulamasının yapılması ideal tasarım aşamaları olarak ifade edilebilir (Özdemir, 2018). Literatürde her iki adımı da yapısında bulunduran çalışmalara daha az rastlanabilmektedir. Yasko (2018) çalışmasında alçaltıcı bir devrenin simülasyonunu Matlab'da yaparak uygulamasını Arduino tabanlı olarak gerçekleştirmiştir. Önerilen çalışmada Proteus programı aracılığı ile simülasyon ortamında dönüştürücü sisteminin tasarımı yapılmıştır. PIC mikrodenetleyici tabanlı gerçek zamanlı uygulaması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylelikle literatürde az sayıda bulunan simülasyon ve gerçek zamanlı devre tasarımını içeren çalışmalara katkıda bulunulmuştur.

Elektronik devrelerin tasarımlarında Proteus, Matlab, PSIM, LtSpice, Multisim vb. gibi simülasyon programları kullanılabilir (Alagöz vd., 2013; Aslan, 2019). Simülasyon aşamasının sorunsuz şekilde gerçekleştirilmesi gerçek zamanlı sistemde problem yaşanması riskini en aza indirmektedir. Dönüştürücü tip devrelerde kontrol sinyallerinin oluşturulabilmesi için genellikle mikrodenetleyiciler tercih edilmektedir. Devrede bulunan mikrodenetleyici tabanlı kontrol birimi ile güç devresinin uyumlu bir şekilde çalışması gerekmektedir. Proteus programı dışındaki programlarda mikrodenetleyici tabanlı kontrol devresi ile güç biriminin birlikte simülasyonu gerçekleştirilememektedir. Proteus ortamında her iki işlemin birlikte gerçekleştirilebilmesi sayesinde yazılım geliştirme süreçleri hızlı bir şekilde ilerletilebilmekte ve gerçek zamanlı tasarımda karşılaşılabilecek sorunlar azaltılmaktadır (Özer vd., 2021). Mevcut çalışmalar incelendiğinde alçaltıcı tip dönüştürücü tasarımının Proteus programı aracılığı ile tasarımının yapılarak uygulamasının gerçekleştirildiği az sayıda çalışmanın olduğu görülmüştür. Çalışmalarında açık çevrim kontrollü alçaltıcı tip bir dönüştürücü devresinin simülasyonunu Proteus programı ortamında gerçekleştirmişlerdir. Giriş gerilimi 18V çıkış gerilimi 12V olarak tasarlanmış olan devrenin gerçek zamanlı uygulamasında PIC mikrodenetleyici kullanmışlardır (Ghani vd., 2019).

Dönüştürücü devrelerinde uygulanan kontrol yöntemlerine göre çalışmalar sınıflandırılmaktadır. Dönüştürücü devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanının tetiklenme durumu üzerinden kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bunun yansıra çıkış gerilimi veya yük akımı değişkenlerine göre farklı kontrol yöntemleri uygulanabilmektedir. Simülasyon tabanlı çalışmalarda Oransal-İntegral (PI) (Alagöz vd., 2013; Cebeci & Yaşa, 2016), Oransal-İntegral-Türev (PID) (Bozkurt, 2022), Doğrusal Karesel Regülatör (LQR) ve Kayan Kipli Kontrolör (KKK) (Özdemir, 2018) gibi kontrol yöntemleri uygulanabilmektedir. Gerçek zamanlı sistemlerde ise uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve pratikliği açısından gerilim ve akım kontrol yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir (De Araujo vd., 2020). Önerilen çalışmada giriş gerilimi 24V çıkış gerilimi 5V olacak şekilde bir alçaltıcı tip dönüştürücü tasarım gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilen çalışmada PIC16F877A mikrodenetleyici tabanlı kapalı çevrim kontrollü gerilim ve akım kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Böylelikle düşük maliyetli ve kabul edilebilir verim oranlarında çalışabilen bir düşürücü tip dönüştürücü sistemi gerçekleştirilerek literatüre katkıda bulunulmuştur.

Yapılan bu çalışmada gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip bir dönüştürücü güç kaynağı tasarlanarak başarılı bir şekilde uygulaması gerçekleştirilmiştir. Devreyi oluşturan komponentler tasarım aşamasında matematiksel olarak hesaplanıp sınır değerleri belirlenmiştir. Gerilim ve akım kontrolünü sağlayacak olan düşürücü tip dönüştürücü devresinin geliştirilen yazılıma göre uyumlu çalışması sağlanmıştır. Simülasyon aşaması başarılı şekilde tamamlandıktan sonra devrenin gerçek zamanlı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan devrenin çıkışına farklı değerlerdeki omik yükler bağlanarak devre üzerinde gerçek zamanlı test işlemleri yapılmıştır. Devreden uygulanan PWM sinyalleri, çıkış yükünün gerilim ve akım bilgileri multimetre ile elde edilmiştir. Ayrıca devrenin çıkışındaki gerilim dalgalanmaları osiloskop ile ölçülmüştür. Simülasyon ve gerçek zamanlı devre uygulamasında  $0.5\Omega$  ile  $4.8\Omega$  değerleri arasında yedi farklı durum için yük testleri gerçekleştirilmiştir. Yük akımının artması ile çıkış gerilimindeki dalgalanmanın arttığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen alçaltıcı tip devrede yük akımının artması sonucu çıkış geriliminin azaldığı tespit edilmiştir. Devreye uygulanan PWM

sinyalleri ile akım ve gerilim değerleri incelenmiştir. Gerçek zamanlı devre uygulamasında sisteme ait verim değerleri %70-%77 aralığında elde edilmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu yapılan testler sonucunda ortaya koyulmuştur.

### **Yazar katkısı**

*Author contribution*

Atakan KABOĞLU: Deneysel çalışma, verilerin toplanması, makalenin hazırlanması

Tolga ÖZER: Deneysel çalışma, kaynak araştırması, makalenin hazırlanması, derleme

### **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*

- Alagöz, B. B., Keleş, C., Kaygusuz, A., Kaplan, Y., & Karabiber, A. (2016). Power regulated DC/DC driver design by hierarchical control. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3), 1325-1339. <https://doi.org/10.3906/elk-1312-19>
- Aslan, F. (2019). *Fotovoltaik panel destekli batarya şarj/deşarj devresi tasarımı ve simülasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Birkan, M. (2021). *Fotovoltaik sistemler için yüksek kazançlı DA-DA dönüştürücü tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Bozkurt, N. (2022). *Düşürücü tip bir DA-DA dönüştürücünün sistem tanımlama yöntemiyle tasarımı ve optimizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Cebeci, E., & Yaşa, Y. (2016). The development of DC-DC buck converter with practical design methods. *Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)* (pp. 691-695), Bursa.
- Çalışkan, A., Ünal, S., & Orhan, A. (2017). Buck-boost dönüştürücü tasarımı, modellenmesi ve kontrolü. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(2), 265-268.
- De Araujo, L. S., Alonso, A. M. D. S., & Brandao, D. I. (2020). Decentralized control of voltage-and current-controlled converters based on AC bus signaling for autonomous microgrids. *IEEE Access*, 8, 202075-202089. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036592>
- Evran, F. (2019). Azaltan DA-DA dönüştürücüsü için kayma kip denetleyici tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 519-530. <https://doi.org/10.29130/dubited.438089>
- Ghani, Z. A., Kamit, K., Zeain, M. Y., Zakaria, Z., Azidin, F. A., Hadi, N. A. A., & Lago, H. (2019). Development of a Dc to Dc buck converter for photovoltaic application utilizing peripheral interface controller. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(7), 1317-1324.
- Hauke, B. (2015). *Basic calculation of a Buck converter's power stage*. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1683646071412>
- Köse, E., Mühürücü, A., Mühürücü, G., & Aydoğan, E. (2017). Buck dönüştürücü çıkış geriliminin karınca koloni algoritması kullanılarak PI tabanlı optimal kontrolü. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 153-162. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.383217>

- Kim, S. J., Khan, Q., Talegaonkar, M., Elshazly, A., Rao, A., Griesert, N., & Hanumolu, P. K. (2014). High frequency buck converter design using time-based control techniques. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50(4), 990-1001. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2014.2378216>
- Liu, L., Zheng, W. X., & Ding, S. (2020). An adaptive SOSM controller design by using a sliding-mode-based filter and its application to buck converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 67(7), 2409-2418. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2973254>
- Mamur, A. (2012). *Fpga denetimli düşürücü DA-DA dönüştürücünün tasarımı ve gerçekleştirilmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özdemir, Ö. (2018). *Sürekli akım modunda çalışan alçaltıcı tip DA-DA dönüştürücülerin gerilim kontrolü* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özer, A., & Kelebekler, E. (2021). DA/DA alçaltıcı tip dönüştürücü devresinin TS-EN 61000-3-2 standardına uyumlu hale getirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 653-659. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1009998>
- Özer, T., Kıvrak, S., Oğuz, Y., Kelek, M. M., & Karaca, A. (2021). DsPic33fj32mc204 mikroişlemci tabanlı hall sensörlü fırçasız doğru akım motor sürücüsü tasarımı ve Proteus simülasyon uygulaması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(4), 820-828. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.889532>
- Salihmuhsin, M., & Babaoğlu, S. (2016). A Buck converter design with digitally implemented P controller. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 87-90.
- Sevim, D., & Bozkurt, N. (2021). DA-DA düşürücü dönüştürücünün sistem tanımlaması ve kontrolü. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 881-889. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1019650>
- Ürgün, S., Erfidan, T., & Çoruh, N. *DA-DA Buck dönüştürücü tasarımı ve gerçekleştirilmesi*. EMO. [https://www.emo.org.tr/ekler/e7b431c86a06d88\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/e7b431c86a06d88_ek.pdf)
- Yasko, M. A. (2018). *Fotovoltaik sistemlerde düşürücü tip DA-DA dönüştürücülü maksimum güç noktası izleyicisinin analizi, tasarımı ve gerçekleştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Yaylacı, E. K., Yılmaz, A. E., & Özdeş, H. N. (2022). Kızıl tilki optimizasyon algoritması ile DA-DA alçaltıcı tip dönüştürücü kontrolör katsayılarının optimizasyonu. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 129-140. <https://doi.org/10.46387/bjesr.1111592>

## Nano silis katkıli trakitik tuf esash geopolimer harçların farklı kür ortamlarında özelliklerinin incelenmesi

*Nano silica added trachytic tuff based geopolymer mortars investigation of properties in different curing environment*

Hadaan PEHLİVAN\*<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Kilis 7 Aralık Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

• Geliş tarihi / Received: 15.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 16.05.2023

### Öz

Bu çalışmada, nano silis (NS) ilave edilmiş alkalilerle aktifleştirilmiş trakitik tuf (TT) ile üretilen geopolimer harçların farklı kür ortamlarında dayanımları araştırılmıştır. Harçları aktive etmek için çok yaygın olarak kullanılmayan kalsiyum hidroksit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) kombine alkali aktivatörü kullanılmıştır. Geopolimerler çevre dostu üretimlere katkı sağlayacak şekilde alümino silikat ve endüstriyel atık esaslı malzemelerden elde edilebilir. Çalışmada kullanılan trakitik tuf bol miktarda alümino-silikat içeren volkanik orijinli ve alkali aktive özelliği endüstriyel atıklara göre düşük bir malzemedir. Bu nedenle geopolimer harçlar literatür ayrıntılı incelenerek  $80^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 96 saat kür ortamında sentezlenmiştir. Sülfat ve asit saldırıları yapı malzemelerinin hizmet ömrünü etkileyen en önemli kimyasal sorunlardır. Bu kapsamda %5 sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ), ve hidroklorik asit (HCl) çözeltilerinde 360 gün pH değişimleri ile birlikte mekanik davranışı incelenen geopolimer harçlarda en iyi performans gösteren %1.0 nano silis katkıli numunelerin sırasıyla; pH değerlerinin 13.2-11.8, 11.6-8.5, 3.5-2.6 aralığında; eğilme dayanımının 12.25, 11.50, 7.41 MPa; basınç dayanımının 66.12, 50.63, 40.82 MPa; olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Alkali aktivatör, Asit, Geopolimer, Nano silis, Sülfat, Trakitik tuf

### Abstract

*In this study, the strength of geopolymer mortars produced with alkali-activated trachytic tuff (TT) with nano silica (NS) added was investigated by curing in different environments. Calcium hydroxide  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) combined alkali activator, which is not widely used, was used to activate the mortars. Geopolymers can be obtained from aluminosilicate and industrial waste based materials to contribute to environmentally friendly production. The trachytic tuff used in the study is a material of volcanic origin containing abundant aluminosilicate and has a lower alkaline-activated property compared to industrial wastes. For this reason, geopolymer mortars were synthesized in a 96-hour curing environment at  $80^\circ\text{C}$  by examining the detailed literature. Sulfate and acid attacks are the most important chemical problems affecting the service life of building materials. In this context, the samples with 1.0% nano silica additive, which showed the best performance in geopolymer mortars, whose mechanical behavior was examined in 5% sodium sulphate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), magnesium sulphate ( $\text{MgSO}_4$ ), and hydrochloric acid (HCl) solutions along with pH changes for 360 days; pH values are in the range of 13.2-11.8, 11.6-8.5, 3.5-2.6; bending strength of 12.25, 11.50, 7.41 MPa; compressive strength of 66.12, 50.63, 40.82 MPa; was found to be.*

**Keywords:** Alkali activator, Acid, Geopolymer, Nano silica, Sulphate, Trachytic tuff.

\*Hadaan PEHLİVAN; hadaantaban@kilis.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Tarih öncesi dönemlerde puzolanik malzemelerin özellikle su yapılarında hidrolik bağlayıcı olarak kullanımına dikkat çekilmiş ve kullanım oranları bilgisi verilmiştir. Marn (killi kireçtaşı) ve alçıtaşı kullanımı uzun dönemde özellikle neme karşı dayanıklılık sorunları yaratmaktaydı. Bu dönemlerde dayanıklı harç veya beton yapımında volkanik malzemelerin kullanımına Romalıların öncülük ettiği bilgisine ulaşmaktayız. Günümüzde çimentolu kompozitlerden yüksek teknolojiye sahip olmaları aynı zamanda ekolojik kriterlere sahip olması beklenmektedir. Mikro katkıları ile birlikte nano katkıların kullanım olanakları araştırılmaktadır. Aynı zamanda çimento üretiminin çevreye vereceği zararları göz önünde bulundurulduğunda çimentosuz kompozitler olarak bilinen geopolimerler önem kazanmaktadır.

Alkali ile aktive edilerek üretilen geopolimerler atmosfere salınan kirli gazların düşük seviyelerde kalmasını ve doğal kaynaklar yerine atıklar kullanılarak çevrenin daha az zarar görmesini sağlamaktadır. Geopolimer üretiminde en fazla kullanılan alümino silikatlara örnek olarak uçucu kül, metakaolin, kırmızı çamur, cüruf, taban külü, pirinç kabuğu külü, silis dumanı verilebilir. Bu amorf karakterli endüstriyel atık malzemeler bir aktivatörle aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülmektedir (Bingöl, 2018).

Yüksek kür sıcaklığı gerektiren sodyum esaslı aktivatörlerdeki yüksek konsantrasyondaki hidroksit iyonları ( $\text{OH}^-$ ) özellikle uçucu kül aktivasyonunda etkili bir şekilde yüksek mukavemet gelişimi sağlar, bu aktivatörler yüksek pH toksisitesi (14'ün üzerinde) ve yüksek maliyet gibi sorunlara sahiptir. Kalsiyum hidroksit [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], daha düşük bir pH'a (14'ten az) sahip olduğundan ve NaOH veya  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'e göre daha ucuz olduğundan, sodyum esaslı aktivatörlere potansiyel bir alternatif olabilir. Bu nedenle  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile aktifleştirilmiş bir uçucu kül bağlayıcı sisteminde yalnızca mukavemeti etkili bir şekilde iyileştirmekle kalmayan, aynı zamanda dayanıklılık sorunlarını da önleyen yeni bir katkı maddesine ihtiyaç vardır. Bir uçucu kül bağlayıcının mukavemeti ve mikroyapısal gelişimi için yeni bir katkı maddesi olarak  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 'ün iyileştirici etkisi araştırılmaktadır (Jeon vd., 2015).

Alkali aktivasyon teknolojisi sadece  $\text{CO}_2$  emisyonlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek mekanik özellikler ve sülfat saldırılarına karşı yüksek direnç sağlar. Günümüzde geopolimer üretiminde en yaygın kullanılan sodyum, potasyum hidroksit (NaOH, KOH) ve sodyum ve potasyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) kullanımı yüksek maliyet, hızlı sertleşme, yüksek kuruma büzülmesi ve çok sayıda mikro çatlak oluşumuna yol açabilir.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , CaO,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kullanımı ve reaktif MgO daha düşük maliyet, daha uzun sertleşme süresi ve daha yavaş dayanım gelişimi nedeniyle daha çevre dostu alkali aktive malzemeler üretmek için alternatif bir seçenek sunar. Bununla birlikte düşük pH'ın neden olduğu erken yaşlarda yavaş mukavemet gelişimi bu tip aktivatörlerin kullanımını sınırlar. CaO/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  kombinasyonu ümit verici bir aktivatördür. Bir yandan, CaO/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ile reaksiyonu sonucu oluşan NaOH, ortamın pH'ını yükseltebilir, erken yaşlarda daha yüksek bir cüruf çözünme hızıyla sonuçlanan gözenekli çözelti; diğer yandan,  $\text{CaCO}_3$ 'ün doldurma etkisi ve çekirdeklenme etkisi C-(A)-S-H jellerinin oluşumu ve gözenekliliğin azalması üzerinde olumlu etkilere neden olabilir. CaO ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 'ün birlikte kullanımı, NaOH oluşumuna bağlı olarak gözenek çözeltisinin pH'ını yükselterek, erken yaşlarda uygun bir basınç dayanımına katkıda bulunur (Bian vd., 2021).

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  doğal alkaliler ve sodyum karbonat bakımından zengin tuzlu sulardan elde edilen veya çeşitli kimyasal işlemler sonucunda üretilen doğal bir mineraldir. Dünya çapında 24 milyar tondan fazla  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  rezervi bulunmaktadır. Bu mineral, çimentolu malzemelerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. Örneğin  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  kullanılması çimentonun erken basınç dayanımını ve klorür direncini geliştirebilir Püskürtme betonda  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  betonun işlenebilirliğini artırmak için hızlandırıcı olarak kullanılır. Klinkersiz alkali ile aktifleştirilmiş çimentoda, hızlandırıcı olarak  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  kullanılması, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanımına kıyasla üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca daha güvenli ve daha çevre dostudur (Wang vd., 2022).

Trakit ince taneli genelde açık tonlarda, kaba bir yüzeye sahip feldspatça zengin volkanik kayadır. Farklı kaynaklardaki araştırmalara göre bu kaya tipini ilk tanımlayan jeoloji tarihinde kalıcı bir iz bırakan Alexandre Brongniart (1770-1847) ve René Just Haüy (1743-1822) olarak bilinen Fransız mineraloglardır. Günümüzde andezit ve riyolit diye bilinen kayaların ismine geçmişte trakit adı verilmiştir. Trakit bu ikisi arasında bir kimyasal bileşime sahip bir kayadır. Trakit bol olmasına rağmen az bilinir. Trakit genellikle potasyum feldspat

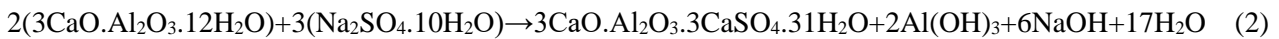
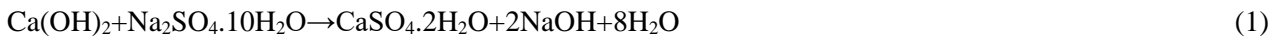
ve sanidin içeriği bilinir, fakat plajiyoklaz, anortoklaz ve feldspatoyidik gibi çeşitleri de vardır. Plajiyoklaz olan trakitler, traki-andezit olarak tanımlanır (Sert, 2010; Görmüş & Sagular, 2003).

Türkiye’de bulunan trakit alanlarının içerisinde Isparta Gölcük volkanitleri, kuzey batısında kalan Gölcük krater gölünden dolayı; trakit, traki-andezit, andezit, tüf ve tüfitten oluşur (Bilgin vd., 1990). Isparta bölgesinde görülen trakitler haricinde Afyon volkanitleri petrografik olarak başlıca; trakit, traki-andezit, porfiroidal trakit, trakitik tüf ve çok az oranlarda da bazalt bileşimli olup, asidik-nötr kayalardır. Afyonkarahisar il merkezi ve yakın çevresinde yüzeylenen volkanik kayaların ve tüflerin yapı taşı olarak kullanılabilme ve kolay kazılabilme özelliğine sahip olması, volkanik küllerinin çok ince taneli ve toz halinde olması nedeniyle çimento üretiminde kullanılması önerilebilir (Kibici vd., 2012).

Çimentolu sistemlerde küçük bir nano silis yüzdesinin, daha yoğun bir mikro yapı ile önemli bir mukavemet artışına neden olabileceği gözlemlenmiştir. (Deb vd., 2016). Geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak ayrıca geopolimer betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek için genellikle ısı aktivasyonunun gerekli olduğu bilinmektedir. Nano silis ilavesi ile yüksek hacimli uçucu kül harçlarının basınç dayanımı ve dayanıklılığı oda sıcaklığında kür koşullarında da önemli ölçüde iyileştirilmiştir (Adak vd., 2017). Nano silis gözenek doldurma etkisinin yanı sıra reaktif olması nedeniyle çimentolu kompozitlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır. Nano silis amorf doğası nedeniyle, daha geniş yüzey alanı ve Si-Al ve Si çözünme oranlarına bağlı, uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda geopolimerizasyon sürecini önemli derecede geliştirir. Nano silis geopolimerizasyon sürecini geopolimer jel miktarını, silika ve alüminanın çözünme oranını artırarak iyileştirebilir. Ayrıca, yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle mikroyapısal özellikleri de geliştirir (Raj vd., 2023).

Sülfat saldırısı geopolimer malzemeler için önemli bir dayanıklılık ve hizmet sorunudur. Portland çimentosu ve katkılı çimento betonlarının da sülfat saldırısına maruz kaldığında bozulduğu görülmüştür. Portland çimentosu betonu üzerindeki sülfat saldırısı nedeniyle meydana gelen reaksiyonlar; CH, CSH ve sertleşmiş çimento hamurunun alüminat bileşenini içerir. Genleşme ve çatlama doğrudan veya dolaylı olarak etrenjit ve jips oluşumundan kaynaklanırken, yumuşama ve parçalanma CSH'nin yok edilmesinden kaynaklanır. Geopolimer betonların agresif ortamlarda daha iyi performans gösterdikleri bulunmuştur (Elyamany vd., 2018).

Sülfatların özellikle  $\text{Ca(OH)}_2$  ve  $\text{C}_3\text{A}$  gibi hidrate çimento bileşenleriyle yaptıkları reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünler alçıtaşı ve kalsiyum sülfat alüminatıdır. Sodyum sülfatın  $\text{Ca(OH)}_2$  ile yaptığı katı fazın hacmini %124 arttıran reaksiyon Denklem 1’de verilmiştir. Sodyum sülfatın hidrate  $\text{C}_3\text{A}$  ile reaksiyonu ise Denklem 2’de verilmiştir. Kalsiyum sülfat ise Denklem 3’te verildiği gibi yalnızca  $\text{C}_3\text{A}$  ile reaksiyona girer ve kalsiyum sülfat alüminat oluşturur. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan etrenjit katı fazın hacmini %227 arttırmaktadır. Magnezyum sülfatın  $\text{Ca(OH)}_2$  ile yaptığı reaksiyonda Denklem 4’te verildiği gibi  $\text{C}_3\text{A}$  ve aynı zamanda CSH 'a saldırı görülmektedir (Ilıca, 2018). Doygun magnezyum sülfat çözeltisinin pH değeri 10.5 gibi bir seviyede olduğu için çimento hamurunun taşıyıcı iskeleti olan CSH kararlılığını sürdürmez ve çimentolu sistemde çok kısa sürede ciddi tahribat oluşmaktadır (Baradan vd., 2018).



Başka bir konu ise iç sülfat etkisinin özel bir durumu olan gecikmiş etrenjit ve tomasit oluşumudur. Gecikmiş etrenjit oluşumu çimentonun yüksek oranda içerdiği çözünen sülfat iyonlarının uzun süre ve ıslanma-kuruma sonunda jel görünümlü etrenjite dönüşmesidir. Bunun için betonun sülfatlı sularla temas etmesi şart değildir. CSH jelini tüketen, jips ve etrenjite göre daha zararlı olan tomasit oluşumu için ise betonun sülfatlı bir ortamda bulunması gerekir. Bu etki sülfata karşı direnci sağlamak amacıyla düşük oranda  $\text{C}_3\text{A}$  içeren çimentoların kullanımında da görülmüştür (Van Aardt & Visser, 1975). Tomasit, etrenjit kristallerine çok benzeyen bir kafes yapısına sahip olmasına karşın yapısında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yerine  $\text{SiO}_4$  bulunmaktadır. Tomasit oluşumu CSH jeli ile  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$  veya  $\text{CO}_3^{2-}$  ve su arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelmektedir (Santhanam vd., 2001).



Bu çalışmada, geopolimer kompozit üretiminde kullanılabilirliği üzerine araştırma yapılmamış olan volkanik kökenli kayalardan olan trakitik tüf (TT) seçilmiştir. Volkanik kayalar bakımından zengin olan bölgelerdeki yöresel hammaddelerin çimento esaslı ve çimento esaslı olmayan üretimlerde değerlendirilmesi önemli olmaktadır. Çimento esaslı malzemeler üzerinde sülfat etkisini azaltmak için nano silis kullanımı önerilmektedir. Ancak nano silis katkılı geopolimer kompozitlerin sülfat ve asit ortamlarında davranışları konusunda araştırmalar sınırlıdır. Bu kapsamda nano silis (NS) katkısı ilave edilmiş trakitik tüfü (TT) alkali aktive etmek için yaygın kullanılmayan kalsiyum hidroksit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) kombine aktivatörü tercih edilmiştir. pH değişimleri belirli sürelerde takip edilen sülfat ve asit ortamlarında bekletilen geopolimer harçların mekanik özellikleri araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

#### 2.1. Materyal

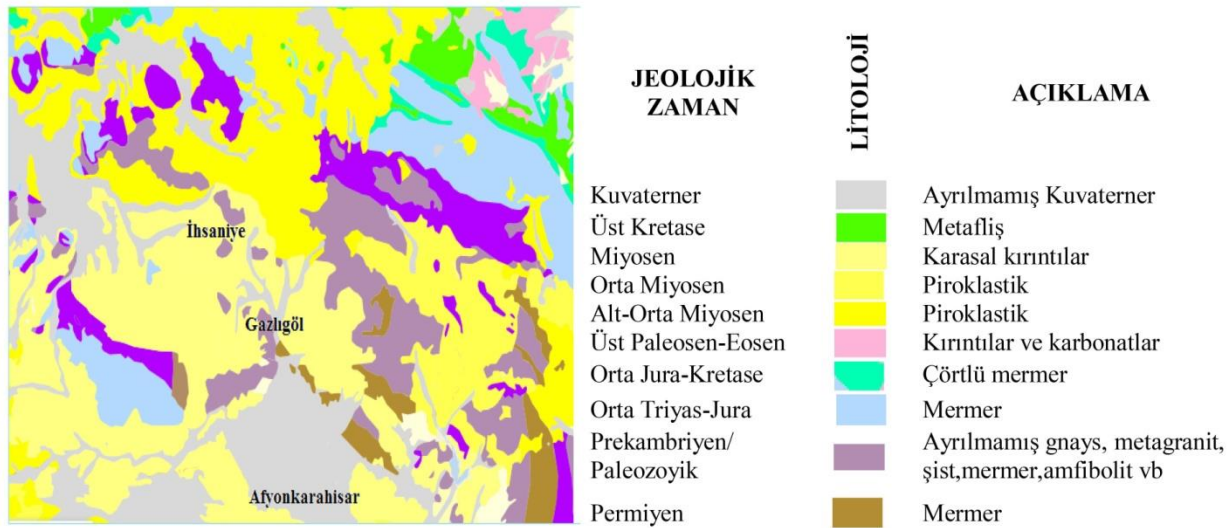
##### 2.1.1. Material

Bu çalışmada geopolimer harç üretmek için trakitik tüf (TT), nano silis (NS), standart kum, alkali aktivatör olarak  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ , farklı kimyasal kür ortamları hazırlamak için magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ), sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ve hidroklorik asit (HCl) kullanılmıştır.

##### 2.1.1.1. Trakitik tüf (TT)

###### 2.1.1.1. Trachytic tuff (TT)

Bu çalışmada kullanılan trakitik tüf (TT) numunesinin temin edildiği tektonik faaliyetlere bağlı olarak oluşan kıta içi volkanizma Afyonkarahisar civarı rezerv alanı Şekil 1'de verilmiştir. Orta Anadolu özellikle Orta Miyosenden bu yana şiddetli volkanik olaylar etkisinde çok geniş alanlarda yaygın ürünler oluştuğu Şekil 1'de görülmektedir.



**Şekil 1.** Çalışma alanına ait jeoloji haritası ve litostragfisi (MTA Web Sitesi kullanılarak hazırlanmıştır)  
**Figure 1** Geological map and lithostratigraphic column of the study area (prepared using MTA Web Site)

Miyosen yaşlı volkanitler; çoğunlukla andezit ve dasitik türlerin egemen olduğu çeşitli lavlar; ignimbiritler ve volkanik küller; eş yaşlı çökel kaya birimleriyle ara katkılı olan volkanik küllerden oluşmaktadır. Kuvaterner yaşlı volkanitler ise çeşitli türde lavlardan meydana gelmektedirler (Ercan, 1985).

Çalışmada kullanılan Afyonkarahisar'dan temin edilen Şekil 2'de görülen trakitik tüf (TT) numunesine ait kayaç parçaları puzolanlarda incelik sınırlarına ASTM C618-19 (2019) göre  $45\mu$  elekten geçen numune miktarı %64,2 olacak şekilde öğütülmüştür.



**Şekil 2.** Trakitik tuf kayaç parçaları ve öğütülmüş trakitik tuf  
**Figure 2.** Trachytic tuff rock fragments and ground trachytic tuff

Trakitik tufün (TT) X-Işını Floresans (XRF) analizine göre kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. TT kızdırma kaybının %7.84 olduğu, TT içerisinde  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamının %83.5 olduğu, CaO'un %2.21 oranında, MgO'un %0.39 oranında ve diğer bileşenlerin ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ . vd. ) %5.78 oranında olduğu görülmüştür.

**Tablo 1.** Trakitik tuf kimyasal ve fiziksel özellikleri  
**Table1.** Chemical and physical properties of trachytic tuff

<b>Kimyasal bileşen</b>	<b>Miktar (%)</b>
$\text{SiO}_2$	66.98
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11.40
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2.12
CaO	2.21
MgO	0.39
$\text{K}_2\text{O}$	5.00
$\text{Na}_2\text{O}$	0.74
$\text{SO}_3$	0.04
Kızdırma Kaybı	7.84
<b>Fiziksel özellik</b>	<b>Miktar (%)</b>
Yoğunluk( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.28
Özgül yüzey ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4670

### 2.1.2. Nano silis (NS)

#### 2.1.2. Nano silica (NS)

Geopolimer harç üretiminde volkanik esaslı trakitik tuf (TT) ile birlikte özellikleri Tablo 2' de verilen nano silis (NS) kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Nano silis kimyasal ve fiziksel özellikleri  
**Table2.** Chemical and physical properties of nano silica

<b>Nano silis fiziksel ve kimyasal özellik</b>	<b>Değer</b>
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	45
Safılık(%)	99.9
Yüzey Alanı ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	8000
Renk	Beyaz
Kristal Yapısı	Polikristal
Özgül ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.33

### 2.1.3. Alkali aktivatörler

#### 2.1.3. Alkaline activators

Trakitik tüfü (TT) aktive etmek için Tablo 3'te kimyasal özellikleri verilen kalsiyum hidroksit [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], +sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Kalsiyum hidroksit ve sodyum karbonata ait kimyasal özellikleri  
*Table 3. Chemical properties of calcium hydroxide and sodium carbonate*

Özellikler	Kalsiyum hidroksit	Sodyum karbonat
Cas no	1305-62-0	497-19-8
Molekül formülü	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$
Molekül ağırlığı (g/mol)	74.09	105.98
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.21	2.54
Safılık (%)	91.50	99.50
Erime Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	580	851
Kaynama Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	2850	1304

### 2.1.4. Kür çözeltileri

#### 2.1.4. Curing solutions

40×40×160 mm boyutlarında geopolimer harçlar 96 saat etüvde kür prosesi sonrasında farklı kimyasal ortamlarda kür için Tablo 4'te özellikleri verilen % 5 susuz magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) çözeltisi, % 5 susuz sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ve % 5 hidroklorik asit ( $\text{HCl}$ ) çözeltileri içerisinde 360 gün bekletilmiştir. [ASTM C1012M-18b \(2019\)](#) ve [ASTM C267 \(2020\)](#) esaslarına göre hazırlanmış kimyasal ortamlarda geopolimer numunelerin bekletildiği çözeltilerin pH ölçümleri alınmış ve geopolimer numunelerin mukavemetleri test edilmiştir.

**Tablo 4.** Magnezyum sülfat, sodyum sülfat ve hidroklorik asite ait kimyasal özellikleri  
*Table 4. Chemical properties of magnesium sulfate, sodium sulfate and hydrochloric acid*

Özellikler	Magnezyum sülfat	Sodyum sülfat	Hidroklorik asit
CAS no	10034-99-8	7757-82-6	7647-01-0
Molekül formülü	$\text{MgSO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{HCl}$
Molekül ağırlığı (g/mol)	246.47	142.04	36.46
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.68	2.66	1.2
Safılık (%)	98	99	30-33
Erime Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	150	884	-35
Kaynama Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	330	1429	57

### 2.1.5. Kum

#### 2.1.5. Sand

Geopolimer harçların üretiminde Limak Batı Çimento San. Tic. A.Ş.'den temin edilen kum kullanılmıştır.

### 2.2. Metot

#### 2.2. Method

Bu çalışmada geopolimer harçları üretmek için trakitik tük (TT), trakitik tükün ağırlıkça %0, 1, 1.5 ve 2 oranlarında nano silis (NS), %10 oranında  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , %5 oranında  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kullanılmıştır. Üretilen numuneler sırasıyla; TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 olarak kodlanmıştır. Nano silis (NS) katkılı trakitik tük (TT) esaslı geopolimer harçların farklı kür ortamlarında mekanik özelliklerini araştırmak için 40x40x160 mm boyutlarında Tablo 5'te verilen plana göre üretimi yapılmıştır.

**Tablo 5.** Geopolimer harçlara ait karışım oranları  
**Table 5.** Mixing ratios of geopolimer mortars

Karışım	Trakitik tuf (g)	Nano silis (g)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (g)	Ca(OH) <sub>2</sub> (g)	Su (g)	s/b	Kum (g)
TTNS0.0	450	0	45	22.5	225	0.50	1350
TTNS1.0	450	4.5	45	22.5	235	0.52	1350
TTNS1.5	450	6.75	45	22.5	240	0.53	1350
TTNS2.0	450	9	45	22.5	253	0.56	1350

Trakitik tuf esaslı geopolimer harç hazırlamak için ağırlıkça trakitik tuf miktarına göre sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ve kalsiyum hidroksit [Ca(OH)<sub>2</sub>] kombine aktivatörü kullanılmıştır. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dozu (Bernal vd., 2015; Walling vd., 2018; Yang vd., 2019) trakitik tufün ağırlıkça %10'u olarak alınmıştır. Ca(OH)<sub>2</sub> 'nin toplam miktarı ise (Jin vd., 2015; Ke vd., 2016; Yang vd., 2019) trakitik tufün ağırlıkça %5'i olarak alınmıştır.

Çalışmada kullanılan alkali aktivatörün kombine reaksiyonu Denklem 5'te verilmiştir.



Kombine alkali aktivatörün pH değeri Şekil 3'te görüldüğü gibi 13.7 olarak ölçülmüştür. Ca(OH)<sub>2</sub> kullanımı yaygın olan sodyum esaslı alkali aktivatörlere göre düşük pH (14'ün altında) avantajı sağlamaktadır.



**Şekil 3.** Kombine alkali aktivatörün pH'ı  
**Figure 3.** pH of the combined alkaline activator

Geopolimer kompozitlerde en uygun alkali aktivatör, kür süresi ve zaman ilişkisi belirlenerek dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılması gerekmektedir. Özellikle geopolimer üretiminde kullanılacak trakitik tuf gibi düşük alkali aktive özelliğine sahip volkanik orijinli malzemelerde bu ilişkiler çok daha önemli olmaktadır.

Khale ve Chaudhary (2007) tarafından kür sıcaklığı 50°C'nin üzerine çıkarıldığında geopolimer sentezinin kısa sürede olması; Al Bakri vd. (2011) tarafından kür sıcaklığının ortalama 40-70°C aralığında önerilmesi dikkate alınarak geopolimer kompozitleri üretmek için Şekil 4'te görüldüğü gibi kür sıcaklığı 80°C ve kür süresi 96 saat olarak alınmıştır.



**Şekil 4.** Geopolimer harçların etüv kürü  
**Figure 4.** Oven curing of geopolimer mortars

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

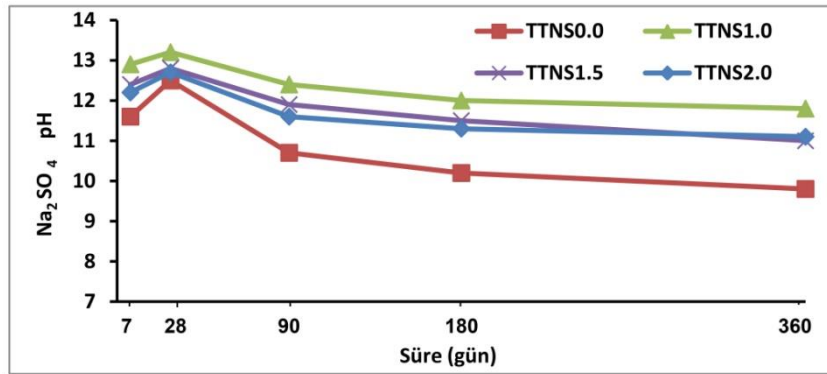
Portland çimentosu esaslı kompozitlerin en önemli sorunlarından bir tanesi sülfat ve asit etkilerine karşı direncinin düşük olmasıdır. Yapı hizmet ömrünü uzatmak için düşük  $C_3A$  içeriğine sahip çimentoların kullanılması önerilmektedir ancak yeterli olmadığı için alternatif malzemelerin araştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda geopolimerlerin çözüm olabileceği düşünülmektedir.

Geopolimer harçların bekletileceği farklı kür ortamlarının başlangıç pH değerleri; %5 sülfat çözeltileri için ( $MgSO_4$  ve  $Na_2SO_4$ ) sırasıyla 7.8 ve 8.2 olarak, %5 asit çözeltisi için (HCl) ise 3.1 olarak ölçülmüştür. Kombine alkali aktivatör kullanılarak 40x40x160 mm boyutlarında üretilen geopolimer harçların 360 gün sülfat ve asit çözeltileri içerisindeki pH değişimleri Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde; nano silis (NS) katkılı ve katkısız tüm geopolimerlerin, sülfat çözeltileri içerisinde ( $MgSO_4$  ve  $Na_2SO_4$ ) 28 gün bekletildiğinde çözeltilerin pH değerlerinin arttığı sonrasında 90, 180 ve 360 gün bekletildiğinde ise pH değerlerinin bir miktar azalıp sonrasında fazla bir değişim olmadığı anlaşılmaktadır. Nano silis (NS) katkılı ve katkısız tüm geopolimerlerin asit çözeltisi içerisinde (HCl) 28 gün ve sonrasında 90, 180 ve 360 gün bekletildiğinde ise çözeltilerin pH değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Thokchom vd. (2010) çalışmasında, 24 hafta %10  $MgSO_4$  çözeltisinde uçucu kül (UK) esaslı geopolimer harç numunelerinin pH değerlerinin ilk haftalarda hızlıca arttığını daha sonra önemli bir artışın olmadığını hatta durduğunu saptamıştır. Alcamand vd. (2018) tarafından yapılan benzer bir çalışmada NaOH ile aktive edilmiş metakaolin ve cüruf bazlı geopolimer harçlar 28 gün boyunca oda koşullarında kür sonrası 180 gün %5  $MgSO_4$  çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sülfat çözeltilerinin pH değerlerinin ilk 30 gün %31.29 artış gösterdiği daha sonra testin sonuna kadar (180 gün) pH değerinin çoğunlukla sabit olduğu belirtilmiştir.

Bu durum literatüre paralel bir şekilde ilk günlerde (28 güne kadar) geopolimerdeki alkalilerin çözeltilere geçmesi ile açıklanabilir.

Şekil 5'ten TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 numunelerin tüm günlerde  $Na_2SO_4$  çözeltisi içerisinde pH değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla; 12.5 -9.8, 13.2-11.8, 12.8-11.0, 12.7-11.1 aralığında olduğu anlaşılmaktadır.



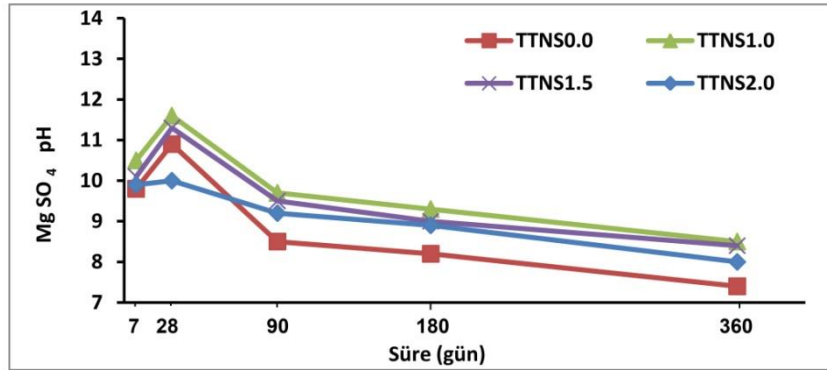
Şekil 5. Geopolimer numunelerin günlere göre  $Na_2SO_4$  çözeltisinde pH değerleri  
Figure 5. pH values of geopolimer samples in  $Na_2SO_4$  solution according to days

Şekil 6'dan TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 numunelerin tüm günlerde  $MgSO_4$  çözeltisi içerisinde pH değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla; 10.9-7.4, 11.6-8.5, 11.3-8.4, 10.0-8.0 aralığında olduğu anlaşılmaktadır.

Kwasny vd. (2018) çalışmasında, Portland çimentosu bazlı betonların agresif sulu ortamlarda reaksiyona girebileceğini ayrıca yüksek alkali ortamda ( $pH > 12.5$ ) sertleşmiş çimento hamurunun agresif iyonlar taşıyan sularla teması durumunda fiziksel olduğu kadar kimyasal bozunmaya da uğrayabileceğini bildirmiştir.

Bulunan değerler, kullanılan kombine alkali aktivatörlerin yüksek pH toksisitesine ( $\text{pH} > 14$ ) neden olmayacağına ve agresif ortamlarda geopolimer harçların daha iyi performans gösterebileceğine işaret etmektedir.

Sülfat çözeltileri ile temas eden geopolimerlerde reaksiyona giren kalsiyum hidroksit  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  azalmaktadır.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltileri ile temas halinde jips ve etrenjit,  $\text{MgSO}_4$  çözeltileri ile temas halinde sadece jips gibi hacim artışına neden olan tuzlar oluşmaktadır. Geopolimerdeki kalsiyum hidroksit  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  ile sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) reaksiyonu sonucunda jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ve sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) oluşurken, magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) reaksiyonu sonucunda jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ve magnezyum hidroksit/brüst  $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$  oluştuğu bilinmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6'dan; geopolimerlerin temas ettiği çözeltilerin pH değerlerini, suda çözünürlüğü yüksek olan  $\text{NaOH}$ 'ın,  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  tüketimini azaltarak  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ortamında arttırdığı; suda çözünürlüğü düşük olan  $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ 'in ise  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  tüketimini arttırarak  $\text{MgSO}_4$  ortamında düşürdüğü; görülmektedir. Bu durumda geopolimerlerden sülfat çözeltilerine geçen bazik iyonların sayısı zaman içerisinde azalmaktadır.

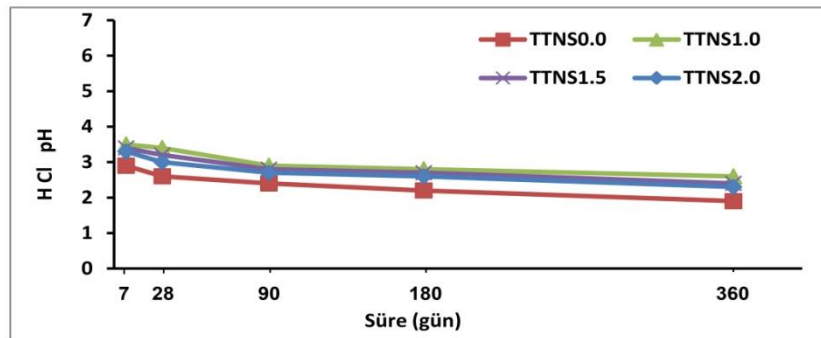


**Şekil 6.** Geopolimer numunelerin günlere göre  $\text{MgSO}_4$  çözeltisinde pH değerleri  
**Figure 6.** pH values of geopolymer samples in  $\text{MgSO}_4$  solution according to days

Şekil 7'de TTNS0.0, TTNS1.0, TTNS1.5 ve TTNS2.0 numunelerin tüm günlerde  $\text{HCl}$  çözeltisi içerisinde pH değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri sırasıyla; 2.9-1.9, 3.5-2.6, 3.4-2.4, 3.3-2.3 aralığında olduğu görülmektedir.

Asit etkisine maruz kalan betondaki bozulma süresi, kalsiyum tuzlarının suda çözünme sürelerine bağlıdır.  $\text{HCl}$  çok kolay çözünebilen  $\text{CaCl}_2$  meydana getirir Bazik karakterde olan Portland Çimentoları asitlere karşı dayanıksızdır.  $\text{pH} < 6.5$  değerine sahip olan sular, beton içerisindeki çimento harcı ve agregada bulunan karbonat kökenli tanecikler üzerinde çözücü ve ayrıştırıcı etki oluşturur (Baradan vd., 2010).

Başlangıçtan itibaren temas çözeltilerinin pH değerlerinin zaman içerisinde azalması geopolimerdeki kalsiyum hidroksit  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  ile hidroklorik asit ( $\text{HCl}$ ) reaksiyonu sonucunda zayıf baz karakterli kalsiyum klorür  $[\text{Ca}(\text{Cl})_2]$  oluşumu ile açıklanabilir.



**Şekil 7.** Geopolimer numunelerin günlere göre  $\text{HCl}$  çözeltisinde pH değerleri  
**Figure 7.** pH values of geopolymer samples in  $\text{HCl}$  solution according to days

96 saat etüv kürü sonrası 28 gün suda bekletilen, sonrasında 360 gün sülfat ve asit çözeltilerine maruz bırakılan geopolimer harçların mekanik özellikleri Tablo 6 ve Tablo 7'de verilmiştir. Tablolar incelendiğinde; %1.0 nano silis katkılı geopolimer harç numunelerinin (TTNS1.0) eğilme ve basınç dayanımlarının; tüm kür ortamlarında en iyi olduğu, nano silis ilave oranı arttıkça düştüğü; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilinde 360 gün bekleyen geopolimer numunelerin MgSO<sub>4</sub> ve HCl ortamında bekleyen numunelere göre arttığı; görülmektedir.

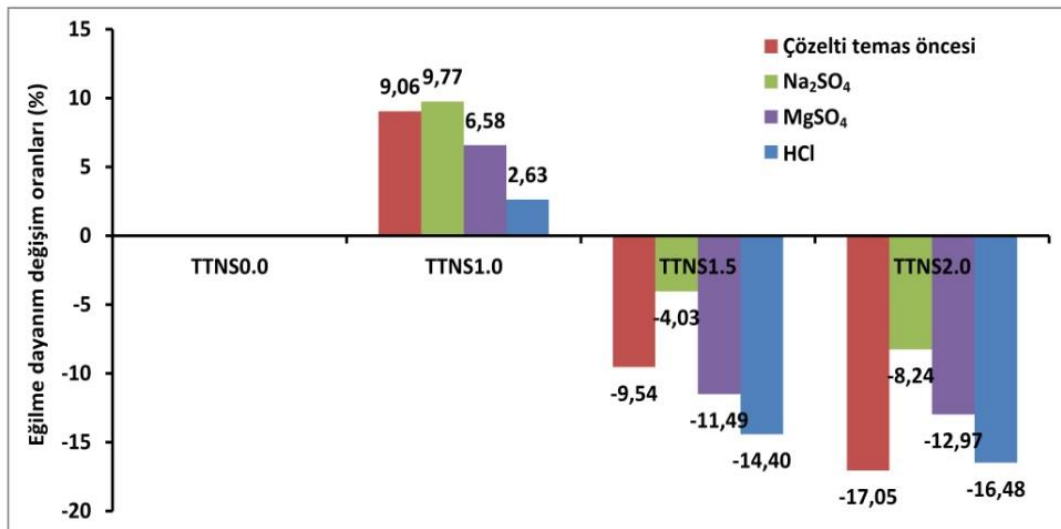
**Tablo 6.** Farklı ortamlarda kür edilmiş geopolimer harçların 360 günlük eğilme dayanımları  
*Table 6. 360-day flexural strengths of geopolimer mortars cured in different environments*

Karışımlar	Eğilme dayanımı (MPa)			
	Sülfat ve asit temas öncesi	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	HCl
TTNS0.0	10.38	11.16	10.79	7.22
TTNS1.0	11.32	12.25	11.50	7.41
TTNS1.5	9.39	10.71	9.55	6.18
TTNS2.0	8.61	10.38	9.39	6.03

**Tablo 7.** Farklı ortamlarda kür edilmiş geopolimer harçların 360 günlük basınç dayanımları  
*Table 7. 360-day compressive strength of geopolimer mortars cured in different environments*

Karışımlar	Basınç dayanımı (MPa)			
	Sülfat ve asit temas öncesi	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	HCl
TTNS0.0	47.53	59.61	47.28	38.96
TTNS1.0	52.14	66.12	50.63	40.82
TTNS1.5	43.80	58.09	44.74	36.46
TTNS2.0	40.55	54.16	42.36	34.20

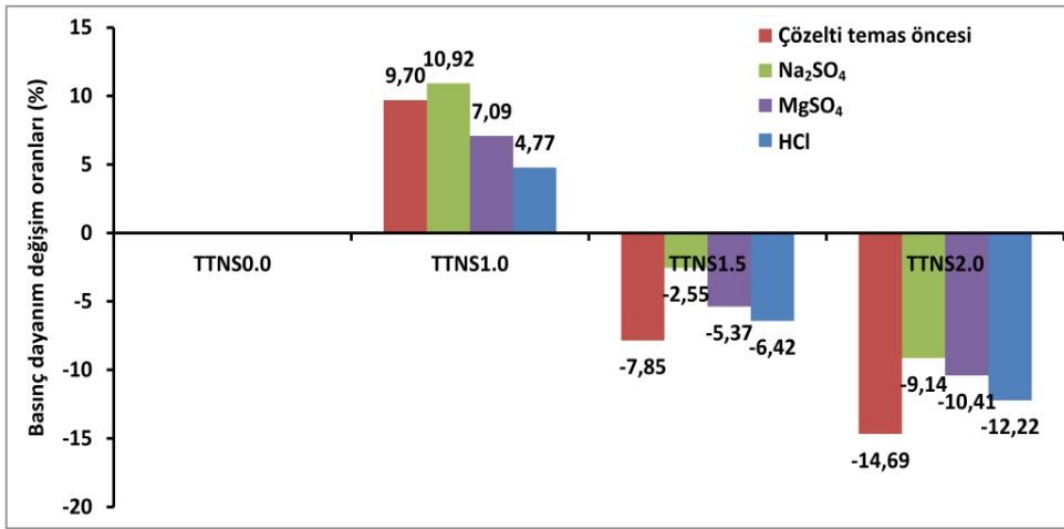
Geopolimer harçların eğilme dayanımı değişim oranları Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'den; trakitik tuf esaslı geopolimer harçlara nano silisin %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen numunelerin eğilme dayanımlarının nano silis ilavesiz numunelere göre sırasıyla; çözeltili temas öncesinde %9.06 oranında arttığı ve %9.54 ve %17.05 oranında azaldığı; 360 gün Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamında bekletildiğinde %9.77 oranında arttığı ve %4.03 ve %8.24 oranında azaldığı; MgSO<sub>4</sub> ortamında bekletildiğinde %6.58 oranında arttığı ve %11.49 ve %12.97 oranında azaldığı; HCl ortamında bekletildiğinde %2.63 oranında arttığı ve %14.40 ve %16.48 oranında azaldığı; anlaşılmaktadır.



**Şekil 8.** Geopolimer harçların eğilme dayanımı değişim oranları  
*Figure 8. Flexural strength change rates of geopolimer mortars*

Huang vd. (2021) tarafından  $MgSO_4$  çözeltilisine maruz bırakılan numuneler üzerinde yapılan çalışmada, 36 ay sonunda eğilme mukavemet kayıpları önce azalmış, sonrasında nano silis dozajının artmasıyla birlikte artmıştır. (Arslan, 2014) geopolimerde eğilme dayanım kayıplarına bağlı gevrekliğe yol açmayacak şekilde %2'den düşük nano silis oranlarının tercih edilmesine işaret etmiştir. Literatür incelendiğinde ağırlıkça %5-8'den yüksek nano silis dozajlarının  $MgSO_4$  çözeltilisine maruz kalan geopolimer harçlar üzerinde bozucu etkiyi şiddetlendirdiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada geopolimer üretiminde kullanılan %1.0 nano silis katkısının  $MgSO_4$  saldırısının hafifletilmesinde etkili olması literatürle örtüşmektedir. 360 gün sülfat ortamında bekletilen geopolimer harçların performansının düşük nano silis dozajlarında en iyi olduğu görülmektedir.

Geopolimer harçların basınç dayanımı değişim oranları Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'dan; traktitik tuf esaslı geopolimer harçlara nano silis %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında ilave edilmesi ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarının, nano silis ilavesiz numunelere göre sırasıyla; çözelti temas öncesinde %9.70 oranında arttığı ve %7.85 ve %14.69 oranında azaldığı; 360 gün  $Na_2SO_4$  ortamında bekletildiğinde %10.92 oranında arttığı ve %2.55 ve %9.14 oranında azaldığı;  $MgSO_4$  ortamında bekletildiğinde %7.09 oranında arttığı ve %5.37 ve %10.41 oranında azaldığı; HCl ortamında bekletildiğinde %4.77 oranında arttığı ve %6.42 ve %12.22 oranında azaldığı; anlaşılmaktadır.



Şekil 9. Geopolimer harçların basınç dayanımı değişim oranları  
Figure 9. Compressive strength change rates of geopolimer mortars

Orhan (2022) çalışmasında %5  $Na_2SO_4$  çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerlerinin %5  $MgSO_4$  çözeltilisinde bekletilen numunelerin basınç dayanım değerlerinden daha fazla olduğunu bulmuştur. Yazıcı (2022) yüksek sıcaklık+HCl sonrasında tüm numunelerin basınç dayanımlarında azalma olurken yüksek sıcaklık+ $Na_2SO_4$  sonrasında artış olduğunu ifade etmiştir. Diğer taraftan Koç (2021)  $Na_2SO_4$  etkisindeki numunelerin 30. günde basınç dayanımının 75,14 MPa,  $MgSO_4$  etkisindeki numunelerin ise 64,31 MPa olduğunu bildirmiştir. Akbulut (2020) tarafından %10, %20 ve %30 oranında yüksek fırın cürufu (YFC) içeren perlit esaslı geopolimer karışımlarda; %5 HCl çözeltilisine maruz bırakılan numunelerin asit çözeltilisine maruz bırakılmayan numunelere göre dayanım kayıpları sırasıyla %11,19 %30,77 ve %31,35; %5  $MgSO_4$  çözeltilisine maruz bırakılan numunelerin sülfat çözeltilisine maruz bırakılmayan numunelere göre dayanım kayıpları sırasıyla %4,56 %19,38 ve %18,02 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada 360 gün %5  $Na_2SO_4$  ortamında bekletilen geopolimer harçların basınç dayanım kayıplarının %5  $MgSO_4$  ortamında bekletilen geopolimer harçlara göre daha az ve 5 HCl ortamında bekletilen geopolimer harçlarda ise diğer sülfat çözeltililerine göre en fazla olması literatüre benzer sonuçlar vermiştir. Buna göre hidroklorik asit etkisi altında çimentolu sistemde CSH jelinin bozulmasının diğer sülfat etkilerinden daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Özcan (2018) %5  $MgSO_4$  ve %5  $Na_2SO_4$  çözeltililerinin geopolimer betonların basınç dayanımlarını azaltıcı etkisi olduğunu bildirmiştir. Sülfat saldırısının betondaki Ca bileşenleri ile etkileşerek etrenjit ve alçıtaşı oluşturacağını açıklamıştır. Bu bağlamda geopolimer beton karışımındaki artan yüksek fırın cürufu (%32.45 CaO içerikli) oranlarının, Elazığ ferrokrom cürufuna (%1.1 CaO içerikli) göre basınç dayanımını azalttığını aynı zamanda çok daha fazla CaO içeriğine sahip yüksek fırın cürufunun sülfat saldırılarından daha fazla



etkilendiğine dikkat çekmiştir. Çimentolu sistemlerde  $\text{SiO}_2$  bakımından zengin düşük CaO içeren puzolan kullanımı, puzolanik reaksiyon sonucu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'inin bağlanmasına ve sülfat bileşikleriyle reaksiyona girmesine engel olmaktadır. Benzer şekilde Ren vd. (2017) geopolimerik malzemelerin mükemmel sülfat direnç nedenini, kaynak malzemelerindeki düşük Ca içeriğine ve daha kararlı çapraz bağlı alüminosilikat polimer yapılarına bağlamıştır. Bu çalışmada geopolimer üretiminde kullanılan düşük CaO (%2.21) içeriğine sahip trakitik tüfle birlikte %1.0 nano silis ilavesinin 360 gün %5  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve %5  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerinde bekletilen geopolimer harçların basınç dayanımlarını çözelti temas öncesi kontrol numunelerine göre arttırdığı görülmektedir. Basınç dayanımında görülen bu artışın nedeninin sülfat çözeltilerinde geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Çalışmada kullanılan trakitik tuf numunesine ait kayaç parçaları puzolanlarda incelik sınırlarına ASTM C618-19 (2019) göre  $45\mu$  elekten geçen numune miktarı %64.2 olacak şekilde öğütülmüştür. Trakitik tufün XRF analizine göre kızdırma kaybının %7.84 olduğu,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamının %83.5 olduğu, CaO'un %2.21 oranında, MgO'un %0.39 oranında ve diğer bileşenlerin ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  vd. ) %5.78 oranında olduğu tespit edilmiştir.

Nano silis katkılı ve katkısız tüm geopolimerlerin bekletildiği çözeltilerin pH değerlerinin;  $\text{MgSO}_4$  ve  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltilerinde 28 günde arttığı sonrasında 90, 180 ve 360 günlerde azaldığı; HCl çözeltisinde 28, 90, 180 ve 360 günlerde azaldığı görülmüştür.

%1.0 Nano silis katkılı geopolimerlerin tüm günlerde pH değerleri en büyük;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisi içerisinde 13.2-11.8;  $\text{MgSO}_4$  çözeltisi içerisinde 11.6-8.5; HCl çözeltisi içerisinde 3.5-2.6 aralığında ölçülmüştür.

Tüm kür ortamlarında geopolimerler incelendiğinde; %1.0 nano silis katkılı numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının en iyi olduğu, nano silis ilave oranı arttıkça dayanımlarda azalmalar olduğu görülmüştür.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde 360 gün bekleyen geopolimer numunelerin eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla  $\text{MgSO}_4$  ve HCl ortamında bekleyen numunelere göre daha yüksek olmuştur.

Trakitik tuf esaslı geopolimer harçlara nano silisin %1.0 oranında ilave edilmesi ile üretilen numunelerin; eğilme dayanımlarının nano silis ilavesiz numunelere göre çözelti temas öncesinde, 360 gün %5  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , %5  $\text{MgSO}_4$  ve %5 HCl ortamında bekletildiğinde sırasıyla; %9.06; %9.77; %6.58 ve %2.63 oranında arttığı; basınç dayanımlarının ise %9.70; %10.92; %7.09 ve %4.77 oranında arttığı; görülmüştür.

Günümüzde çimentolu sistemlerdeki sülfat etkisine bağlı hasarların karmaşık süreçleri nedeni ile sadece sülfatların hidrate çimento bileşenleriyle yaptıkları reaksiyonlar sonucu oluşmadığı tartışılmaktadır. Çimento kimyası üzerinde değişik etkilere sahip farklı mikro ve nano katkıların geopolimer kompozit üretiminde de kullanılması, iç ve dış sülfat etkileri üzerine araştırmaların çok yönlü olarak yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde geopolimer üretiminde kullanılan düşük CaO içeriğine sahip trakitik tüfle birlikte %1.0 nano silis kullanımının tüm kür ortamlarında mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür.

#### Yazar katkısı

##### Author contribution

Bu çalışmada başka bir yazar katkısı yoktur.

#### 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 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*

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### Kaynaklar

#### *References*

- ASTM C618-19. (2019). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1012M-18b. (2019). *Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C267. (2020). *Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Alcamand, H.A., Borges, P. H. R., Silva, F. A., & Trindade, A. C. C. (2018). The effect of matrix composition and calcium content on the sulfate durability of metakaolin and metakaolin/slag alkali-activated mortars. *Ceramics International*, 44(5), 5037-5044. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.102>.
- Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2017). Structural performance of nano-silica modified fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.111>.
- Akbulut, F. (2020). *Kırmızı çamur ve yüksek fırın cürufunun perlit esaslı geopolimer beton özelliklerine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Al Bakri, M., Kamarudin, H., BinHussain M., Nizar, I., Zarina, Y., & Rafıza, A.R. (2011). The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers. *Physics Procedia*, 22, 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.045>.
- Arslan, K.M. (2014). *Sülfat etkisine maruz kalmış mineral ve nano katkılı harçların durabilitesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2010). *Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite)*. DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bernal, S.A., Provis, J.L., Myers, R.J., San Nicolas, R.S., & Van Deventer, J.S.J. (2015). Role of carbonates in the chemical evolution of sodium carbonate-activated slag binders. *Material and Structure*, 48, 517-529. <https://doi.org/10.1617/S11527-014-0412-6>.
- Bian, Z., Jin, G., & Ji, T. (2021). Effect of combined activator of Ca(OH)<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> on workability and compressive strength of alkali-activated ferronickel slag system. *Cement and Concrete Composites*, 123, 104179. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104179>.
- Bilgin, A., Köseoğlu, M., & Özkan, G. (1990). Isparta-Gölcük yöresi kayaçlarının mineraloji, petrografi ve jeokimyası. *Doğa, Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, 14(2), 342-361.
- Bingöl, Ş. (2018). *Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması* [Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Deb, P.S., Sarker, P.K., & Barbhuiya, S. (2016). Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 72, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.017>.
- Elyamany, H.E, Abd Elmoaty, A.E.M., & Elshaboury, A.M. (2018). Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.212>.

- Ercan, T., (1985). *Orta Anadolu'daki Senozoyik Volkanizması*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Yayınları, 119-140.
- Görmüş, M., & Sagular, E.K. (2003). SDÜ 20. Yıl Jeoloji Sempozyumu. *Bildiri Özleri Kitabı*, 14-16 Mayıs, 330-351.
- Huang, Q., Zhu, X., Xiong, G., Zhang, Deng, J., Zhao, M., & Zhao, L. (2021). Will the magnesium sulfate attack of cement mortars always be inhibited by incorporating nanosilica?. *Construction and Building Materials*, 305, 124695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124695>.
- Ilıca, T. (2008). *Farklı çimentolarla üretilen betonlarda sülfat etkisi ve klorür geçirimliliği* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Jeon, D., Jun, Y., Jeong, Y., & Oh, J.E. (2015). Microstructural and strength improvements through the use of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in a cementless Ca(OH)<sub>2</sub>-activated class F fly ash system. *Cement and Concrete Research*, 67, 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.001>.
- Jin, F., & Al-Tabbaa, A. (2015). Strength and drying shrinkage of slag paste activated by sodium carbonate and reactive MgO. *Construction and Building Materials*, 81, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.082>.
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review. *Journal of the Material Science*, 42, 729-746. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
- Ke, X., Bernal, S.A., & Provis, J.L. (2016). Controlling the reaction kinetics of sodium carbonate-activated slag cements using calcined layered double hydroxides. *Cement and Concrete Research*, 81, 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.012>.
- Kibici, Y., Dinç, D., & Uçar, A. (2012). Afyonkarahisar yöresi volkanik kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Aralık, Sayı 29, 53-59.
- Koç, H. (2021). *Silis dumanı katkılı uçucu kül ile üretilen alkali aktive edilmiş harçların farklı sülfatlar altındaki fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kwasny, J., Aiken, T.A., Soutsos, M.N., McIntosh, J.A., & Cleland, D.J. (2018). Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 166, 537-553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.129>.
- Orhan, T.Y. (2022). *Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların donma çözülme ve sülfat direncine ince lastik atışının etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özcan, A. (2018). Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması [Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Raj, R.S., Arulraj, G.P., Anand, N., Kanagaraj, B., Lubloy, E., & Naser, M.Z. (2023). Nanomaterials in geopolymer composites: A review. *Developments in the Built Environment*, 13, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100114>.
- Ren, D., Yan, C., Duan, P., Zhang, Z., Li, L., & Yan, Z. (2017). Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134, 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>.
- Santhanam, M., Cohen, M.D.V., & Olek, J. (2001). Sulfate Attack Research-Whither Now?. *Cement and Concrete Research*, 31(6), 845-851. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00510-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00510-5).
- Sert, M. (2010). *Isparta ve Nevşehir yöresi volkanik kökenli taşların fiziko mekanik özelliklerinin belirlenerek kullanım alanlarının irdelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of engineering science and technology review*, 3(1), 36-40. <https://doi.org/10.25103/JESTR.031.07>.
- TS EN 196-1. (2009). *Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini*. TSE, Ankara.

- Van Aardt, J.H.P., & Visser S. (1975). Thaumasite formation: a cause of deterioration of portland cement and related substances, in the presence of sulfates. *Cement and Concrete Research*, 5(3), 225-232. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(75\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(75)90004-6).
- Walling, S.A.; Bernal, S.A.; Gardner, L.J., Kinoshita, H., & Provis, J.L. (2018). Blast furnace slag-Mg(OH)<sub>2</sub> cements activated by sodium carbonate. *RSC Advances*, 8, 23101-23118. <https://doi.org/10.1039/c8ra03717e>.
- Wang, Y.S, Tae, S.H., Lin, R.S., & Wang, X.Y. (2022). Effects of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> on engineering properties of cement-limestone powder-slag ternary blends. *Journal of Building Engineering*, 57, 104937. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104937>.
- Yang, T., Zuhua, Z., Zhu, H., Zhang, W., Gao, Y., Zhang, X., & Wu, Q. (2019). Effects of calcined dolomite addition on reaction kinetics of one-part sodium carbonate-activated slag cements. *Construction and Building Materials*, 211, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.245>.
- Yazıcı, N. (2022), Yüksek sıcaklıktan sonra asit, sülfat ve tuz etkisine maruz kalan geopolimer betonların özelliklerinin araştırılması [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

## Investigation of the inhibition effect of pitaya (*hylocereus guatemalensis*) bark extracts on some metabolic enzymes

*Pitaya (hylocereus guatemalensis) kabuğu ekstraktlarının bazı metabolik enzimler üzerine olan inhibisyon etkisinin araştırılması*

Rüya SAĞLAMTAŞ\*<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Ağrı İbrahim Çeçen University, Central Research and Application Laboratory, 04100, Ağrı,

<sup>2</sup>Agri Ibrahim Cecen University, Vocational School of Health Services, Medical Services and Techniques Department, 04100, Ağrı

• Received: 25.02.2023

• Accepted: 18.05.2023

### Abstract

Pitaya is a tropical and subtropical plant with various uses. In this study, the maceration method obtained acetone, ethanol, ethyl acetate, dichloromethane, and methanol from the bark parts of pitaya fruit. The *in vitro* effects of fruit peel extracts on the critical metabolic enzyme activities of acetylcholinesterase (AChE), butyrylcholinesterase (BChE), human carbonic anhydrase (hCA I and hCA II), and  $\alpha$ -glycosidase, were investigated. Pitaya bark ethanol (PBE) ( $IC_{50}$ : 20.16 $\pm$ 0.22  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9694) for AChE and Pitaya bark acetone (PBA) ( $IC_{50}$ :42.10 $\pm$ 1.045  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9807) extract for BChE showed the most potent inhibition effect. Pitaya bark ethyl acetate (PBEA) extract showed the most potent inhibitory effect for hCA I and hCA II ( $IC_{50}$ :53.51 $\pm$ 2.22  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9562 and  $IC_{50}$ :26.29 $\pm$ 0.34  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9966), respectively. In addition, PBEA showed the most potent inhibition effect on  $\alpha$ -glycosidase enzyme ( $IC_{50}$ : 24.54 $\pm$ 1.80  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9199). According to the results, the extracts can be effectively used treatment of diseases such as glaucoma, epilepsy, type 2 Diabetes mellitus (T2DM), and Alzheimer's disease (AD).

**Keywords:** Enzyme, Enzyme Inhibition, Pitaya.

### Öz

Pitaya, çeşitli kullanımları olan tropikal ve subtropikal bir bitkidir. Çalışmada maserasyon yöntemi ile pitaya meyvesinin kabuk kısımlarından aseton, etanol, etil asetat, diklorometan ve metanol ekstraktları elde edilmiştir. Meyve kabuğu ekstraktlarının kritik metabolik enzimler olan asetilkolinesteraz (AChE), butirilcholinesteraz (BChE), insan karbonik anhidraz CA I- II ve  $\alpha$ -glikozidaz enzim aktiviteleri üzerine *in vitro* etkileri araştırıldı. AChE için Pitaya kabuğu etanol (PBE) ( $IC_{50}$ : 20.16 $\pm$ 0.22  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9694) ve BChE için Pitaya kabuğu aseton (PBA) ( $IC_{50}$ :42.10 $\pm$ 1.045  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9807) ekstraktı en güçlü inhibisyon etkisini gösterdi. Pitaya kabuğu etil asetat (PBEA) ekstresi hCA-I ve II için en kuvvetli inhibitör etkiyi gösterdi (sırasıyla  $IC_{50}$ :53.51 $\pm$ 2.22,  $r^2$ :0.9562  $\mu$ g/mL,  $IC_{50}$ :26.29 $\pm$ 0.34  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9966). Ek olarak PBEA,  $\alpha$ -Glikozidaz enzimi üzerinde en güçlü inhibisyon etkisini göstermiştir ( $IC_{50}$ :24.54 $\pm$ 1.80  $\mu$ g/mL,  $r^2$ :0.9199). Sonuçlara göre ekstraktlar glaukom, epilepsi tip 2 Diabetes mellitus (T2DM) ve Alzheimer hastalığı (AH) gibi hastalıkların tedavisinde etkin bir şekilde kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Enzim, Enzim İnhibisyonu, Pitaya

\*Rüya SAĞLAMTAŞ; ruyakaya17@gmail.com, rsaglamtas@agri.edu.tr

## 1. Introduction

The dragon fruit (Cactaceae) belongs to the genus *Hylocereus*, commonly referred to as Pitaya (Hua et al., 2018). More than 20 tropical and subtropical countries grow it commercially, including Israel, Malaysia, Mexico, Colombia, Philippines, and Taiwan (Wong & Siow, 2015). This fruit contains a high quantity of vitamin C and B group vitamins, as well as crude fiber, protein, carbohydrates, and minerals (Choo & Yong, 2011). Additionally, A red dragon fruit is rich in essential unsaturated fatty acids, linolenic and linoleic acids, and is widely used in cosmetics and therapeutics fields (Al-Mekhlafi et al., 2021). Several studies have demonstrated that phytochemicals obtained from the pulp and peel of red dragon fruit are anti-inflammatory (Kaur et al., 2018), antispasmodic, antimicrobial, diabetes, and anti-cancer (Joshi & Prabhakar, 2020). This food source has been studied extensively due to its rich content. There are several forms in which this fruit may be consumed, such as jam, jelly, fruit juice, and bread (Jalgaonkar et al., 2022). Pitaya fruit peelings account for approximately one-third of the weight of the fruit, which is discarded by fruit and juice businesses. A by-product of pitaya fruit production, the pitaya rind contains abundant bioactive substances, which have been reported to provide dietary fiber and pectin to the food industry (Madane et al., 2020; Zaid et al., 2020). Pitaya peels contain bioactive compounds that can extend the shelf life of foods and food products by containing phytochemicals with different bioactivities, such as betacyanins (Jiang et al., 2021). Pitaya peels benefit from their wealth of content, which allows them to be more widely used.

Carbonic anhydrase enzyme (CA, E.C.4.2.1.1) contains zinc ion ( $Zn^{2+}$ ) metal inside its structure. In addition, a wide variety of organisms, plant kingdoms, and higher vertebrates contain this enzyme (Hoff et al., 2020; Sever, Türkeş, et al., 2021; Yaşar et al., 2021). The central role of CAs is to catalyze the mutual and reversible conversion reaction between carbon dioxide ( $CO_2$ ) and water ( $H_2O$ ) and proton ( $H^+$ ) and bicarbonate ions ( $HCO_3^-$ ) (Akıncioğlu et al., 2021; Burmaoglu et al., 2022; Gul et al., 2016). The  $CO_2$  hydration reaction, on the other hand, is of fundamental importance in various physiological and biochemical reactions based on acid-base balance, ion transport, and gas Exchange (Nar et al., 2013). CAs consist of eight different subdivisions, which include the  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -,  $\zeta$ -,  $\eta$ -,  $\theta$ -, and t-CA families. Several diseases are associated with alterations in hCA activities, including epilepsy, glaucoma, obesity, osteoporosis, ulcer, and cancer (Öztaşkın et al., 2019).

Alzheimer's disease (AD) is mainly related to changes and deterioration of the memory and behavior of people in their middle and older years. Clinically, this disorder is characterized by progressive degeneration of brain tissue as a result of a deficiency in acetylcholine (ACh) (Atmaca et al., 2018; Burmaoglu et al., 2021). Acetate and choline are two molecules converted by the enzyme AChE, a critical molecule in the central and peripheral nervous system (Aksu et al., 2018). The nonspecific cholinesterase BChE is found in vertebrate serum, blood plasma, pancreas, heart, liver, and central nervous system. BChE can hydrolyze different esters in addition to choline esters and is also known as pseudo-ChE (Anil et al., 2022; Biçer et al., 2019; Demir et al., 2018).

A chronic disease, diabetes mellitus (DM), affects approximately 4% of the world's population. T2DM, one of the types of diabetes, is becoming more common both in developed and developing countries (Sever, Altıntop, et al., 2021; Sever et al., 2020).  $\alpha$ -Glucosidase (E.C.3.2.1.20) is one of the enzymes that can hydrolyze polysaccharides and oligosaccharides up to glucose and fructose units in small intestinal cells (Gulçin et al., 2018; Taslimi et al., 2018). The use of inhibitors of the carbohydrate glucosidase enzyme is proven to be essential for controlling hyperglycemia and T2DM (Gondolova et al., 2018). In order to minimize the quantity of glucose in T2DM,  $\alpha$ -glucosidase inhibitors ( $\alpha$ -GIs) effectively compete with oligosaccharides for binding to the enzyme's active site (Demir et al., 2019, 2020).

The present study aims to investigate the inhibitory effects of pitaya peels, which are considered out of consumption as waste and have very little use, on AChE, BChE, hCA I, hCA II, and  $\alpha$ -glucosidase, which are associated with common and global health diseases.

## 2. Material and method

### 2.1 Preparation of extracts

Pitaya fruit was purchased from local vendors from the province of Antalya in the Mediterranean region of Turkey. The fruit's skin was dried and powdered separately and stored in the refrigerator until study time. Extracts were prepared using 2.5 g of dried red dragon fruit peel and 50 mL of solvent. Amounts of extract

obtained for methanol, ethyl acetate, ethanol, acetone, and dichloromethane extracts were determined at 200 mg.

## 2.2 Enzymes inhibition assay

### 2.2.1 Cholinesterase activity method

A partial modification of the method of Ellman et al. was used for the purpose of determining the activity of the AChE and BChE enzymes (Ellman et al., 1961; Topal & Gulcin, 2022).

### 2.2.2 hCA activity determination method

Esterase activities of hCA I and hCA II enzymes were determined based on the method developed by Verpoorte et al. (Verpoorte et al., 1967). A method based on the maximum absorbance of the *p*-nitrophenol molecule is used, which is formed as a result of the enzyme decomposition of the *p*-nitrophenyl acetate molecule at 340 nm (Biçer et al., 2020).

### 2.2.3 The $\alpha$ -glycosidase activity determination method

The activity of the  $\alpha$ -glycosidase enzyme was measured based on the method described by Tao et al. (Tao et al., 2013).

## 2.3 Kinetic studies

IC<sub>50</sub> values were calculated by examining the extracts' effects on AChE, BChE, hCA I and hCA II, and  $\alpha$ -glycosidase enzyme activities. For this purpose, enzyme activities at 5 different concentrations were measured spectrophotometrically for all extracts. The activity (%)-[extract] graph was drawn using the obtained data. IC<sub>50</sub> values were calculated using the graph (Biçer et al., 2019; Kazancı et al., 2021).

## 3. Results and discussion

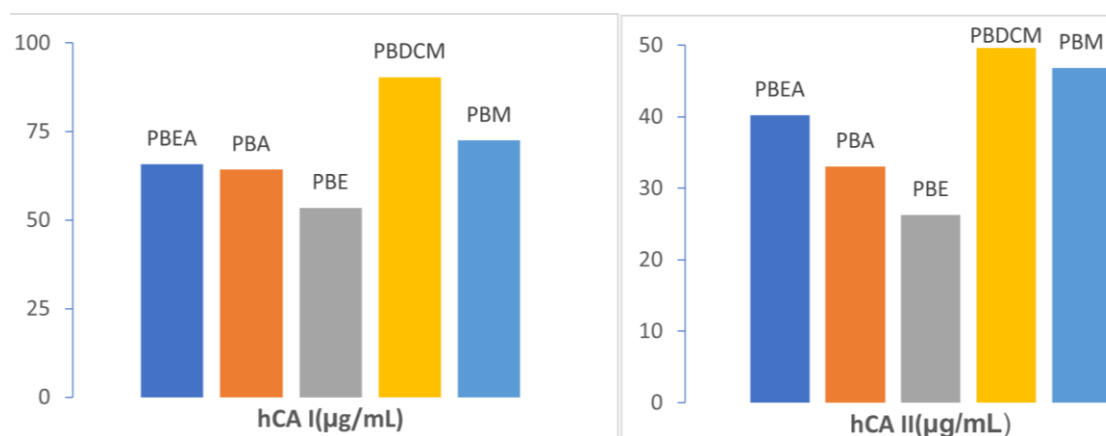
The enzyme inhibition effects of the extracts obtained from the peel of the Pitaya fruitc peels against AChE, BChE, hCA I -II, and  $\alpha$ -glycosidase were determined. Pharmaceutical, food, and cosmetic industries have studied enzyme inhibition as a therapeutic medium extensively. Furthermore, enzyme inhibitors are currently being used clinically to treat glaucoma, AD, DM, and obesity (Ökten et al., 2019). Some synthetic inhibitors have adverse effects, including hepatotoxicity and gastrointestinal disturbances. As a result, new and natural inhibitors that are consumed daily and have no side effects are becoming increasingly popular (Soto-Hernandez et al., 2017).

### 3.1 hCA I and hCA II inhibition results

The CA family members are fascinating due to their monomeric structure and the absence of disulfide bonds in polypeptide chains (Göksu et al., 2014). It was determined that PBE (IC<sub>50</sub>: 53.51±2.22 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9562) was the extract with the most potent inhibition effect on hCA-I activity among the prepared extracts. The IC<sub>50</sub> value was PBA (IC<sub>50</sub>: 64.26±3.01 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9448), PBEA (IC<sub>50</sub>: 65.8±0.95 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9349), and PM (IC<sub>50</sub>: 72.5±2.67 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9647), respectively, and PBDCM (IC<sub>50</sub>: 90.43±2.43 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9866) had the least inhibitory effect. Moreover, PBE (IC<sub>50</sub>: 26.29±0.34 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9966) was the extract with the strongest inhibitory effect on hCA-II activity. The IC<sub>50</sub> value was PBA (IC<sub>50</sub>: 33.06±0.33 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9448), PBEA (IC<sub>50</sub>:40.23±1.09µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9455), and PBM (IC<sub>50</sub>: 46.85±2.1µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9887), respectively, and PBDCM (IC<sub>50</sub>: 49.63±0.74 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9809 µg/mL) had the least inhibitory effect (Table 1, Figure1). In light of various studies conducted on CA inhibitors, these inhibitors have been found to be effective in treating diseases such as glaucoma and epilepsy (Taşkın et al., 2022), and identifying new natural inhibitors is vital. A study suggested that the ethyl acetate extract of the *L. acutangula* plant showed an inhibitory effect on CA, which was proportional to the total amount of flavonoid and phenolic substances contained in the extracts (Chanda et al., 2019).

**Table 1.** Enzyme inhibition results of pitaya bark extracts against hCA I and hCA II enzyme

	IC <sub>50</sub> (µg/mL)			
	hCA I	r <sup>2</sup>	hCA II	r <sup>2</sup>
PBEA	65.8±0.94	0.9349	40.23±1.09	0.9455
PBA	64.26±3.01	0.9448	33.06±0.32	0.9544
PBE	53.51±2.21	0.9562	26.28±0.34	0.9966
PBDCM	90.43±2.42	0.9866	49.63±0.74	0.9809
PBM	72.50±2.67	0.9646	46.85±1.40	0.9887

**Figure 1.** IC<sub>50</sub> values for hCA I and hCA II of pitaya bark extracts

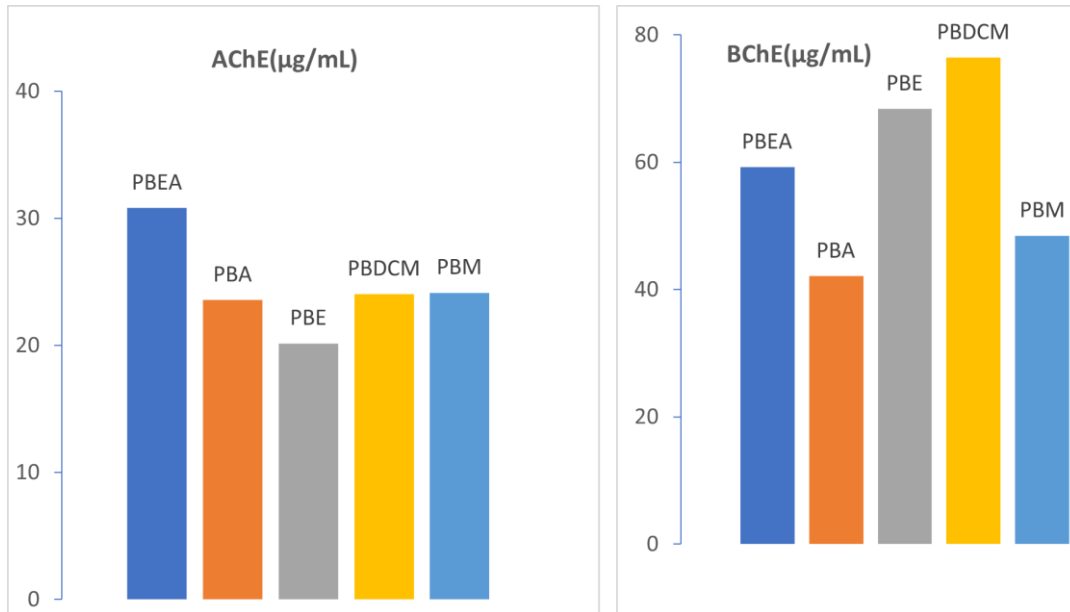
### 3.2 Cholinesterase inhibition results

Several clinical trials have been carried out using AChEIs (AChE inhibitors) generated from natural products. AChEIs identified as phenolic compounds are important for treating AD and serve as precursor molecules (Gülçin et al., 2016; Gülçin et al., 2019). According to Ellman's procedure, the extract's AChE and BChE inhibitory properties were determined (Ellman et al., 1961). It was determined that PBE (IC<sub>50</sub>: 20.16±0.22 µg/mL, r<sup>2</sup>:0.9694) was the extract having the strongest inhibitory effect on AChE activity among the prepared extracts. The IC<sub>50</sub> value was PBA (IC<sub>50</sub>: 23.57±0.71 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9611), PBDCM (IC<sub>50</sub>: 24.04±0.29 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9991), and PM (IC<sub>50</sub>: 24.15±0.36 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9827), respectively, and PBEA (IC<sub>50</sub>: 30.81±0.71 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9611) had the least inhibitory effect. Moreover, PBA (IC<sub>50</sub>: 42.10±1.04 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9807) was the extract with the strongest inhibitory effect on BChE activity. The IC<sub>50</sub> value was PBM (IC<sub>50</sub>: 48.47±0.58 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9848), PBEA (IC<sub>50</sub>: 59.23±0.51 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9721), and PBE (IC<sub>50</sub>: 68.29±0.78 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9966), respectively and PBDCM (IC<sub>50</sub>: 76.44±0.48 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9723) had the least inhibitory effect (Table 2, Figure 2). Flavanones, flavonols, and derivatives of hydroxycinnamic acid are the major phenolic compounds found in the red dragon fruit and its peel. In addition, the presence of phenolic acids such as syringic acid, p-coumaric acid, gallic acid, and caffeic acid was characterized in white and red dragon fruits (Castro-Enríquez et al., 2020; Chen et al., 2021; García-Cruz et al., 2017; Zain et al., 2019). Therefore, in this study, it is thought that extracts containing important phytochemicals have an inhibitory effect on cholinesterase enzymes and that the peels of pitaya fruits may be essential in eliminating cholinergic deficiency in treating neurodegenerative disorders such as AD.



**Table 2.** Enzyme inhibition results of of pitaya fruit peel extracts against AChE and BChE enzymes

	IC <sub>50</sub> (µg/mL)			
	AChE	r <sup>2</sup>	BChE	r <sup>2</sup>
<b>PBEA</b>	30.81±0.72	0.9611	59.23±0.51	0.9721
<b>PBA</b>	23.57±0.32	0.9648	42.10±1.04	0.9807
<b>PBE</b>	20.16±0.22	0.9694	68.39±0.78	0.9968
<b>PBDCM</b>	24.04±0.29	0.9991	76.44±0.48	0.9723
<b>PBM</b>	24.15±0.36	0.9827	48.47±0.58	0.9848

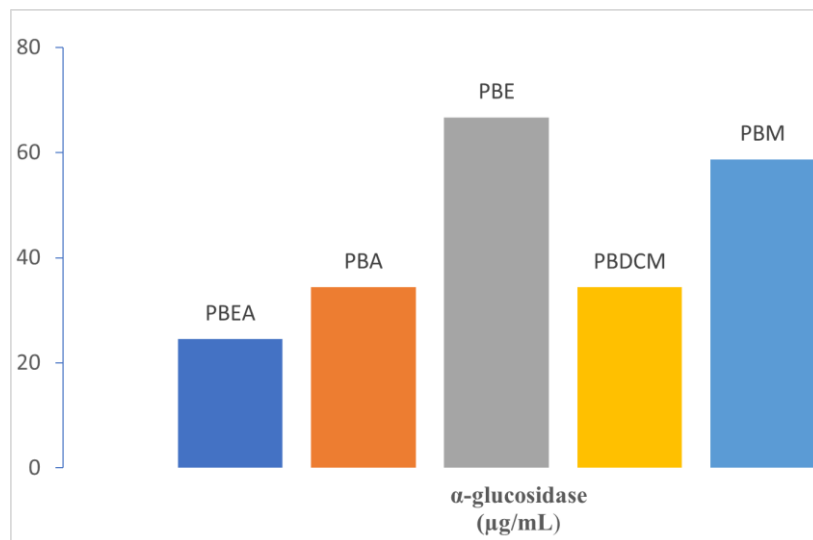
**Figure 2.** IC<sub>50</sub> values for AChE and BChE of pitaya bark extracts

### 3.3 $\alpha$ -Glycosidase inhibition studies

DM is a serious health problem that has a significant impact on the quality of life of patients across the globe. In addition to being a metabolic and chronic disease, it is also accompanied by cardiovascular, neuropathy, and retinopathy symptoms (Kocyigit et al., 2018; Takim et al., 2021). It was determined that PBEA (IC<sub>50</sub>: 24.54±1.80 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9199) was the extract with the most potent inhibition effect on  $\alpha$ -glucosidase activity among the prepared extracts. The IC<sub>50</sub> value was PBDCM (IC<sub>50</sub>: 34.39±1.07 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9236), PBA (IC<sub>50</sub>: 34.42±1.73 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9442), and PBM (IC<sub>50</sub>: 58.74±1.77 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9362) respectively, and PBE (IC<sub>50</sub>: 66.72±2.98 µg/mL, r<sup>2</sup>: 0.9305) had the least inhibitory effect (Table 3, Figure 3). It has been stated that  $\alpha$ -glycosidase inhibitors, one of the target enzymes in the treatment of T2DM, may be a preferred treatment method compared to the side effects of traditional treatments (Ranilla et al., 2010). Gülçin and his friends in the study of the phenolic compounds of the garden of the gardenin A (238,06 nm), usnic acid (281,13 nm), phloretin (295.27 nm), vulpinic acid (626,58 nm)  $\alpha$ -glycosidase enzyme. They have been reported to have better IC<sub>50</sub> values than the control with control (Gülçin et al., 2018). The recent study showed that the hot water extract of Cola Nitida, one of the leaf-free plants specific to West Africa, has inhibited the  $\alpha$ -glucosidase enzyme and has promising in vivo antidiabetic properties in T2DM rats (Erukainure et al., 2019). Consequently, it is possible to propose that including products derived from extracts of Pitaya shells in the diet may be beneficial in preventing and treating T2DM according to the results of the study.

**Table 3.** Enzyme inhibition result of pitaya fruit peel extracts against the  $\alpha$ -glycosidase enzyme

IC <sub>50</sub> ( $\mu$ g/mL)		
	$\alpha$ - glycosidase	r <sup>2</sup>
<b>PBEA</b>	24.54 $\pm$ 1.80	0.9199
<b>PBA</b>	34.42 $\pm$ 1.73	0.9442
<b>PBE</b>	66.72 $\pm$ 2.98	0.9305
<b>PBDCM</b>	34.39 $\pm$ 1.07	0.9236
<b>PBM</b>	58.74 $\pm$ 1.77	0.9362

**Figure 3.** IC<sub>50</sub> values for  $\alpha$ - glycosidase enzyme of pitaya bark extracts

As a result, our study, the in vitro effects of ethanol, ethyl acetate, methanol, dichloromethane, and acetone extracts prepared from the peels of pitaya fruit, known as a waste product, on AChE, BChE, hCA-I and hCA-II, and  $\alpha$ -glucosidase activities were investigated. The results revealed the inhibition effects of the extracts on the enzymes. Therefore, Pitaya peels may be effective in treating diseases such as AD, glaucoma, epilepsy, and T2DM when included in daily consumption. In addition, according to the results obtained, it is thought that pitaya shells, which are used as waste and whose consumption is insufficient compared to fruit, can contribute quite a lot if they are included in daily consumption with this study.

#### 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

- Akincioğlu, A., Göksu, S., Naderi, A., Akincioğlu, H., Kılınç, N., & Gülçin, İ. (2021). Cholinesterases, carbonic anhydrase inhibitory properties and in silico studies of novel substituted benzylamines derived from dihydrochalcones. *Computational Biology and Chemistry*, 94, e107565. <https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2021.107565>
- Aksu, K., Akincioğlu, H., Akincioğlu, A., Göksu, S., Tümer, F., & Gülçin, İ. (2018). Synthesis of novel sulfamides incorporating phenethylamines and determination of their inhibition profiles against some metabolic enzymes. *Archiv Der Pharmazie*, 351(9), e1800150. <https://doi.org/10.1002/ardp.201800150>
- Al-Mekhlafi, N. A., Mediani, A., Ismail, N. H., Abas, F., Dymerski, T., Lubinska-Szczygeł, M., Vearasilp, S., & Gorinstein, S. (2021). Metabolomic and antioxidant properties of different varieties and origins of dragon fruit. *Microchemical Journal*, 160, e105687. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105687>
- Anil, D. A., Aydin, B. O., Demir, Y., & Turkmenoglu, B. (2022). Design, synthesis, biological evaluation and molecular docking studies of novel 1H-1,2,3-triazole derivatives as potent inhibitors of carbonic anhydrase, acetylcholinesterase and aldose reductase. *Journal of Molecular Structure*, 1257, e132613. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132613>
- Atmaca, U., Yıldırım, A., Taslimi, P., Çelik, S. T., Gülçin, İ., Supuran, C. T., & Çelik, M. (2018). Intermolecular amination of allylic and benzylic alcohols leads to effective inhibitions of acetylcholinesterase enzyme and carbonic anhydrase I and II isoenzymes. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 32(8), e22173. <https://doi.org/10.1002/jbt.22173>
- Biçer, A., Kaya, R., Anıl, B., Turgut Cin, G., Gülçin, İ., & Gültekin, M. S. (2019). Synthesis of novel bis-sulfone derivatives and their inhibition properties on some metabolic enzymes including carbonic anhydrase, acetylcholinesterase, and butyrylcholinesterase. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 33(11), e22401. <https://doi.org/10.1002/jbt.22401>
- Biçer, A., Kaya, R., Yakalı, G., Gültekin, M. S., Cin, G. T., & Gülçin, İ. (2020). Synthesis of novel  $\beta$ -amino carbonyl derivatives and their inhibition effects on some metabolic enzymes. *Journal of Molecular Structure*, 1204, e127453. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127453>
- Burmaoglu, S., Kazancioglu, E. A., Kazancioglu, M. Z., Sağlamtaş, R., Yalcin, G., Gulcin, I., & Algul, O. (2022). Synthesis, molecular docking and some metabolic enzyme inhibition properties of biphenyl-substituted chalcone derivatives. *Journal of Molecular Structure*, 1254, e132358. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132358>
- Burmaoglu, S., Yilmaz, A. O., Polat, M. F., Kaya, R., Gulcin, İ., & Algul, O. (2021). Synthesis of novel tris-chalcones and determination of their inhibition profiles against some metabolic enzymes. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 127(2), 153–161. <https://doi.org/10.1080/13813455.2019.1623265>
- Castro-Enríquez, D. D., Montañó-Leyva, B., del Toro-Sánchez, C. L., Juárez-Onofre, J. E., Carvajal-Millán, E., López-Ahumada, G. A., Barreras-Urbina, C. G., Tapia-Hernández, J. A., & Rodríguez-Félix, F. (2020). Effect of ultrafiltration of pitaya extract (*Stenocereus thurberi*) on its phytochemical content, antioxidant capacity, and UPLC-DAD-MS profile. *Molecules*, 25(2), e281. <https://doi.org/10.3390/molecules25020281>
- Chanda, J., Mukherjee, P. K., Biswas, R., Biswas, S., Tiwari, A. K., & Pargaonkar, A. (2019). UPLC-QTOF-MS analysis of a carbonic anhydrase-inhibiting extract and fractions of luffa acutangula (L.) roxb (ridge gourd). *Phytochemical Analysis*, 30(2), 148-155. <https://doi.org/10.1002/pca.2800>
- Chen, Z., Zhong, B., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2021). Identification of phenolic compounds in Australian grown dragon fruits by LC-ESI-QTOF-MS/MS and determination of their antioxidant potential. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(6), e103151. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103151>
- Choo, W. S., & Yong, W. K. (2011). Antioxidant properties of two species of hylocereus fruits. *Advances in Applied Science Research*, 2(3), 418-425. <https://www.semanticscholar.org/paper/Antioxidant-properties-of-two-species-of-Hylocereus-Choo-Yong/2dc82ad38fddde0ca55d8799be4facb5bf07991>
- D'Ambrosio, K., Carradori, S., Cesa, S., Angeli, A., Monti, S. M., Supuran, C. T., & de Simone, G. (2020). Catechols: a new class of carbonic anhydrase inhibitors. *Chemical Communications*, 56(85), 13033–13036. <https://doi.org/10.1039/D0CC05172A>

- Demir, Y., Taslimi, P., Ozaslan, M. S., Oztaskin, N., Çetinkaya, Y., Gulçin, İ., Beydemir, Ş., & Goksu, S. (2018). Antidiabetic potential: in vitro inhibition effects of bromophenol and diarylmethanones derivatives on metabolic enzymes. *Archiv Der Pharmazie*, 351(12), e1800263. <https://doi.org/10.1002/ardp.201800263>
- Demir, Y., Durmaz, L., Taslimi, P., & Gulçin, İ. (2019). Antidiabetic properties of dietary phenolic compounds: inhibition effects on  $\alpha$ -amylase, aldose reductase, and  $\alpha$ -glycosidase. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 66(5), 781-786. <https://doi.org/10.1002/bab.1781>
- Demir, Y., Duran, H. E., Durmaz, L., Taslimi, P., Beydemir, Ş., & Gulçin, İ. (2020). The influence of some nonsteroidal anti-inflammatory drugs on metabolic enzymes of aldose reductase, sorbitol dehydrogenase, and  $\alpha$ -glycosidase: a perspective for metabolic disorders. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 190(2), 437-447. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03099-7>
- Ellman, G. L., Courtney, K. D., Andres, V., & Featherstone, R. M. (1961). A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochemical Pharmacology*, 7(2), 91-95. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(61\)90145-9](https://doi.org/10.1016/0006-2952(61)90145-9)
- Erukainure, O. L., Sanni, O., Ijomone, O. M., Ibeji, C. U., Chukwuma, C. I., & Islam, M. S. (2019). The antidiabetic properties of the hot water extract of kola nut (*cola nitida* (vent.) schott & endl.) in type 2 diabetic rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 242, e112033. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112033>
- García-Cruz, L., Dueñas, M., Santos-Buelgas, C., Valle-Guadarrama, S., & Salinas-Moreno, Y. (2017). Betalains and phenolic compounds profiling and antioxidant capacity of pitaya (*stenocereus* spp.) fruit from two species (*S. Prinosus* and *S. stellatus*). *Food Chemistry*, 234, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.174>
- Göksu, S., Naderi, A., Akbaba, Y., Kalin, P., Akincioglu, A., Gulçin, I., Durdagi, S., & Salmas, R. E. (2014). Carbonic anhydrase inhibitory properties of novel benzylsulfamides using molecular modeling and experimental studies. *Bioorganic Chemistry*, 56, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2014.07.009>
- Gondolova, G., Taslimi, P., Medjidov, A., Farzaliyev, V., Sujayev, A., Huseynova, M., Şahin, O., Yalçın, B., Turkan, F., & Gulçin, İ. (2018). Synthesis, crystal structure and biological evaluation of spectroscopic characterization of Ni(II) and Co(II) complexes with N-salicyloil-N'-maleoil-hydrazine as anticholinergic and antidiabetic agents. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 32(9), e22197. <https://doi.org/10.1002/jbt.22197>
- Gul, H. I., Tugrak, M., Sakagami, H., Taslimi, P., Gulcin, I., & Supuran, C. T. (2016). Synthesis and bioactivity studies on new 4-(3-(4-substitutedphenyl)-3a,4-dihydro-3H-indeno[1,2-c]pyrazol-2-yl) benzenesulfonamides. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 31(6), 1619-1624. <https://doi.org/10.3109/14756366.2016.1160077>
- Gulcin, İ., Scozzafava, A., Supuran, C. T., Koksall, Z., Turkan, F., Çetinkaya, S., Bingöl, Z., Huyut, Z., & Alwasel, S. H. (2016). Rosmarinic acid inhibits some metabolic enzymes including glutathione s-transferase, lactoperoxidase, acetylcholinesterase, butyrylcholinesterase and carbonic anhydrase isoenzymes. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 31(6), 698-702. <https://doi.org/10.3109/14756366.2015.1135914>
- Gulcin, İ., Taslimi, P., Aygün, A., Sadeghian, N., Bastem, E., Kufrevioglu, O. I., Turkan, F., & Şen, F. (2018). Antidiabetic and antiparasitic potentials: Inhibition effects of some natural antioxidant compounds on  $\alpha$ -glycosidase,  $\alpha$ -amylase and human glutathione S-transferase enzymes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 741-746. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.001>
- Gulcin, I., Kaya, R., Goren, A. C., Akincioglu, H., Topal, M., Bingol, Z., Cetin Çakmak, K., Ozturk Sarikaya, S. B., Durmaz, L., & Alwasel, S. (2019). Anticholinergic, antidiabetic and antioxidant activities of cinnamon (*cinnamomum verum*) bark extracts: polyphenol contents analysis by LC-MS/MS. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1511-1526. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1656232>
- Hoff, E., Zou, D., Schiza, S., Demir, Y., Grote, L., Bouloukaki, I., Beydemir, Ş., Eskandari, D., Stenlöf, K., & Hedner, J. (2020). Carbonic anhydrase, obstructive sleep apnea and hypertension: effects of intervention. *Journal of Sleep Research*, 29(2), e12956. <https://doi.org/10.1111/jsr.12956>
- Hua, Q., Chen, C., Tel Zur, N., Wang, H., Wu, J., Chen, J., Zhang, Z., Zhao, J., Hu, G., & Qin, Y. (2018). Metabolomic characterization of pitaya fruit from three red-skinned cultivars with different pulp colors. *Plant Physiology and Biochemistry*, 126, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.027>

- Jalgaonkar, K., Mahawar, M. K., Bibwe, B., & Kannaujia, P. (2022). Postharvest profile, processing and waste utilization of dragon fruit (*Hylocereus* Spp.): A Review. *In Food Reviews International*, 38(4), 1-27. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1742152>
- Jiang, H., Zhang, W., Li, X., Shu, C., Jiang, W., & Cao, J. (2021). Nutrition, phytochemical profile, bioactivities and applications in food industry of pitaya (*Hylocereus* spp.) peels: a comprehensive review. *In Trends in Food Science and Technology*, 116, 199-217. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.040>
- Joshi, M., & Prabhakar, B. (2020). Phytoconstituents and pharmaco-therapeutic benefits of pitaya: a wonder fruit. *In Journal of Food Biochemistry*, 44(7), e13260. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13260>
- Kazancı, A., Gök, Y., Kaya, R., Aktaş, A., Taslimi, P., & Gülçin, İ. (2021). Synthesis, characterization and bioactivities of dative donor ligand N-heterocyclic carbene (NHC) precursors and their Ag(I)NHC coordination compounds. *Polyhedron*, 193, 114866. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114866>
- Kocuyigit, U. M., Budak, Y., Gürdere, M. B., Ertürk, F., Yencilek, B., Taslimi, P., Gülçin, İ., & Ceylan, M. (2018). Synthesis of chalcone-imide derivatives and investigation of their anticancer and antimicrobial activities, carbonic anhydrase and acetylcholinesterase enzymes inhibition profiles. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 124(1), 61-68. <https://doi.org/10.1080/13813455.2017.1360914>
- Madane, P., Das, A. K., Nanda, P. K., Bandyopadhyay, S., Jagtap, P., Shewalkar, A., & Maity, B. (2020). Dragon fruit (*Hylocereus undatus*) peel as antioxidant dietary fibre on quality and lipid oxidation of chicken nuggets. *Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 1449-1461. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04180-z>
- Nar, M., Çetinkaya, Y., Gülçin, İ., & Menzek, A. (2013). (3,4-Dihydroxyphenyl)(2,3,4-trihydroxyphenyl)methanone and its derivatives as carbonic anhydrase isoenzymes inhibitors. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 28(2), 402-406. <https://doi.org/10.3109/14756366.2012.670807>
- Ökten, S., Ekiz, M., Koçuyigit, Ü. M., Tutar, A., Çelik, İ., Akkurt, M., Gökalp, F., Taslimi, P., & Gülçin, İ. (2019). Synthesis, characterization, crystal structures, theoretical calculations and biological evaluations of novel substituted tacrine derivatives as cholinesterase and carbonic anhydrase enzymes inhibitors. *Journal of Molecular Structure*, e1175. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.08.063>
- Öztaşkın, N., Kaya, R., Maraş, A., Şahin, E., Gülçin, İ., & Göksu, S. (2019). Synthesis and characterization of novel bromophenols: Determination of their anticholinergic, antidiabetic and antioxidant activities. *Bioorganic Chemistry*, 87, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2019.03.010>
- Ranilla, L. G., Kwon, Y. I., Apostolidis, E., & Shetty, K. (2010). Phenolic compounds, antioxidant activity and in vitro inhibitory potential against key enzymes relevant for hyperglycemia and hypertension of commonly used medicinal plants, herbs and spices in latin America. *Bioresource Technology*, 101(12), 4676-4689 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.093>
- Sever, B., Altıntop, M. D., Demir, Y., Akalın Çiftçi, G., Beydemir, Ş., & Özdemir, A. (2020). Design, synthesis, in vitro and in silico investigation of aldose reductase inhibitory effects of new thiazole-based compounds. *Bioorganic Chemistry*, 102, 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2020.104110>
- Sever, B., Altıntop, M. D., Demir, Y., Türkeş, C., Özbaş, K., Çiftçi, G. A., Beydemir, S., & Özdemir, A. (2021). A new series of 2,4-thiazolidinediones endowed with potent aldose reductase inhibitory activity. *Open Chemistry*, 19(1), 347-357. <https://doi.org/10.1515/chem-2021-0032>
- Sever, B., Türkeş, C., Altıntop, M. D., Demir, Y., Akalın Çiftçi, G., & Beydemir, Ş. (2021). Novel metabolic enzyme inhibitors designed through the molecular hybridization of thiazole and pyrazoline scaffolds. *Archiv Der Pharmazie*, 354(12), e2100294. <https://doi.org/10.1002/ardp.202100294>
- Soto-Hernandez, M., Palma-Tenango & M., Garcia-Mateos, M., (Eds.). (2017). *In Phenolic Compounds- Biological Activity*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/66844>
- Takim, K., Yigin, A., Koyuncu, I., Kaya, R., & Gülçin, İ. (2021). Anticancer, anticholinesterase and antidiabetic activities of tunceli garlic (*Allium tuncelianum*): determining its phytochemical content by LC-MS/MS analysis. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(4), 3323-3335. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00912-y>

- Tao, Y., Zhang, Y., Cheng, Y., & Wang, Y. (2013). Rapid screening and identification of  $\alpha$ -glucosidase inhibitors from mulberry leaves using enzyme-immobilized magnetic beads coupled with HPLC/MS and NMR. *Biomedical Chromatography*, 27(2), 148-155. <https://doi.org/10.1002/bmc.2761>
- Taşkın, T., Kahvecioğlu, D., Türkoğlu, E. A., Doğan, A., & Kuzu, M. (2022). In vitro biological activities of different extracts from alcea dissecta. *Clinical and Experimental Health Sciences.*, 12(1), 53-60. <https://doi.org/10.33808/clinexphealthsci.787845>
- Taslimi, P., Aslan, H. E., Demir, Y., Oztaskin, N., Maraş, A., Gulçin, İ., Beydemir, S., & Goksu, S. (2018). Diarylmethanon, bromophenol and diarylmethane compounds: discovery of potent aldose reductase,  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glycosidase inhibitors as new therapeutic approach in diabetes and functional hyperglycemia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 857-863. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.004>
- Topal, M., & Gulcin, İ. (2022). Evaluation of the in vitro antioxidant, antidiabetic and anticholinergic properties of rosmarinic acid from rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 43, e102417. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102417>
- Verpoorte, J. A., Mehta, S., & Edsall, J. T. (1967). Esterase activities of human carbonic anhydrases B and C. *Journal of Biological Chemistry*, 242(18), 4221-4229. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)95800-x](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)95800-x)
- Wong, Y. M., & Siow, L. F. (2015). Effects of heat, pH, antioxidant, agitation and light on betacyanin stability using red-fleshed dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) juice and concentrate as models. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 3086-3092. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1362-2>
- Yaşar, Ü., Gönül, İ., Türkeş, C., Demir, Y., & Beydemir, Ş. (2021). Transition-metal complexes of bidentate schiff-base ligands: in vitro and in silico evaluation as non-classical carbonic anhydrase and potential acetylcholinesterase inhibitors. *ChemistrySelect*, 6(29), 7278-7284. <https://doi.org/10.1002/slct.202102082>
- Zaid, R. M., Mishra, P., Siti Noredyani, A. R., Tabassum, S., Ab Wahid, Z., & Mimi Sakinah, A. M. (2020). Proximate characteristics and statistical optimization of ultrasound-assisted extraction of high-methoxyl-pectin from hylocereus polyrhizus peels. *Food and Bioprocess Processing*, 123, 134-149. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.011>
- Zain, N. M., Nazeri, M. A., & Azman, N. A. (2019). Assessment on bioactive compounds and the effect of microwave on pitaya peel. *Jurnal Teknologi*, 81(2), 11-19. <https://doi.org/10.11113/jt.v81.12847>

## An investigation of the Trypan blue dye's biosorption on fungal biomass

*Tripan mavi boyasının fungal biyokütle ile biyosorpsiyonu hakkında bir çalışma*

Yusuf Doruk ARACAGÖK\* 

Department of Biology, Faculty of Science, Hacettepe University, Beytepe, 06800, Ankara, Türkiye

• Received: 22.02.2023

• Accepted: 22.05.2023

### Abstract

Trypan blue (TB) is a commonly used hazardous and carcinogenic dye. The aim of this research was to remove TB using heat-inactivated *Aspergillus niveus* biomass. The biosorption of TB dye was studied as a function of pH, the concentration of TB dye, biosorbent amount, and time. In studies, the Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, and Harkins-Jura isotherm models were evaluated for suitability. The biosorption of the TB dye on the used biomass was found to follow the Langmuir and Redlich-Peterson isotherm models. The pseudo second-order kinetic model was found to be more effective at explaining TB biosorption. The pseudo-second order model's theoretical  $Q_e$  value (129.87 mg/g) was found to be close to the experimentally obtained value (128.1 mg/g) at 25 °C. According to the studies, the highest biosorption capacity was found to be 141.79 mg/g at 45 °C.

**Keywords:** Adsorption, Biosorption, Fungal biomass, Trypan blue

### Öz

Tripan mavisi (TB) yaygın olarak kullanılan tehlikeli ve kanserojen bir boyadır. Bu araştırmanın amacı, ısıyla inaktive edilmiş *Aspergillus niveus* biyokütlesi kullanarak TB'yi gidermektir. TB boyasının biyosorpsiyonu pH, TB boyası konsantrasyonu, biyosorbent miktarı ve zamanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Çalışmalarda Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson ve Harkins-Jura izoterm modelleri uygunluk açısından değerlendirilmiştir. TB boyasının kullanılan biyokütle üzerindeki biyosorpsiyonunun Langmuir ve Redlich-Peterson izoterm modellerini takip ettiği bulunmuştur. Yalancı ikinci dereceden kinetik modelin TB biyosorpsiyonunu açıklamada daha etkili olduğu bulunmuştur. Sözde ikinci dereceden modelin teorik  $Q_e$  değerinin (129,87 mg/g) 25 °C'de deneysel olarak elde edilen değere (128,1 mg/g) yakın olduğu bulunmuştur. Çalışmalara göre, en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi 45 °C'de 141,79 mg/g olarak bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Adsorpsiyon, Biyosorpsiyon, Fungal biyokütle, Tripan mavisi

\*Yusuf Doruk ARACAGÖK; doruk@hacettepe.edu.tr

## 1. Introduction

One of the greatest environmental hazards we are currently facing is water pollution, which requires urgent attention. Both organic and inorganic substances pollute water resources. Heavy metals, detergents, organochlorines, organochlorines, organophosphorus, polycyclic aromatic compounds, and aromatic compounds derived from petroleum and dyes are examples of chemicals that cause water pollution. (Olakunle et al., 2018). Dyes are a prominent class of organic macromolecules that have widespread applications in various industries, such as textiles, paints, plastics, solar-sensitive devices, optics, sensors, and metal extraction. Classification of dyes is based on various criteria, including their molecular structure, source, colour, and method of application in the colour index (CI). However, a more systematic categorization of dyes can be achieved based on their chromophores. These include quinone-amine dyes, acridine dyes, azo dyes, aryl methane dyes, anthraquinone dyes, and other similar compounds. (Rauf & Salman Ashraf, 2012).

One of the most difficult industrial wastewaters to handle is dye effluent from the fabric and dyestuff industries. This is because that dyes are typically synthetic in origin and contain complex aromatic molecular structures, making them more durable and difficult to biodegrade (Fu & Viraraghavan, 2001).

These hazardous chemicals can cause water pollution, disrupt the environmental balance, and increase chemical and biological oxygen demand (COD and BOD) by altering the pH and chemical content of the water body. As a result, this coloured waste can have severe toxic effects on the aquatic ecosystem (Sarkar et al., 2017).

The dye-containing wastewater, which is given to the receiving environment without treatment, has a negative effect on the photosynthesis process as well as its toxic effects (Gemici & Özden, 2022). Azo dyes are chemical compounds that are made up of a diazotized amine coupled to an amine or a phenol, and they can contain one or more azo linkages. The primary building blocks for azo dyes are aromatic amines (Chung, 2016). Trypan blue is a diazo dye that is used as a direct dye for cotton fabrics and as a vital stain in biosciences to selectively colour dead cells or tissues blue (Priyadarshini et al., 2021). Trypan blue (TB) is classified as a class-2B carcinogen by the International Agency for Research on Cancer, a class of compounds that can endanger human life. As a result, it is critical that Trypan blue be removed from wastewater (Cai et al., 2020). TB was removed using various adsorbents. Adsorbents such as core-shell activated carbon, orange peel, modified luffa sponge and MgO nanoparticles are examples of these materials (Cai et al., 2020; Eddy et al., 2022; Nadaroglu et al., 2017; Priyadarshini et al., 2021). Aside from adsorption, various techniques have been used to remove TB. These include biodegradation, the photo-Fenton process, and electrochemical oxidation (Britos et al., 2018; Dutta et al., 2019; Ghime & Ghosh, 2020).

The main goal of this study is to examine the removal of Trypan blue, which is a toxic dye, by biosorption by using dead biomass of *Aspergillus niveus* (= *Fennelia nivea*)

## 2. Materials and methods

### 2.1. Microorganisms and production of biomass

In this investigation, *Aspergillus niveus* (= *Fennelia nivea*) biomass—previously isolated from the soil, identified, and kept in the Hacettepe Biology Department stocks (Aracagök et al., 2021)—was utilized as an adsorbent in the removal of Trypan blue. Malt extract broth medium was used to produce fungal biomass to be used as an adsorbent. It was inoculated into Erlenmeyer flasks (1000 ml) with 500 ml malt extract broth and incubated for 5 days at the natural pH of the medium at a shaking speed of 150 rpm at 30°C. When the incubation period is over the media were autoclaved at 110 °C for 25 minutes to obtain dead biomass. The fungal biomass was separated from the liquid medium through the filter paper, the remaining biomass on the filter paper was washed with distilled water. The obtained heat-inactivated *A. niveus* mass was allowed to dry for two days at 50 °C. The dried dead biomass was pulverized with a mortar and passed through a 0.15 mm diameter sieve.



## 2.2. Dye removal experiments

TB dye removal experiments were performed in 50 ml Falcon tubes with 10 ml solution. Trypan blue powder (Merck, CAS NO: 72-57-1) was used to prepare the dye solution. pH values of dye solutions were adjusted using 0.1-1 N HCl and NaOH solutions.

To examine the impact of pH, from 4 to 9, solutions containing 25 mg/L TB dye and 10 mg of fungal biomass were created. 250 mg/L dye solutions were combined with 10 to 150 mg of dry biomass powder to examine the effects of the fungal adsorbent dosage.

By increasing the concentrations from 30 to 300 mg/L, the impact of the starting TB concentration was examined. As a result, various TB concentrations were examined during the investigation. The biomass used in these trials remained constant at 10 mg. The effects of 250 mg/L TB solutions and 10 mg/g biomass on contact time (5-1.440 min) were studied. The reactors were operated on rotary shakers for 24 hours at 150 rpm.

20 minutes are spent centrifuging the dye and adsorbent mixture at 4000 rpm. When the centrifugation process was complete, the supernatant was examined through a spectrophotometer at a wavelength of 594 nm to determine whether the quantity of TB had changed. Each test was run in triplicate.

The following equations were used to calculate the adsorption capacity ( $Q_e$ ) and percentage of removal rates at equilibrium:

$$Q_e = \frac{(C_i - C_e)}{m} \times V \quad (1)$$

$$\text{removal rate (\%)} = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

## 2.3. Isotherms

Freundlich, Langmuir, Harkins-Jura, and Redlich-Peterson isotherm approaches were used to model the TB dye adsorption onto *Aspergillus niveus* biomass.

### Freundlich isotherm:

This isotherm can be used to multilayer adsorption with non-uniform dispersion of adsorption affinities and heat over the heterogeneous adsorbent surface. Following is how this model is expressed (Foo & Hameed, 2010):

$$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

The adsorption coefficient is  $K_F$ , and the adsorption index is  $1/n$ .

### Langmuir isotherm:

The Langmuir isotherm makes the assumption, of monolayer adsorption, with adsorption occurring only at a constrained number of specific localized sites that are the identical and equivalent, with no lateral interaction and steric inhibition between the adsorbed species, even on contiguous sites. Following is how this model is expressed (Foo & Hameed, 2010) :

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{Q_e}{Q_{max}} + \frac{1}{Q_{max} \times K_L} \quad (4)$$

$C_e$  (mg/L) denotes the concentration at equilibrium,  $Q_e$  (mg/g) the adsorption capacity at equilibrium,  $K_L$  (L/g) the adsorption power, and  $Q_{max}$  (mg/g) the maximal adsorption capacity.

The favourability of the adsorption was assessed using the dimensionless constant separation factor ( $R_L$ ) of the Langmuir model. Adsorption is either linear or nonlinear depending on the dimensionless separation factor values. ( $R_L = 0$ ), favourable ( $0 < R_L < 1$ ), or unfavourable ( $1 > R_L$ ). Following is how this model is expressed (Foo & Hameed, 2010):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_i} \quad (5)$$

### Harkins-Jura isotherm:

Multilayer adsorption on the surface of adsorbents with heterogeneous distribution of pores is a possibility according to the Harkin-Jura isotherm model. Following is how this model is expressed (Ayawei et al., 2017):

$$\frac{1}{Q_e^2} = \frac{B}{A} - \frac{1}{A} (\log C_e) \quad (6)$$

B is a model constant, and A is another model constant

### Redlich – Peterson isotherm:

A hybrid isotherm made out of the Langmuir and Freundlich isotherms is known as the Redlich-Peterson isotherm. Following is how this model is expressed (Wu et al., 2010):

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{K_R} + \frac{a_R}{K_R} C_e^g \quad (7)$$

$a_R$  is the Redlich-Peterson model constant (L/mg),  $K_R$  is the Redlich-Peterson isotherm constant (L/g), and  $g$  is the Redlich-Peterson exponent.

## 2. 4. Kinetics

The adsorption of TB dye on *A. niveus* biomass was evaluated using the pseudo-first order and pseudo-second-order kinetic models. Linearized first order kinetic model equation (Plazinski et al., 2009) :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (8)$$

Another popular kinetic model for adsorption researches is a pseudo-second-order model, which is described as (Ho & McKay, 1998):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e^2 K_2} + \frac{t}{q_e} \quad (9)$$

## 2.5. Software

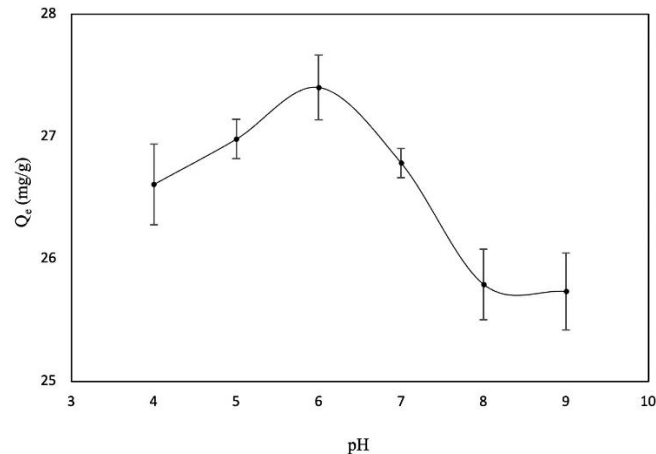
Adsorption isotherms was plotted by R studio (PUPAIM) package. Statistical analysis was performed using Python, Sckit and Scipy libraries.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Effect of pH

Heat-inactivated *A. niveus* biomass powder was used to remove TB, and the findings of this investigation are shown in Figure 1. The impact of changing the medium pH on TB removal was investigated at various pH levels with 25 mg/L TB, with a control group for each pH value. The group which pH was adjusted to 6 ( $Q_e$ : 27.4 mg/g) showed the highest biosorption value at the end of the trial. The Kruskal-Wallis and Dunn's tests were used to determine the statistical significance of the acquired data. Since the p-value of the Kruskal-Wallis test (0.029) is less than 0.05, it can be concluded that there is a difference between the groups with different pH levels. According to Dunn's test (p-value (0.017) < 0.05), the pH 6 and pH 9 groups were the main

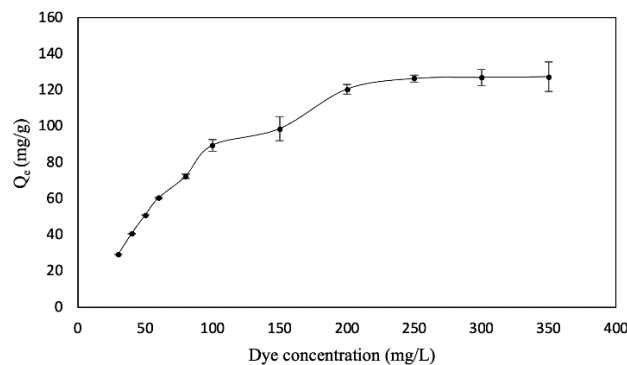
contributors to this difference. Based on the obtained data, it can be said that TB removal with *A. niveus* biomass is more efficient in an acidic medium compared to an alkali medium. In a previous study, both Luffa sponge and modified Luffa sponge effectively removed Trypan blue dye at pH 7 (Nadaroglu et al., 2017). In a study with MgO nanoparticles, the authors observed that Trypan blue adsorption occurs most efficiently at pH 4 (Priyadarshini et al., 2021). In a study with *Trichoderma harzianum*, the maximum removal efficiency for autoclaved and non-autoclaved fungal biomass was reached at pH 8 (Sadhasivam et al., 2005). The adsorbent, which is positively charged with the effect of increasing H<sup>+</sup> ion at low pH, interacts more strongly with -SO<sub>3</sub>- groups in the TB dye (Akkaya et al., 2009). The medium pH value was chosen as 6 for further studies.1, 17-28.



**Figure 1.** Effect of different pH values on trypan blue biosorption using heat-killed *A. niveus* biomass (10 mg biomass, reaction volume: 10 ml, TB concentration: 25 mg/L, T: 25°C, 150 rpm, each dot is the mean of the three values, and the error bars represent the standard deviation.)

### 3.2. Concentration of Trypan blue and isotherms

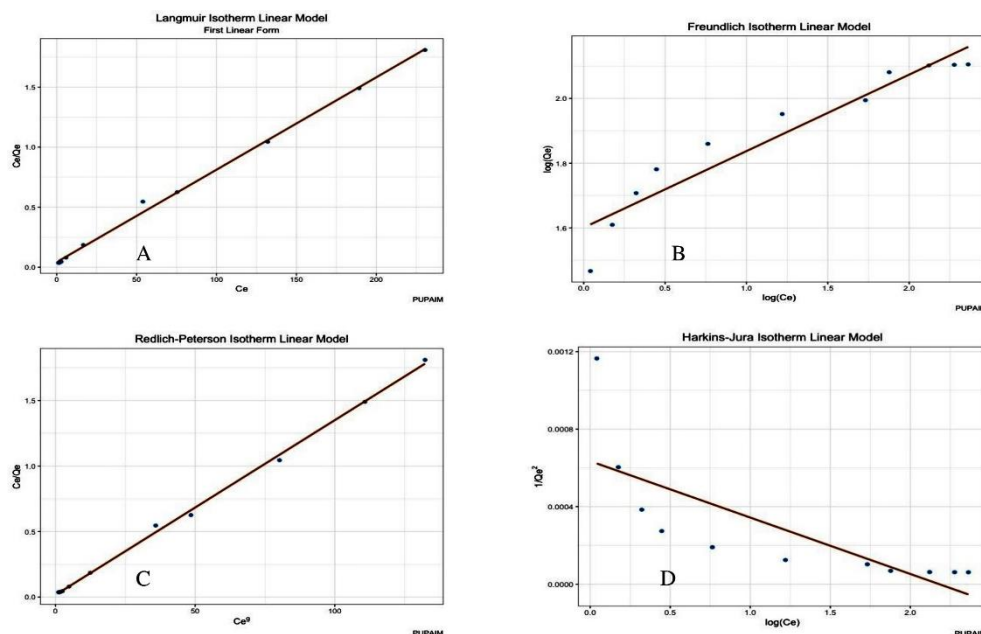
The effect of Trypan blue concentration on biosorption and the saturation point were investigated at dye concentrations ranging from 30 mg/L to 350 mg/L. The results showed that the adsorption capacity (126.4 mg/g) had increased to 250 mg/L dye concentration and also that saturation had been reached (Figure 2). In a study with magnesium nanoparticles, it was reported that the maximum TB adsorption capacity was 132 mg/g (Priyadarshini et al., 2021). In different studies using orange peel and avocado seed, TB adsorption capacities were found to be 172.41 and 19.30 mg/g, respectively (Eddy et al., 2022; El-Idreesy et al., 2021). In another study using luffa sponge and modified luffa sponge, TB removal capacities of TB adsorbents were found to be 45.32 and 47.3 mg/g (Nadaroglu et al., 2017).



**Figure 2.** Effect of TB concentration on trypan blue biosorption using heat-killed *A. niveus* biomass (10 mg biomass, reaction volume: 10 ml, pH: 6, T: 25°C, 150 rpm, each dot is the mean of the three values, and the error bars represent the standard deviation.)

Adsorption of TB increases as the concentration of the adsorbate increases. This is due to the fact that as the amount of TB molecules diffused onto the adsorbent surface increases, so does the adsorption rate (Eddy et al., 2022). As the concentration of the dye increases, the adsorption capacity of the adsorbent also increases. This can be attributed to the high driving force for mass transfer that occurs at higher initial dye concentrations (Salleh et al., 2011).

In this study, Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson and Harkins-Jura isotherms were tested to find out which model would better explain the adsorption of TB dye on inactive *A. niveus* biomass (Figure 3).



**Figure 3** Plots of Langmuir (A), Freundlich (B), Redlich-Peterson (C) and Harkins- Jura isotherms (D)

Redlich-Peterson and Langmuir isotherms have the highest R-squared value among the graphed isotherms (Table 1). The Freundlich and Langmuir isotherms are combined in the Redlich-Peterson isotherm model (Ayawei et al., 2017). Exponent  $g$  for the Redlich-Peterson isotherm can range from 1 to 0. The model is referred to as being Langmuir isotherm fitted if this number is close to 1 (Vijayaraghavan et al., 2006). It can be said that the biosorption of TB on the fungal mass follows the Langmuir model because the  $R^2$  (0.9977) value obtained from the Langmuir isotherm is high, the  $g$  value (0.89) obtained from the Redlich-Peterson isotherm is close to unity. The monolayer and homogeneous adsorption constrained sorption sites on the adsorbent were described using the Langmuir isotherm model. Adsorbate covers sorption sites once, and there will be no more adsorption after that (Hussain et al., 2021).

**Table 1.** Isotherm parameters

Isotherm models		
Langmuir	$Q_{max}$	130.02
	$K_L$	0.1780
	$R^2$	0.9977
Freundlich	$K_F$	39.89
	$n$	4.25
	$R^2$	0.9104
Redlich-Peterson	$K_R$	60.25
	$a_R$	0.8
	$g$	0.89
	$R^2$	0.9984
Harkins-Jura	$A$	3434
	$B$	2.18
	$R^2$	0.59

The Freundlich model was found to be more accurate in explaining TB adsorption with MgO nanoparticles (Priyadarshini et al., 2021). According to a study that used nano-Zn modified Luffa sponge for TB adsorption, the Langmuir isotherm model best explained the adsorption process (Nadaroglu et al., 2017). A study of TB adsorption with adsorbent from orange peel revealed that the adsorption followed the Langmuir isotherm model (Eddy et al., 2022). Due to the  $R_L$  values being smaller than 1, which were computed using the original dye concentration employed, TB biosorption is favourable (Table 2).

**Table 2.**  $R_L$  values for various experimental initial dye concentrations ( $C_i$ ) at 25°C.

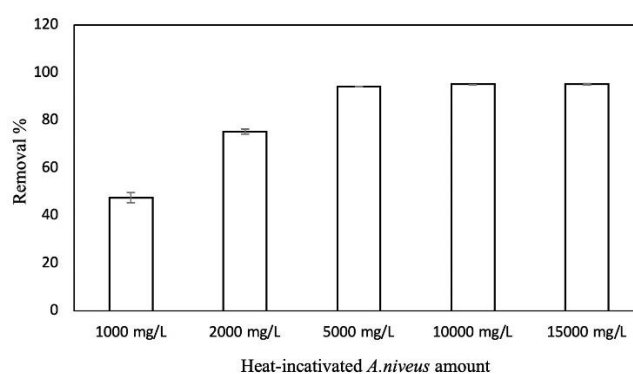
$C_i$ (mg/L)	$R_L$
30	0.15
42	0.117
53	0.095
63	0.081
78	0.066
106	0.050
152	0.035
195	0.027
233	0.023
298	0.018
357	0.015

### 3.3. Effect of *A. niveus* biomass amount on Trypan blue removal

To find the biosorbent dose that resulted in the most effective TB removal, solutions containing 250 mg/L of TB dye and *A. niveus* mass in the range of 1000–15,000 mg/L were added. As anticipated, the percentage of removal rose as the biomass increased, yielding 94.2% Trypan blue elimination at 5000 mg/L biomass. (Figure 4). The number of binding sites for the dye in the solution will rise as the amount of biomass rises (Bayramoglu & Yilmaz, 2018).

In a study in which Pb (II) and Cr (III) biosorption was performed, it was reported that the heavy metal removal rate increased with increasing biomass.

In the same study, it was shown that the removal efficiency decreased due to the aggregates formed at a biomass concentration above 1 g/L (Bueno et al., 2008).

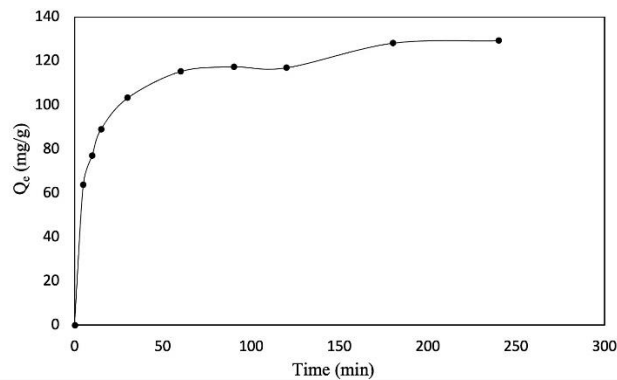


**Figure 4.** Effect of heat- killed *A. niveus* biomass amount on trypan blue removal percentage (reaction volume: 10 ml, pH:6, T: 25°C, 150 rpm, the error bars represent the standard deviation.)

### 3.4. Contact time and kinetics

Figure 5 shows the biosorption of TB dye onto biomass as a function of contact time. According to the findings, the dye was rapidly removed within the first five minutes. The dye biosorption process, which took place

rapidly in the first 60 minutes, continued more slowly in the following minutes and reached equilibrium at 180. minute (128.1 mg/g).



**Figure 5** The influence of contact time on biosorption of trypan blue (10 mg biomass, reaction volume: 10 ml, Dye concentration: 250 mg/L, pH: 6, T: 25°C, 150 rpm)

In the study with luffa sponge, the authors reported that equilibrium was reached within 30 minutes (Nadaroglu et al., 2017).

The Lagergren model, also known as the pseudo-first-order model, is based on the proportionality between the number of filled sites versus the available sites. According to this hypothesis, physical interactions only occur between the adsorbate and the adsorbent's surface at one specific active site. The pseudo-second-order kinetic model assumes that the adsorption follows the square of the difference between the number of available and filled adsorption regions and that the adsorbate could bind to 2 existing sites with various binding energies. (Galloni et al., 2022). Table 3 depicts the assumed pseudo-second order model for TB dye biosorption on fungal biomass, with  $R^2$  as the coefficient of determination. The slope of a linear line ( $t/q_t$  vs.  $t$ ) was used to calculate the theoretical amount of Trypan blue dye that fungal biomass can adsorb,  $Q_e$  (129.87 mg/g). This value was found experimentally to be 128.1 mg/g.

**Table 3.** Kinetic parameters

Pseudo-first order			Pseudo-second order		
$Q_e$ (mg/g)	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$	$Q_e$ (mg/g)	$k_2$ (g/mg/min)	$R^2$
61.16	0.00011	0.914	129.87	0.00102	0.997

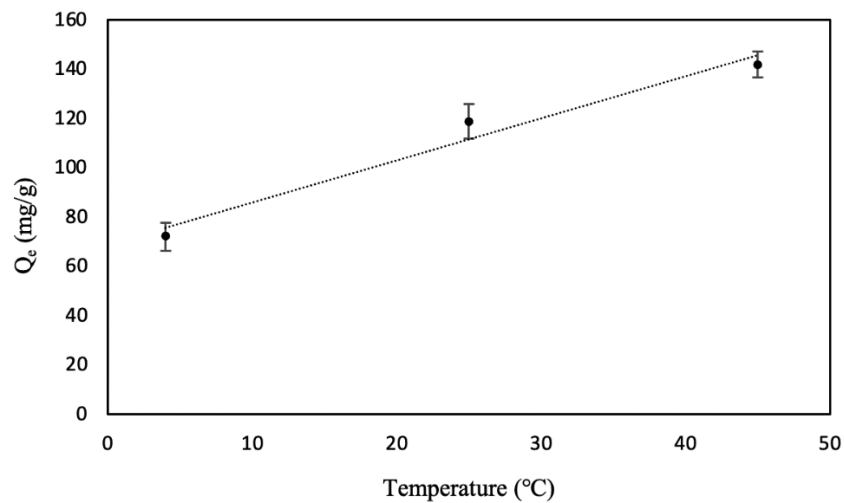
Adsorption of Trypan blue onto chitin fits pseudo-second order rather than pseudo-first order kinetic model (Akkaya et al., 2009). Another research showed that the adsorption of trypan blue dye on core-shell granular activated carbon follows the pseudo-second order kinetic model (Cai et al., 2020).

### 3.5. Temperature effect

The effect of temperature on the adsorption TB was investigated using 10 millilitres of solution containing 250 mg per liter of the dye, which was contact in with 10 milligrams of biomass at pH 6. The studies were conducted at three different temperatures: 4°C, 25°C, and 45°C.

As can be seen in Figure 6, which shows the change in TB adsorption capacity with temperature change, the adsorption capacity increased with increasing temperature. The adsorption efficiency of TB with fungal biomass increased from 72 mg/g at 4°C to 149.79 mg/g at 45°C with increasing temperature. A study with Luffa sponge reported that the maximum removal of TB by adsorption occurred at 20°C (Nadaroglu et al., 2017) In a study with MgO nanoparticles, it was reported that TB removal decreased with increasing temperature (Priyadarshini et al., 2021).

It was reported that the adsorption of Reactive Yellow 86, an azo dye, with free and immobilised fungal biomass increased with increasing temperature (Bayramoglu & Yilmaz, 2018).



**Figure 6.** Effect of temperature on TB adsorption(10 mg biomass, reaction volume: 10 ml, Dye concentration: 250 mg/L, pH: 6, 150 rpm, each dot is the mean of the three values, and the error bars represent the standard deviation.)

#### 4. Conclusion

The efficacy of heat-treated *Aspergillus niveus* biomass for the removal of the toxic and carcinogenic dye Trypan blue was examined, with the pH of the medium considered a crucial parameter due to its impact on both the adsorbent and adsorbate charge. The experimental results indicated that the highest biosorption efficiency was achieved at a pH of 6, with significantly higher biosorption values observed at lower pH levels than at higher pH levels. Additionally, the highest biosorption capacity was observed at a Trypan blue concentration of 250 mg/L, and the biosorption process followed both Langmuir and Redlich-Peterson isotherms. Notably, the Redlich-Peterson exponent,  $g$ , is closely approximated 1, suggesting conformity to the Langmuir model. The biosorption of Trypan blue by *A. niveus* was found to be rapid, with saturation of the adsorbent occurring at the 180th minute. Further analysis revealed that the pseudo-second order kinetic model provided a better fit for the biosorption of Trypan blue by *A. niveus* as compared to the pseudo-first order model.

#### Author contribution

Experimental design and writing of the article were done by Y. Doruk ARACAGÖK

#### Declaration of ethical code

The author of this publication affirms that there is no need for a legal permit or the approval of an ethical committee for the materials and procedures utilized in this investigation.

#### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

#### References

- Akkaya, G., Uzun, İ., & Güzel, F. (2009). Adsorption of some highly toxic dyestuffs from aqueous solution by chitin and its synthesized derivatives. *Desalination*, 249(3), 1115–1123. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.05.014>
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>

- Bayramoglu, G., & Yilmaz, M. (2018). Azo dye removal using free and immobilized fungal biomasses: Isotherms, kinetics and thermodynamic studies. *Fibers & Polymers*, 19(4), 877–886. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7875>
- Britos, C. N., Gianolini, J. E., Portillo, H., & Trelles, J. A. (2018). Biodegradation of industrial dyes by a solvent, metal and surfactant-stable extracellular bacterial laccase. *Biocatalysis & Agricultural Biotechnology*, 14, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.03.015>
- Bueno, B. Y. M., Torem, M. L., Molina, F., & de Mesquita, L. M. S. (2008). Biosorption of lead(II), chromium(III) and copper(II) by *R. opacus*: Equilibrium and kinetic studies. *Minerals Engineering*, 21(1), 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.08.013>
- Cai, Z., Deng, X., Wang, Q., Lai, J., Xie, H., Chen, Y., Huang, B., & Lin, G. (2020). Core-shell granular activated carbon and its adsorption of trypan blue. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118496>
- Chung, K.-T. (2016). Azo dyes and human health: A review. *Journal of Environmental Science & Health, Part C*, 34(4), 233–261. <https://doi.org/10.1080/10590501.2016.1236602>
- Aracagök, D. Y., Ögün, E., Torun, M., Akyıl, H., Cihangir, N., & Sanin, S. (2021). Fungal biosorption of cadmium(II) onto *Fennelia nivea* from aqueous solution: Equilibrium, thermodynamics, and kinetics. *Desalination & Water Treatment*, 222, 386–393. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27091>
- Dutta, A., Das, N., Sarkar, D., & Chakrabarti, S. (2019). Development and characterization of a continuous solar-collector-reactor for wastewater treatment by photo-Fenton process. *Solar Energy*, 177, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.036>
- Eddy, N. O., Garg, R., Garg, R., Aikoye, A. O., & Ita, B. I. (2022). Waste to resource recovery: Mesoporous adsorbent from orange peel for the removal of trypan blue dye from aqueous solution. *Biomass Conversion & Biorefinery*, <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02571-5>
- El-Idreesy, T. T., Khoshala, O., Firouzi, A., & Elazab, H. A. (2021). Equilibrium and kinetic study on the biosorption of trypan blue from aqueous solutions using avocado seed powder. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(3), 11042–11053. <https://doi.org/10.33263/BRIAC113.1104211053>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Fu, Y., & Viraraghavan, T. (2001). Fungal decolorization of dye wastewaters: A review. *Bioresource Technology*, 79(3), 251–262. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00028-1)
- Galloni, M. G., Bortolotto, V., Falletta, E., & Bianchi, C. L. (2022). PH-Driven selective adsorption of multi-dyes solutions by loofah sponge and polyaniline-modified loofah sponge. *Polymers*, 14(22), 4897. <https://doi.org/10.3390/polym14224897>
- GemiCi, B. T., & Özden, A. (2022). Isotherm, kinetics & thermodynamic analysis of dye removal from aqueous solutions using chestnut shell. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(4), 1158-116. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.983162>
- Ghime, D., & Ghosh, P. (2020). Decolorization of diazo dye trypan blue by electrochemical oxidation: Kinetics with a model based on the Fermi's equation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 102792. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.037>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). A Comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. *Process Safety & Environmental Protection*, 76(4), 332–340. <https://doi.org/10.1205/095758298529696>
- Hussain, S., Kamran, M., Khan, S. A., Shaheen, K., Shah, Z., Suo, H., Khan, Q., Shah, A. B., Rehman, W. U., Al-Ghamdi, Y. O., & Ghani, U. (2021). Adsorption, kinetics and thermodynamics studies of methyl orange dye sequestration through chitosan composites films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.054>



- Nadaroglu, H., Cicek, S., & Gungor, A. A. (2017). Removing trypan blue dye using Nano-Zn modified luffa sponge. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular & Biomolecular Spectroscopy*, 172, 2–8. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.08.052>
- Olakunle, M. O., Inyinbor, A. A., Dada, A. O., & Bello, O. S. (2018). Combating dye pollution using cocoa pod husks: A sustainable approach. *International Journal of Sustainable Engineering*, 11(1), 4–15. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1393023>
- Plazinski, W., Rudzinski, W., & Plazinska, A. (2009). Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review. *Advances in Colloid & Interface Science*, 152(1), 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.07.009>
- Priyadarshini, B., Patra, T., & Sahoo, T. R. (2021). An efficient and comparative adsorption of Congo red and trypan blue dyes on MgO nanoparticles: Kinetics, thermodynamics and isotherm studies. *Journal of Magnesium & Alloys*, 9(2), 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.09.004>
- Rauf, M. A., & Salman Ashraf, S. (2012). Survey of recent trends in biochemically assisted degradation of dyes. *Chemical Engineering Journal*, 209, 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.015>
- Sadhasivam, S., Saritha, E., Savitha, S., & Swaminathan, K. (2005). Comparison of the efficacy of live and autoclaved mycelium of *Trichoderma harzianum* on the removal of trypan blue. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 75(5), 1046–1053. <https://doi.org/10.1007/s00128-005-0855-0>
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.019>
- Sarkar, S., Banerjee, A., Halder, U., Biswas, R., & Bandopadhyay, R. (2017). Degradation of synthetic azo dyes of textile industry: A sustainable approach using microbial enzymes. *Water Conservation Science and Engineering*, 2(4), 121–131. <https://doi.org/10.1007/s41101-017-0031-5>
- Vijayaraghavan, K., Padmesh, T., Palanivelu, K., & Velan, M. (2006). Biosorption of nickel(II) ions onto *Sargassum wightii*: Application of two-parameter and three-parameter isotherm models. *Journal of Hazardous Materials*, 133(13), 304–308. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.016>
- Wu, F.-C., Liu, B.-L., Wu, K.-T., & Tseng, R.-L. (2010). A new linear form analysis of Redlich–Peterson isotherm equation for the adsorptions of dyes. *Chemical Engineering Journal*, 162(1), 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.006>

## Investigation of changes in geomechanical properties of sandstones under different saturation and anisotropy conditions: Example from Gümüşhane (NE Türkiye)

*Farklı doygunluk ve anizotropi koşullarında kumtaşlarının jeomekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi: Gümüşhane örneği (KD Türkiye)*

Zarife GÜLTEKİN<sup>1</sup> , Serhat DAĞ<sup>\*2</sup> 

<sup>1</sup> General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara

<sup>2</sup> Gümüşhane University Faculty of Engineering and Natural Sciences, Geological Engineering Department, 29100, Gümüşhane

• Received: 31.03.2023

• Accepted: 27.05.2023

### Abstract

In this study, the changes in various geomechanical properties were studied for sandstones cropped out at the Mescitli region of the Gümüşhane city under different saturation and anisotropy conditions. For this purpose, 225 specimens were prepared considering the lamination planes of those were chosen to have orientation of 0, 30, 45, 60 and 90° relative to loading direction. Index properties of the sandstones such as dry unit weight ( $\gamma_{dry}$ ), saturated unit weight ( $\gamma_{sat}$ ), water absorption by weight ( $A_w$ ) and water absorption by volume ( $A_v$ ) were assigned. In accordance with the objective of study P wave velocity, uniaxial compressive strength and indirect tensile strength values were determined based on different saturation and anisotropy conditions. It was noted as a result of the observations carried out that specimens parallel to lamination have higher wave velocities in general when compared with specimens that are perpendicular to lamination planes. While uniaxial compressive strength values for sandstones are high for specimens which are parallel and perpendicular to lamination, the lowest strength value was observed in specimens with an anisotropy angle of 30°. In addition, it was also observed that the strength values decrease at a significant level with increasing saturation conditions. Strength anisotropy ratio ( $R_{UCS}$ ) for sandstones varies between 1.28–1.49 based on different saturation conditions. Similarly, while indirect tensile strength values were higher in specimens that were parallel and perpendicular to lamination, they were lower for other anisotropy orientations. Indirect tensile strength values also decreased with increasing degree of saturation.

**Keywords:** Anisotropy, Degree of saturation, Geomechanical properties, Lamination, Sandstone

### Öz

*Bu çalışmada Gümüşhane ili Mescitli yöresinde yüzeylenen kumtaşlarının değişik doygunluk ve anizotropi şartlarında jeomekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Bu amaçla laminalanma düzlemleri esas alınarak yükleme yönü ile 0, 30, 45, 60 ve 90° yapacak şekilde farklı anizotropi açılarında konumlanmış 225 adet numune hazırlanmıştır. Kumtaşı örneklerinin kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_{dry}$ ), doygun birim hacim ağırlık ( $\gamma_{sat}$ ), ağırlıkça su emme ( $A_w$ ) ve hacimce su emme ( $A_v$ ) gibi indeks özellikleri tayin edilmiştir. Çalışma amacına uygun olarak kumtaşlarının değişen doygunluk ve anizotropi koşulları esas alınarak P dalga hızı gibi fiziksel özellikleri ile tek eksenli basınç ve dolaylı çekilme dayanımları belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda genel olarak laminalanmaya paralel örneklerin laminalanmaya dik olan örneklerle göre daha yüksek dalga hızı değerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Kumtaşlarında tek eksenli basınç dayanımı değerleri laminalanmaya paralel ve dik olan örneklerde yüksek değerler gösterirken en düşük dayanım değeri 30° anizotropi açısına sahip örneklerden elde edilmiştir. Ayrıca artan doygunluk koşulları ile dayanım değerinin önemli miktarda azaldığı gözlemlenmiştir. Farklı doygunluk koşullarına bağlı olarak kumtaşlarının dayanım anizotropi oranı ( $R_{UCS}$ ) 1.28-1.49 arasında değişim sunmaktadır. Dolaylı çekilme dayanımı değerleri benzer şekilde laminalanmaya paralel ve dik örneklerde yüksek iken diğer anizotropi açılarında ise düşüktür. Dolaylı çekilme dayanımı değerleri de doygunluk derecesindeki artışa bağlı olarak azalım göstermektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** Anizotropi, Doygunluk derecesi, Jeomekanik özellikler, Laminalanma, Kumtaşı

\*Serhat DAĞ; serhatdag@gumushane.edu.tr

## 1. Introduction

Rock environments are defined as those which are anisotropic, discontinuous and heterogeneous. Both the strength and deformation characteristics of rocks vary according to anisotropy due to the orientation of the minerals and/or orientation of the grains that form the rock and the effect of discontinuities. Depending on the stresses that the rocks are affected from, anisotropy is observed in metamorphic rocks as foliation, in sedimentary rocks as fine layers via lamination and in magmatic rocks as mineral arrangement by way of flow (Amedei, 1996). It is important to define strength and deformation of specimens oriented at different angles according to anisotropy planes considering the effect of anisotropy.

Just like anisotropy, different saturation conditions may also cause changes in the behavior of rocks. Dry rock specimens with zero degree of saturation are mostly used in experimental studies carried out in the laboratory. Both the strength and deformation characteristics of the rock material are determined according to this condition. However, the rock is not always dry in its natural environment and may have different degrees of saturation. As a result, rocks may actually display different strengths based on the varying saturation conditions. The rock type selected is also very important for putting forth the impact of saturation conditions on rock behavior. Sedimentary rock types that are suited more to saturation should be preferred instead of magmatic and metamorphic rocks since rock types with low porosity and unconnected void will not be suited for saturation.

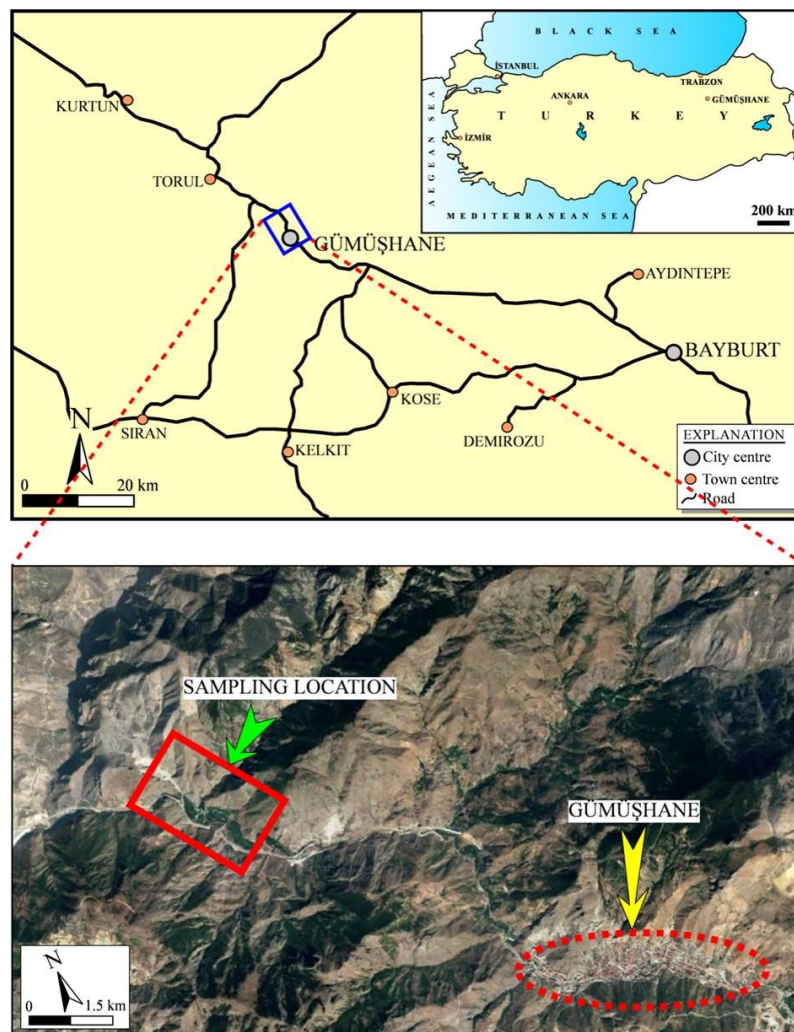
The number of studies which examine the relationships between the physical–mechanical characteristics of rocks is quite high in literature (Chang et al., 2006; He, 2006; Franzini et al., 2007; Lezzerini et al., 2008; Singh & Sharma, 2008; Jianhong et al., 2009; Moradian & Behnia, 2009; Ji & Marcotte, 2009; Gürocak et al., 2012; Onur et al., 2012; Chen et al., 2015; Karaman et al., 2015b; Kaya & Karaman, 2016; Columbu et al., 2017; Wang et al., 2017; Yin et al., 2018; Buosi et al., 2018). However, there are also studies which examine the impact of anisotropy on rock behavior (e.g. Donath, 1964; Batugin & Nirenburg, 1972; Behrestaghi et al., 1996; Çolak, 1998; Ajalloeian & Lahskaripour, 2000; Chen & Hsu, 2001; Garagon, 2007; Tavallali & Vervoort, 2010; Cho et al., 2012; Yücel, 2012; Tavallali & Vervoort, 2013; Gökçe, 2015; Singh et al., 2015; Kim et al., 2016; Lin et al., 2017; Kundu et al., 2018; Li et al., 2020) along with studies which examine different saturation conditions of rocks and the impact of these conditions on rock behavior (e.g. Helle et al., 2003; He, 2006; Chang et al., 2006; Kahraman, 2007; Török & Vásárhelyi, 2010; Karakul & Ulusay, 2013). It was observed that the highest uniaxial compressive strength (UCS) is generally obtained at anisotropy orientations of 0 and 90°, whereas the lowest UCS is generally obtained at anisotropy orientation of 30° (Ramamurthy, 1993).

Donath (1964), carried out experimental studies on specimens with anisotropy orientations of 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90° on slates with well–developed planar foliations that the highest compressive strength was obtained for the specimen on which stress was applied perpendicular to the foliation plane (90°). Ajalloeian and Lahskaripour (2000), conducted studies regarding to the strength anisotropy of siltyshales and mudshales. Maximum compressive strength value was measured for  $\beta=90^\circ$ . Both siltshale and mudshale exhibited minimum compressive strength in the direction  $\beta=30^\circ$ . Cho et al. (2012), worked on a series of experimental studies for examining the deformation and strength anisotropy of gneiss, shale and schist-type metamorphic rocks. It was put forth as a result of the study that anisotropy is effective on deformation and strength and that anisotropy should be taken into consideration with regard to engineering applications. Singh et al. (2015), carried out a triaxial compressive test on phyllite, slate and orthoquartzites and compared to the behavior of these rocks with the results of other studies in the literature. It was determined that the specimens with an anisotropy orientation of 90° (perpendicular to the direction of compression load) had higher strength in comparison with the specimens which have 0° (parallel to the direction of compression load) angle.

It was emphasized in studies by He (2006), on degrees of saturation that conditions such as pore pressure and water saturation may have an impact on the wave velocity of the rock. P and S wave velocities were measured on dry and saturated conglomerates with low porosity and it was observed that the P wave velocity increased in saturated specimens in comparison with dry specimens. Török and Vásárhelyi (2010), carried out studies on travertines examining whether there is any empirical relationship between physical–mechanical properties such as porosity, density, P wave velocity and UCS under dry and saturated conditions. They were determined that UCS and ultrasonic pulse velocity; effective porosity and ultrasonic pulse velocity were exponentially related to. Also, test results presented in the study indicate that there was a difference in the physical properties

of travertine displaying various fabric. In this respect, [Karakul and Ulusay \(2013\)](#), examined the relationships between the strength parameters of rocks and P wave velocities under different saturation conditions. A total of 14 different rock types were examined in the study in which measurement of P wave velocity at different saturations was used for estimating UCS and tensile strength values. It was observed as a result of the study that strength characteristics and elasticity modulus decreased based on saturation. In addition, it was also determined that the P wave velocity increased in some rock types and decreased in others depending on saturation.

It can be observed upon an examination of the studies in the literature that the anisotropic characteristics (e.g. lamination in sedimentary rocks or foliation in metamorphic rocks, etc.) together different saturation conditions play an important role on rock physical–mechanical behaviors. The number of studies in literature which evaluate these two instances is limited ([Kumar, 2006](#); [Kundu et al., 2018](#)). Whereas anisotropy was taken as basis in both studies, degrees of saturation was taken into consideration only for dry and saturated conditions. In this study, the changes that may occur in the geomechanical properties of core specimens with different saturation conditions and different anisotropy orientations were investigated together. In addition, the effect of anisotropy and saturation on the rock strength properties were examined. A combined experiment was designed and conducted for studying rock formation. In this way, the integrated impact of changes in geomechanical properties for Mescitli (Gümüşhane, NE Turkey) sandstones were studied. Since there has not been a study in the literature which examines the integrated impact of both properties, in this respect, the study has a unique feature. Sandstones were preferred as rock types in the study since they contain lamination and due to the high porosity, they are more suited to saturation. Samples compiled from the late Cretaceous aged sandstones exposed to around the Gümüşhane city were used in the experimental studies. The lithologic unit that is also known as the Mescitli region sandstones cropped out both at the Mescitli village and its vicinity which is located in about 15 km northwest of the Gümüşhane city (Figure 1).



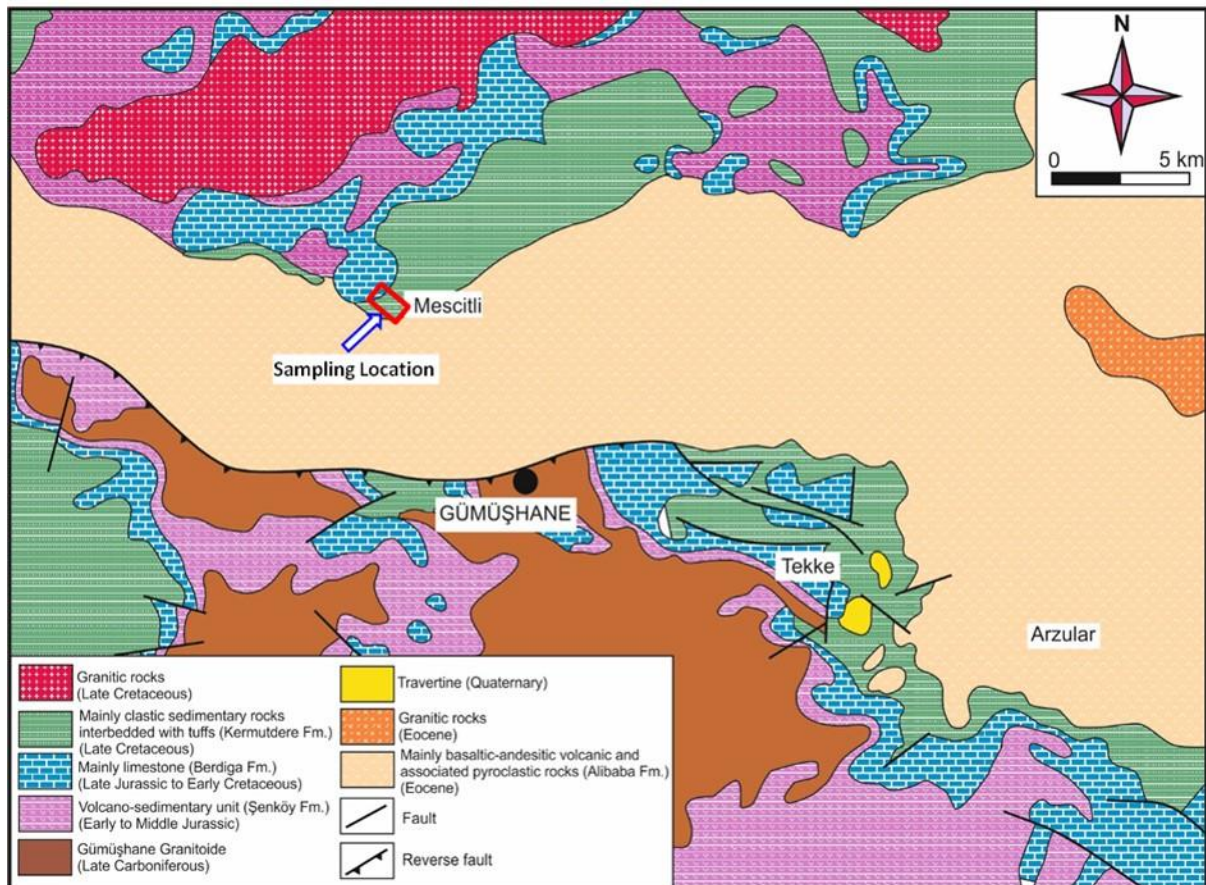
**Figure 1.** Location map of study area

## 2. Geology of the study area and its close vicinity

The Gümüşhane city and its close vicinity are located in the South Zone of the Eastern Pontide Tectonic Assembly (Ketin, 1966). In the region, lithologic units with ages varying from the Paleozoic to Quaternary with different lithologies are cropped out (Figure 2) (Güven, 1993).

Metamorphites that form the oldest basement rocks of the Gümüşhane region are cut by the early–late Carboniferous aged Gümüşhane Granitoid (Topuz et al., 2010). The unit that is typical with its large grain orthoclase is generally pink in color and contains abundant fractures and cracks depending on the tectonic events. These acidic magmatic intrusive rocks are unconformably overlain by the early–middle Jura aged Şenköy formation comprised of volcano–sedimentary sequence (Kandemir, 2004). Berdiga formation comprised of dolomite and dolomitic limestones with a wide surfacing area is conformably located on this sequence starting from late Jura (Pelin, 1977). Late Cretaceous-aged Kermutdere formation (Tokel, 1972) comprised of conglomerate, sandstone, limestone and marl alternation is conformably located on the Berdiga formation. The sandstones used in this study have been compiled from the Kermutdere formation that exposed to the Mescitli region. Eocene aged Alibaba formation is unconformably located on the Kermutdere formation and is comprised of andesite, basalt and their pyroclastics (Tokel, 1972). The formation can be easily discerned on the field with its dark gray color. Whereas the granitic rocks that cut all these units and surface on a narrow area form the Eocene aged granitic intrusions (Eyüboğlu et al., 2017). The youngest units in the region are Quaternary aged alluvium, terrace deposits and travertines.

The geological map of the study area and its vicinity is given in Figure 2.



**Figure 2.** Geology map of the Gümüşhane city and its close vicinity (Modified from Güven, 1993)

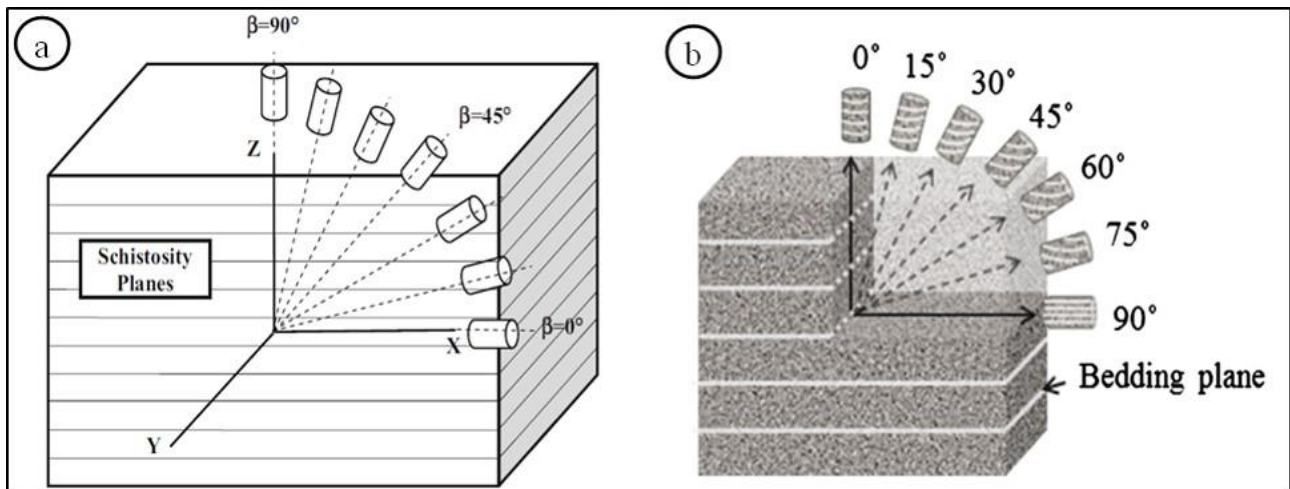
## 3. Material and method

While the sandstone blocks were collected from the field, attention was given so that they were of the same thickness with the same lamination, grain size and hardened properties. Carrying out a detailed field study in the region, 11 blocks were sampled with dimensions of 20x30x40 cm.

Thin sections were prepared to represent each block to determine the mineralogical composition and grain size distribution of the samples. For grain size analysis, the size of the grains was measured along a line assumed to cross-section in two directions on a polarizing microscope. In order to determine the mineralogical composition of the sandstones, a modal analysis including 1000–point counts in each section was made using a polarizing microscope and point counter.

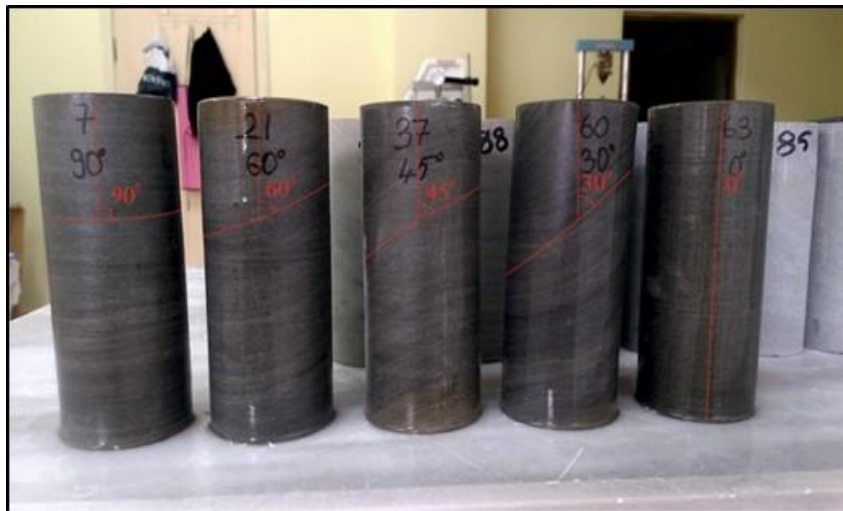
Afterwards, the directional core drilling machine was used in the laboratory to take cores from these blocks with diameters of NX (54 mm) in accordance with methods suggested by [ISRM \(2007\)](#).

Two different methods attract attention in literature for taking specimens while evaluating the anisotropy conditions. One of these is the method used by researchers such as [Nasseri et al. \(2003\)](#), [Kumar \(2006\)](#), [Singh et al. \(2015\)](#), in which anisotropy is evaluated by taking into consideration the angle ( $\beta$ ) between discontinuity planes such as lamination, schistosity etc. and loading direction (Figure 3a). Another method is one used by researchers such as [Zhang et al. \(2010\)](#), [Kim et al. \(2016\)](#), for examining the impact of anisotropy on rock behavior by taking into account the perpendicular direction ( $\theta$ ) to the layering plane (Figure 3b).



**Figure 3.** Evaluation of anisotropy according to (a) [Kumar \(2006\)](#) and (b) [Kim et al. \(2016\)](#), during sample preparation

In this study, the anisotropy is evaluated according to the method given in Figure 3a by considering the angle ( $\beta$ ) between lamination planes and loading direction (Figure 4). The parallelism of the specimens with the lower and upper surfaces was controlled by way of a comparator watch with a sensitivity of 0.001 mm.



**Figure 4.** Core samples prepared according to the different anisotropy orientation ( $\beta$ ) by taking into consideration the lamination planes

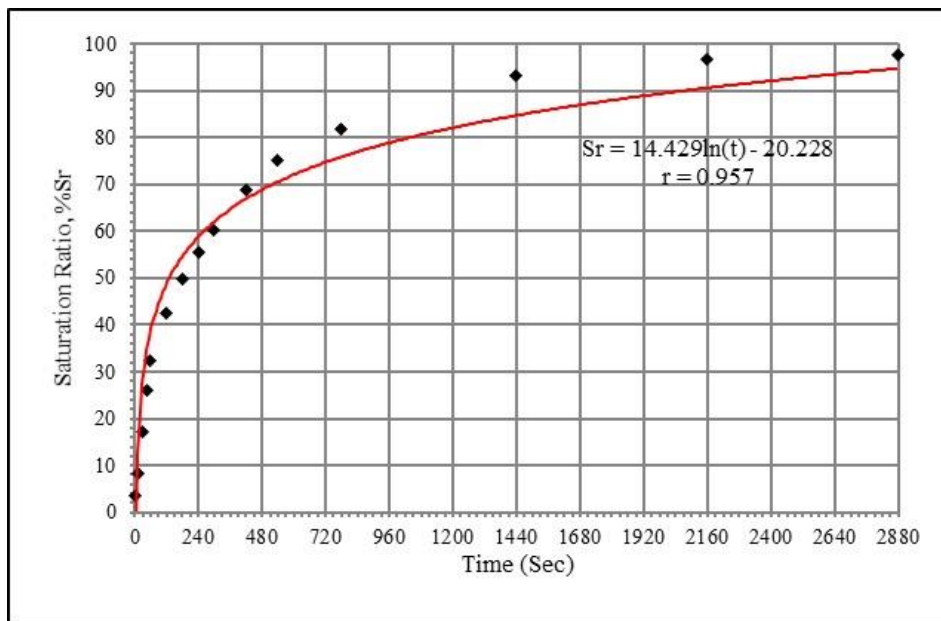
Core specimens with lengths of about 2.5–3 times their diameter, were used for the uniaxial compressive strength, whereas specimens with diameters that are about 2 times their length were prepared for the indirect (brazilian) tensile strength. A total of 75 sandstone samples were used for the UCS experiments, whereas a total of 150 specimens were used for the indirect tensile strength experiments. Methods suggested by [ISRM \(2007\)](#), were taken into account for determining the strength properties of sandstone samples.

To determine physical properties, the specimens were first dried at 105 °C for 24 hours in a drying oven and then weighed to determine their dry masses. Afterwards, they were left to wait for 48 hours in distilled water and weighed to determine their saturated masses. Index properties of the specimens such as their unit weights, water absorption by weight and water absorption by volume were determined using these data. In addition, pycnometer tests were carried out so as to determine the specific gravity values for the rock specimens. Grain unit weights for the specimens ( $\gamma_s$ ) were determined using the specific gravity values for each specimen. Porosity value of each specimen was calculated by way of Equation 1 given below which was also used in the previous studies ([Heidari et al., 2013](#); [Dağ, 2018](#))

$$n = 1 - \frac{\gamma_{dry}}{\gamma_s} \quad (1)$$

Where n: total porosity (%),  $\gamma_{dry}$ : dry unit weight (kN/m<sup>3</sup>) and  $\gamma_s$ : grain unit weight (kN/m<sup>3</sup>).

In this study, experimental studies carried out by [Dağ \(2018\)](#) were used to control water saturation with sandstone samples. Using the diagram in Figure 5, experiments and measurements were carried out on the specimens with the desired degree of saturation.



**Figure 5.** Change with time of the degree of saturation values for sandstone samples ([Dağ, 2018](#)).

A total of 75 specimens were used for carrying out the ultrasonic velocity measurements of the rock material with 15 specimens having anisotropy orientations of ( $\beta$ ) 0, 30, 45, 60 and 90°. From a total of 375 longitudinally wave velocity ( $V_p$ ) each have been made on the sandstone specimens via ultrasonic wave experiments by taking into consideration the different degree of saturation (Sr %: 0, 25, 50, 75 and 100) and different anisotropy conditions.

#### 4. Results

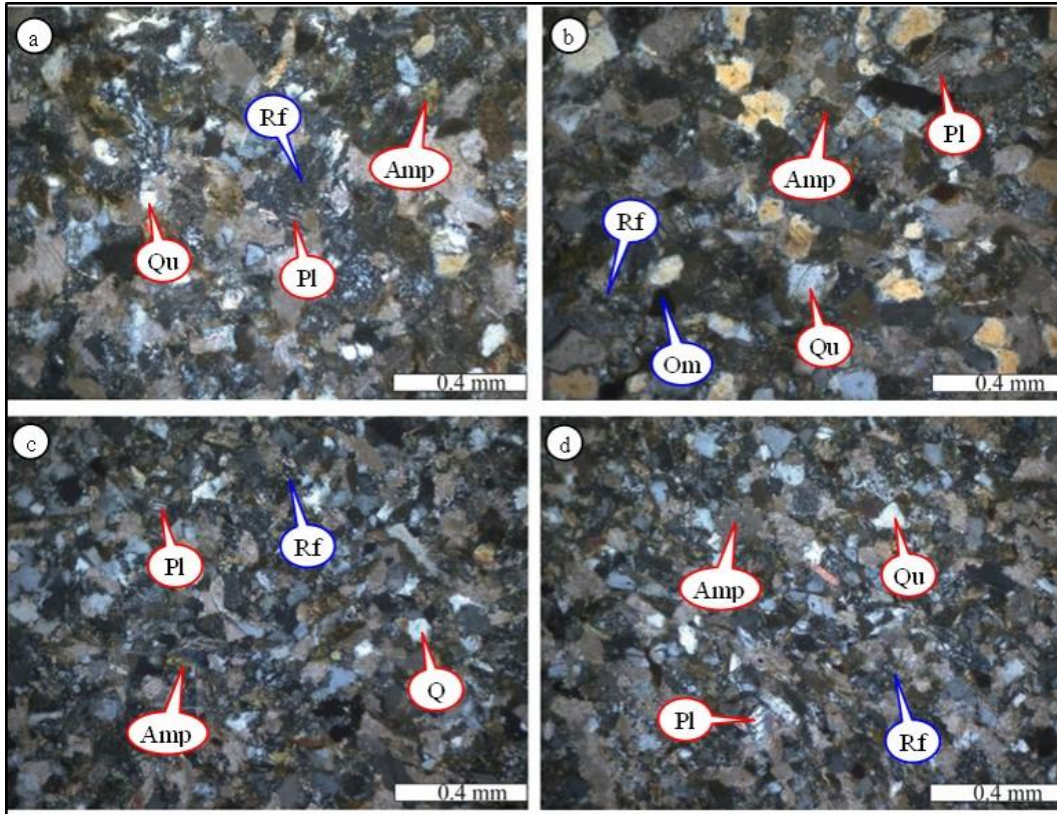
According to the grain size measurements, the grain size of the sandstone varies between 0.21–0.25 mm and it is determined that “medium sand” according to Wentworth size classification. As a result of the modal

analysis, sandstones contain quartz, feldspar (alkali feldspar, plagioclase), rock fragments (volcanic and sedimentary), opaque mineral, secondary mineral (olivine, pyroxene, amphibole, epidote), matrix and cement (Table 1, Figure 6). According to the results of the modal analysis (Folk et al., 1970) sandstones were determined as lytic subarkose and lytic arkose.

**Table 1.** Modal analysis result of sandstone samples

Smp nu	Qu %	Feldspar %		Rock Fragment %		Matrix %	Cement %	Secondary Mineral %			Om %	
		Af	Pl	Srf.	Vrf.			Ol	Amp	Pyr		Ep
1	34.3	19	1.5	11.5	3.2	16.3	10.4	0	1.8	0.8	0	1.2
2	38.4	11.7	0.7	5.9	9.9	9.8	20.6	0	1.4	0.2	0	1.4
3	30.5	14.6	0.7	7.1	1.8	20.1	20.2	2.3	0.7	0	0.2	1.8
4	34.1	13	0.3	3.7	2.5	33	8.5	1.6	0.9	0	0	2.4
5	31.2	13.2	1	3.3	4.7	26	17	1.4	0	0	0	2.2
6	33.7	13.9	0.4	5.1	2.2	26.9	13.5	1.5	0.8	0	0.3	1.7
7	32.2	13.6	0.7	5.4	1.9	26.8	13.4	3.6	0.5	0	0	1.9
8	25.5	18.3	0	7.5	2.3	3.9	36.6	2.2	0.4	0	0.5	2.8
9	34.1	13.7	0.2	6	2.1	21.9	18.9	0.9	0.3	0.1	0	1.8
10	35.5	13.7	1.7	4.3	1.9	20.8	18.1	2.4	0.1	0	0	1.5
11	31.9	17.4	2.3	4.1	2.5	21	14.6	2.3	1.9	0.1	0	1.9

Smp nu: Sample number, Qu: Quartz, Af: Alkali feldspar, Pl: Plagioclase, Srf: Sedimentary rock fragment, Vrf: Volcanic rock fragment, Ol: Olivine, Amp: Amphibole, Pyr: Pyroxene, Ep: Epidotes, Om: Opaque mineral



**Figure 6.** Petrographic images of some sandstone samples on the microscope (XPL) (Pl: Plagioclase, Amp: Amphibole, Qu: Quartz, Om: Opaque mineral, Rf: Rock fragment)

It was determined as a result of experimental studies carried out for determining the physical–mechanical properties of sandstones that the dry unit weight ( $\gamma_{dry}$ ) varies between 25.7–26.4 kN/m<sup>3</sup>, saturated unit weight ( $\gamma_{sat}$ ) varies between 25.9–26.5 kN/m<sup>3</sup>. Total porosity (n) varies between 1.2–2.6% in sandstones used in the study. It was concluded that the water absorption by weight ( $A_w$ ) varies between 0.4–0.9 % and the water absorption by volume ( $A_v$ ) varies between 1.1–2.5 % (Table 2). Pycnometer experiment was used for determining the specific gravity (Gs). One set (3 units) of pycnometer test was carried out for each block of sandstones after which their average was calculated. It was determined as a result of the pycnometer tests that the specific gravity value of the sandstones varies between 2.68–2.73 (Table 2).



**Table 2.** Physical properties of sandstones

	$G_s$	$\gamma_{dry}$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$n$ (%)	$A_v$ (%)	$A_w$ (%)
Maximum	2.73	26.38	26.51	2.65	2.53	0.95
Minimum	2.68	25.73	25.93	1.18	1.13	0.42
Average	2.71	26.04	26.23	2.25	1.92	0.72
Standard D.	0.01	0.12	0.10	0.36	0.32	0.12

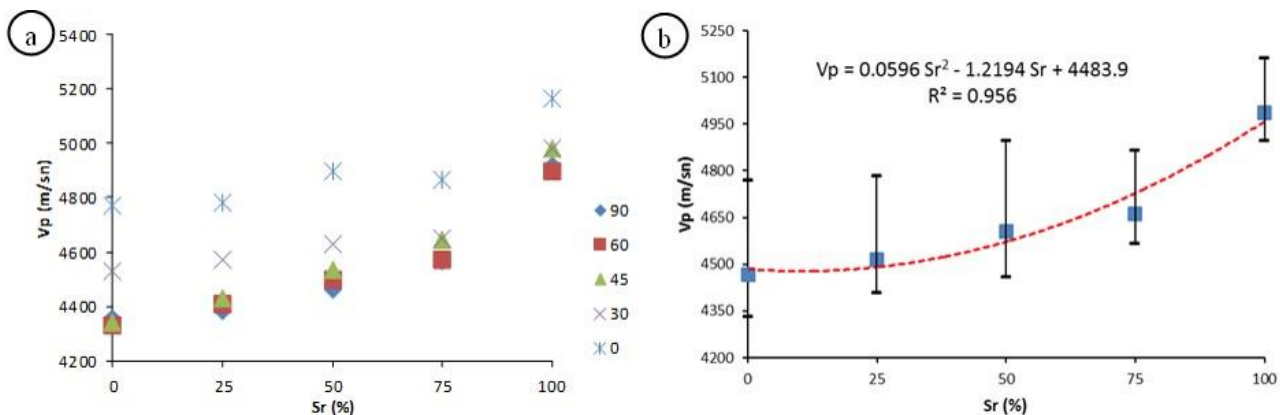
$G_s$ : Specific gravity,  $\gamma_{dry}$ : Dry unit weight,  $\gamma_{sat}$ : Saturated unit weight,  
 $n$ : Porosity,  $A_v$ : Water absorption by volume,  $A_w$ : Water absorption by weight

Ultrasonic velocity tests were performed for 5 different saturation conditions on the anisotropic sandstone specimens prepared in accordance with the guidelines suggested by ISRM (2007). A total of 75 specimens were used in order to make ultrasonic wave velocity measurements at different degrees of saturation with 15 specimens for each anisotropy orientation. The average of the P wave velocity ( $V_p$ ) measured for the sandstones was used while evaluating the test results (Table 3).

**Table 3.** Average  $V_p$  values determined for sandstones according to different anisotropy orientation and degrees of saturation

Saturation degree ( $S_r$ , %)	$V_p$ (m/sec)				
	Anisotropy orientation ( $\beta$ )				
	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$
<b>0</b>	4769	4529	4343	4330	4359
<b>25</b>	4783	4572	4432	4407	4383
<b>50</b>	4897	4629	4536	4501	4459
<b>75</b>	4865	4648	4648	4574	4566
<b>100</b>	5162	4980	4979	4897	4917

Figure 7a shows the graph of the change in the measured P wave velocity values of the specimens with different anisotropy orientations for varying saturation conditions. It was observed upon an examination of Figure 7a that the P wave velocity has increased distinctively in specimens positioned according to the  $0^\circ$  anisotropy orientation and that the values were lower for specimens positioned according to angles of  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ . P wave velocity values increased with increasing saturation degree for each anisotropy condition. Figure 7b was obtained when the average values under only different saturation conditions were taken into consideration by ignoring the anisotropy state. In this case, a regular increase was observed in P wave velocity parallel to the increase in saturation (Figure 7b). This can be understood from the fact that the regression coefficient value ( $R^2$ : 0.96) for the mathematical relationship between saturation and wave velocity values is high.

**Figure 7.** (a) Change in the P wave velocity values of the samples positioned according to different anisotropy degrees and (b) change in  $V_p$  values at different saturation conditions without taking into consideration the anisotropy state

UCS ( $\sigma_{ci}$ ) of the sandstones was determined by taking into consideration the anisotropy of rock and different saturation degree for the specimens prepared as having a length that is 2.5–3 times greater than the diameter which was then evaluated for each state separately. In addition, Ramamurthy (1993) defined the ratio of the maximum strength ( $\sigma_{ci,max}$ ) value to the minimum ( $\sigma_{ci,min}$ ) strength value as the “anisotropy ratio”. This definition as then used as the strength anisotropy ratio ( $R_{UCS}$ ) in later studies by different researchers (Kumar, 2006; Kim et al., 2016; Kundu et al., 2018).

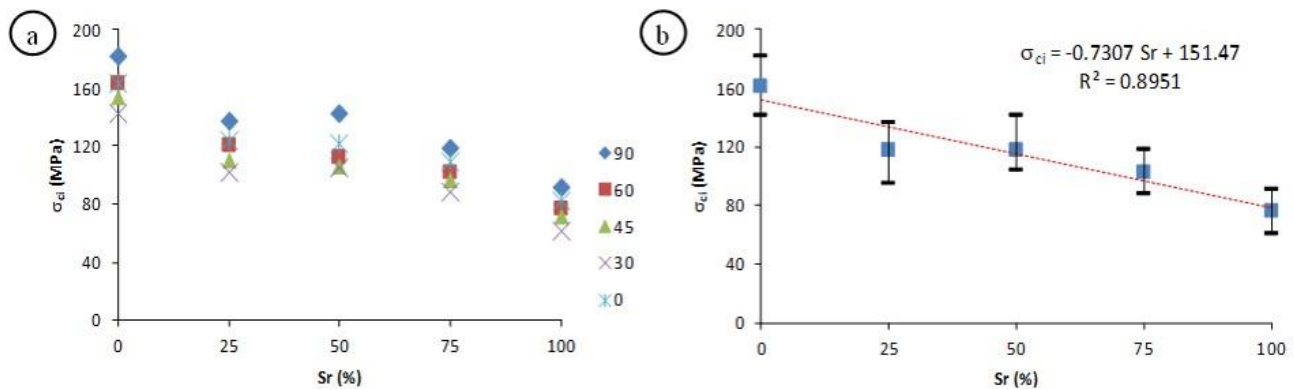
$$R_{UCS} = \frac{\sigma_{ci,max}}{\sigma_{ci,min}} \quad (2)$$

Average UCS values determined for different saturation and anisotropy conditions along with strength anisotropy ratios are given in Table 4

**Table 4.** Average UCS and strength anisotropy ratio ( $R_{UCS}$ ) values for different anisotropy orientation and degrees of saturation

Saturation degree ( $S_r$ , %)	Uniaxial compressive strength ( $\sigma_{ci}$ , MPa)					
	Anisotropy orientation ( $\beta$ )					$R_{UCS}$
	0°	30°	45°	60°	90°	
0	162.55	142.20	153.96	163.01	182.15	1.28
25	123.70	95.25	109.66	120.51	136.91	1.44
50	121.06	104.48	106.42	111.69	142.17	1.36
75	109.45	88.56	96.87	101.41	118.85	1.34
100	82.30	61.18	71.48	76.45	91.24	1.49

The change in  $\sigma_{ci}$  values determined using these values and by taking into consideration the anisotropy and different saturation state of rock has been presented as a graph in Figure 8a. In addition, another graph for the change in the average  $\sigma_{ci}$  values under different saturation degree without the inclusion of the change in anisotropy has also been prepared (Figure 8b).



**Figure 8.** (a) Change in  $\sigma_{ci}$  values measured at changing saturation conditions for the samples positioned according to different anisotropy angles and (b) change in the average  $\sigma_{ci}$  values under different saturation conditions independent of anisotropy situation

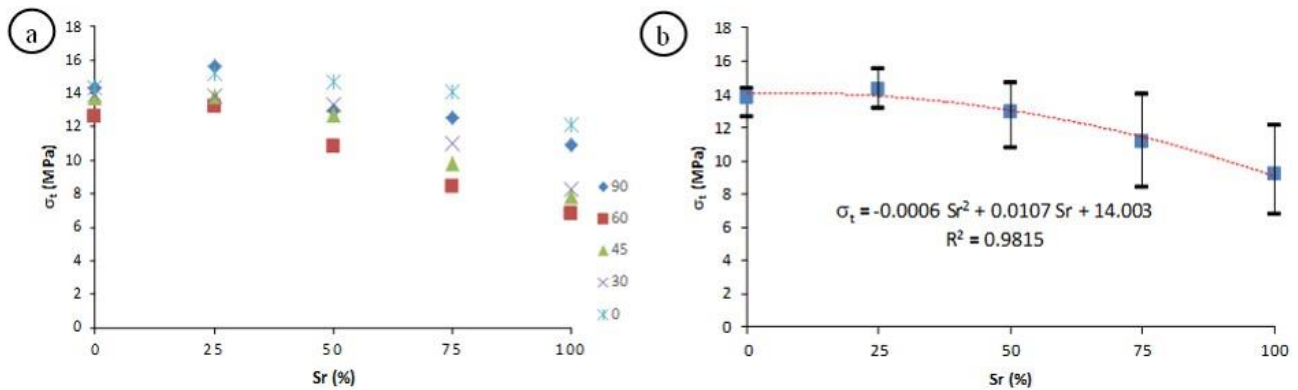
When the anisotropy situation was considered, the highest strength values for the sandstone specimens were observed in samples with an anisotropy orientation ( $\beta$ ) of 90°. Whereas the lowest strength value was observed in specimens with an anisotropy orientation of 30° (Figure 8a). In addition, it was observed upon an examination of the average values for the uniaxial compressive test results independent of anisotropy that the strength values of sandstone rock specimens decreased at a statistically significant level depending on the increase in the saturation degree (Figure 8b).

Indirect tensile strength values of the samples were determined at different saturation conditions by taking into consideration the changing anisotropy orientations. Average indirect tensile strength values have been reported in Table 5.

**Table 5.** Average indirect tensile strength values for different anisotropy orientation and degrees of saturation

Saturation degree ( $S_r$ , %)	Indirect tensile strength ( $\sigma_t$ , MPa) Anisotropy orientation ( $\beta$ )				
	0°	30°	45°	60°	90°
0	14.38	13.90	13.76	12.67	14.34
25	15.22	13.80	13.79	13.19	15.59
50	14.70	13.31	12.70	10.83	12.99
75	14.06	10.97	9.77	8.48	12.54
100	12.16	8.26	7.84	6.84	10.93

The data included in Table 5 have been evaluated in two ways similar to the previous experiment and measurement results. First of all, the changes in both load direction orientation and saturation degrees were taken into consideration and the change in indirect tensile strength values was examined (Figure 9a). Secondly, a graph was prepared for the indirect tensile strength average values determined only for different saturation degrees without allowing for any anisotropic changes in the specimens (Figure 9b).



**Figure 9.** (a) Change in  $\sigma_t$  values for the samples positioned according to different anisotropy orientation measured in changing saturation conditions and (b) change in the average  $\sigma_t$  values in different saturation conditions without considering the situation of anisotropy

It was determined that in general the indirect tensile strength values were lowest for specimens with an anisotropy orientation of 60° with the loading direction. In addition, specimens which were parallel (0°) and perpendicular (90°) to lamination had the highest indirect tensile strength values (Figure 9a). It is observed that tensile strength decreases based on increasing saturation in cases when the situation of anisotropy is not allowed for (Figure 9b).

In the study, using the regression value ( $R^2$ ), the correlation coefficient ( $r$ ) was tested both in 95 % level of significance and at  $n-2$  degrees of freedom through the equation 3 by using t-test and compared with the correlation coefficient value ( $r$ ) and critical  $r$  value of Pearson correlation coefficient.

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (3)$$

where  $t$ : t-test,  $n$ ; number of sample and  $r$ ; correlation coefficient.

In the determination of significance with t-test,  $t$  value ( $t_{cal}$ ) that was calculated from equation 3 was compared with the  $t$  value that was obtained from standard  $t$  tables ( $t_{tab}$ ) (Alkan and Dağ, 2018). Since the correlation coefficient is significant, it is required that the  $t$  value calculated from equation 3 is larger than the value of  $t$

table. In the second case, if the relation is significant, correlation coefficient having been determined for variables has to be greater than the Pearson critical r value correlation coefficient value. Within the scope of statistical studies, the evaluations related to the analysis are presented in Table 6.

**Table 6.** Validation of simple regression analysis

Relations	Sample number	Equation	R <sup>2</sup>	r	Pearson critical r	t <sub>cal</sub>	t <sub>tab</sub>
V <sub>p</sub> -Sr	5	$V_p = 0.0596Sr^2 - 1.2194 Sr + 4483.9$	0.96	0.98	0.878	8.07	2.57
σ <sub>ci</sub> -Sr	5	$\sigma_{ci} = -0.7307Sr + 151.47$	0.89	0.95	0.878	5.06	2.57
σ <sub>t</sub> -Sr	5	$\sigma_t = -0.0006Sr^2 - 0.0107 Sr + 14.003$	0.98	0.99	0.878	12.79	2.57

When Table 6 is examined, it is seen that for the V<sub>p</sub>-Sr, σ<sub>ci</sub>-Sr and σ<sub>t</sub>-Sr analysis calculated t value is larger than table t and all determined correlation coefficients were bigger than Pearson critical correlation coefficient value. This means that correlation coefficients were significant.

## 5. Discussion

Anisotropy and saturation conditions that have an impact on rock behavior were evaluated together within the scope of this study. It can be stated upon a review of relevant literature studies that there are studies which separately examine the effects of anisotropy or saturation degrees on rock behavior. However, no study was observed in the literature which examines the integrated impact of both properties. Only [Kumar \(2006\)](#) and [Kundu et al. \(2018\)](#), have taken into consideration the dry and saturated conditions while carrying out evaluations on rocks which display anisotropic characteristics. Whereas in this study, different saturations other than dry and saturated conditions have also been evaluated as a parameter different than the studies in the literature.

[Heidari et al. \(2013\)](#), carried out studies regarding the petrographic and engineering characteristics of sandstones. The dry unit weight values (γ<sub>dry</sub>) for the sandstones used in the study varied between 21.5–25.9 kN/m<sup>3</sup>, whereas the saturated unit weight values (γ<sub>sat</sub>) varied between 22.3–27.2 kN/m<sup>3</sup> and the porosity values (n) varied between 3.4–17.5 %. The dry unit weight values (γ<sub>dry</sub>) of the Mescitli sandstones used in this study varied between 25.7–26.4 kN/m<sup>3</sup>, saturated unit weight values varied between (γ<sub>sat</sub>) 25.9–26.5 kN/m<sup>3</sup> and porosity values (n) varied between 1.5–2.5 (Table 2). It can be stated that the sandstones used in this study have a more homogeneous composition, lower porosity and higher strength in comparison with those used in the study by [Heidari et al., \(2013\)](#).

[Karakul and Ulusay \(2012\)](#), examined the changes in P wave velocity of different rock types under different saturation conditions. Two tendencies were observed in P wave velocity as increase and decrease depending on increasing saturation. The decrease in P wave velocity based on the increase in saturation was pointed out to be due to the increase in clay content in the rock. In addition, the researchers have also examined in the same study the relationship under changing saturation conditions between P wave velocity and various strength characteristics such as UCS and indirect tensile strength. It was observed that the strength characteristics increased with increasing P wave velocity. In addition, it was also observed that the strength values decreased from dry to saturate.

[Ajalloeian and Lashkaripour \(2000\)](#), determined that the P wave measurements in shale and silt stones under changing anisotropy situations decreased from 0° to 90°. [Chen and Hu \(2003\)](#), carried out experimental studies on partially weak sandstones with certain amounts of smectite, illite, chlorite and kaolinite content and determined the values for UCS and wave velocity. P wave velocity values of sandstones varied between 480–4840 m/sec. UCS values varied between 0.25–18.98 MPa for different sandstone samples. These values are low in proportion to the values that were determined in literature for the same type of rocks. The increase in clay content, porosity and water content was effective in the low values for strength and wave velocity. [Török and Vásárhelyi \(2010\)](#), examined the relationship between wave velocity and UCS in both saturated and dry conditions. It was put forth that increasing wave velocity values resulted in an increase in strength values and that higher strength values were observed in dry samples. [Vásárhelyi \(2003\)](#), also carried out experimental studies on sandstone specimens in which uniaxial compressive strength, tangent and secant modulus of elasticity values were compared for both dry and saturated conditions. A linear relationship of R<sup>2</sup>: 0.91 was

determined between dry and saturated UCS values. It was determined that the UCS value decreased with a 20 % dependence on saturation in saturated specimens. It was put forth in this study in accordance with literature that the P wave velocity values increased depending on saturation (Figure 7b). Strength values also increased based on the increase in P wave velocity values for a constant saturation condition. In addition, it was also observed that the UCS values decreased depending on the increase in the saturation degree (Figure 8b).

It has generally been observed in studies in the literature which examine the impact of anisotropy on rock behavior that the highest UCS values are attained at anisotropy orientations of  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , while the lowest UCS is observed in anisotropy orientations of  $30^\circ$  (e.g. Ramamurthy, 1993; Ajalloeian and Lashkaripour, 2000; Singh et al., 2015; Kim et al., 2016; Kundu et al., 2018). In summary, previous studies have shown that the orientation of bedding planes has a clear influence on rock strength. However, the type of influence may be different depending on the rock types (Kim et al., 2016). Similarly, highest strength values have also been observed in this study for specimens that are perpendicular and parallel to lamination, while the lowest strength values were observed in samples with an anisotropy orientation of  $30^\circ$  (Table 4, Figure 8a). It was found result this study that, the curve of the strength anisotropy is U-type with a maximum strength is  $\beta=0^\circ$  or  $90^\circ$  and minimum strength is  $\beta$ =between  $20-40^\circ$  as early studies (e.g. Donath, 1964; Ramamurthy, 1993; Matsukara et al., 2002).

It was determined upon an examination of studies in the literature that strength anisotropy in sandstones has been determined as 1.56, 1.49 and 1.40 by Yaşar (2001), Zhang et al. (2010), Kim et al. (2016) respectively. In this study, the strength anisotropy of Mescitli sandstones varied between 1.28–1.49 depending on different saturation conditions (Table 4). The anisotropy ratio values obtained in both the studies in literature and in this study are close and indicate low anisotropy according to Ramamurthy (1993).

## 6. Conclusions

The literature survey shows that anisotropy and saturation have a significant impact on rock behavior. In this study, the integrated effect of changes in geomechanical properties that may occur under changing saturation conditions for Mescitli (Gümüşhane, NE Turkey) sandstones positioned according to different anisotropy orientations along with degrees of saturation and anisotropy on strength have been examined. The conclusions regarding the study are as follows.

Sandstones are included in the “low anisotropy” category when evaluated according to strength anisotropy. It was observed that the strength values of dry specimens are higher under changing anisotropy conditions and that strength values decreased significantly in saturated specimens. In addition, it was also determined that the specimens that are perpendicular and parallel to lamination have higher strength values in comparison with specimens that have various other anisotropy orientations and that the lowest strength values were determined in specimens with anisotropy orientation of  $30^\circ$ .

It was determined that the indirect tensile strength values of dry specimens under changing anisotropy conditions were higher. It was also observed that the saturated specimens had distinctively lower indirect tensile strength values. In addition, it was also determined when anisotropy conditions were taken into consideration that specimens that are parallel and perpendicular to lamination have higher tensile strength values and that the specimens with  $60^\circ$  anisotropy orientation had low tensile strength values in almost all saturation cases.

Whereas the P wave velocity values are higher for specimens that are parallel to lamination, the lowest P wave velocity values were measured in specimens that are perpendicular to lamination. Similarly, while the P wave velocity values were lower for dry specimens, increases were observed depending on saturation degree.

According to the graphs and equations related to the  $V_p$ -Sr,  $\sigma_{ci}$ -Sr and  $\sigma_r$ -Sr analysis correlation coefficients were significant statistically. The relations and equations obtained from the study are valid for Mescitli sandstones.

It was determined based on the results obtained in this study that various physical and mechanical properties of Mescitli sandstones depend on changing saturation and anisotropy conditions. Generalizations should not

be made since rock environments are anisotropic, heterogeneous and discontinuous and the results acquired in this study should not be used for rocks with similar lithologies from other regions.

### Author contribution

Zarife Gültekin: Field studies, Investigation, Laboratory studies, Writing–original draft.

Serhat Dağ: Supervision, Field studies, Investigation, Laboratory studies, Data analysis, Conceptualization, Writing–original draft.

### Declaration of ethical code

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.

### Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

### References

- Ajalloeian, R., & Lahskaripour, G.R. (2000). Strength anizotropies in mudrocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(3), 195-199. <https://doi.org/10.1007/s100640000055>
- Alkan, F., & Dağ, S. (2018). Investigation of the relations between geomechanical properties of some rocks of magmatic origins outcrop in Gümüşhane region. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 23(2), 203–216. (In Turkish). <https://doi.org/10.17482/uumfd.409184>
- Amadei, B. (1996). Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(1), 293-325. [https://doi.org/10.1006/0148-9062\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1006/0148-9062(95)00062-3)
- Batugin, S.A., & Nirenburg, R.K. (1972). Approximate relation between the elastic constants of anisotropic rocks and the anisotropy parameters. *Soviet Mining Science*, 8, 5-9.
- Behrestaghi, M.H.N., Rao K.S., & Ramamurthy, T. (1996.) Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India. *Engineering Geology*, 44(1-4), 183-201. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00069-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00069-5)
- Buosi, C., Columbu, S., Ennas, G., Pittau, P., & Scanu, G.G. (2018). Mineralogical, petrographic, and physical investigations on fossiliferous middle Jurassic sandstones from central Sardinia (Italy) to define their alteration and experimental consolidation. *Geoheritage*, 11(3), 729-749.
- Chen, C.S., & Hsu, S.C. (2001). Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34(4), 293–321. <https://doi.org/10.1007/s006030170003>
- Chen, H., & Hu, Z.Y. (2003). Some factors affecting the uniaxial strength of weak sandstones. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(4), 223-232. <https://doi.org/10.1007/s10064-003-0207-4>
- Chang, C., Zoback, M.D., & Khaksar, A. (2006). Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3-4), 223-237. <https://doi.org/10.1006/j.petrol.2006.01.003>
- Chen, X., Schmitt, D.R., Kessler, J.A., Evans, J., & Kofman, R. (2015). Empirical relations between ultrasonic p-wave velocity, porosity and uniaxial compressive strength. *Cseg Recorder*, 40(5), 24-29.
- Cho, J.W., Kim, H., Jeon, S., & Min, K.B. (2012). Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 50, 158-169. <https://doi.org/10.1006/j.ijrmms.2011.12.004>

- Columbu, S., Lisci, C., Sitzia, F., & Buccellato, G. (2017). Physical-mechanical consolidation and protection of Miocene limestone used on Mediterranean historical monuments: the case study of Pietra Cantone (Southern Sardinia, Italy). *Environmental Earth Sciences*, 76(4), 148. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6455-6>
- Çolak, K. (1998). *A study on the strength and deformation anisotropy of coal measure rocks at Zonguldak basin* [PhD. Thesis, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Dag, S. (2018). Determining the degree of saturation of rocks as a function of time: A case study from mountainous area of Turkey. *Journal of Mountain Science*, 15(10), 2307-2319. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5055-6>
- Donath, F.A. (1964). Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock, in state of stress in the earth's crust, Judd W.R. (Ed.), *In State of Stress in the Earth's* (ss.280-297). Elsevier.
- Eyüboğlu, Y., Dudas, F.O., Thorkelson, D., Zhu, D., Liu, Z., & Chatterjee, N. (2017). Eocene granitoids of Northern Turkey: polybaric magmatism in an evolving arc-slab window system. *Gondwana Research*, 50, 311-345. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.008>
- Folk, R.L., Andrews, P.B., & Lewis, D.W. (1970). Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13(4), 937-963.
- Franzini, M., Leoni, L., Lezzerini, M., & Cardelli, R. (2007). Relationships between mineralogical composition, water absorption and hydric dilatation in the "Macigno" sandstones from Lunigiana (Massa, Tuscany). *European Journal of Mineralogy*, 19(1), 113-123. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2007/0019-0113>
- Garagon, M. (2007). *Investigation of anisotropic strength and deformation properties of the selected sandstones from tertiary units of the Adana basin* [Ms. Thesis, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Gökçe, M.V. (2015). The effects of bedding directions on abrasion resistance in travertine rocks. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24(2), 196-207. <https://doi.org/10.3906/yer-1404-6>
- Gurocak, Z., Solanki, P., Alemdag, S., & Zaman, M.M. (2012). New considerations for empirical estimation of tensile strength of rocks. *Engineering Geology*, 145, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.06.005>
- Güven, İ.H. (1993). *1:250000-Scaled geology and compilation of the Eastern Pontide*. General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) of Turkey, Ankara.
- Helle, H.B., Pham, N.H., & Carcione, J.M. (2003). Velocity and attenuation in partially saturated rocks: poroelastic numerical experiments. *Geophysical Prospecting*, 51(6), 551-566. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2003.00393.x>
- He, T. (2006). *P- and S-wave velocity measurement and pressure sensitivity analysis of AVA response* [Ms Thesis, University of Alberta].
- Heidari, M., Momeni, A.A., Rafiei, B., Khodabakhsh, S., & Torabi-Kahev, M. (2013). Relationship between petrographic characteristics and the engineering properties of Jurassic sandstones, Hamedan, Iran. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(5), 1091-1101. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0333-z>
- ISRM. (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*.
- Jianhong, Y., Wu, F.Q., & Sun, J.Z. (2009). Estimation of the tensile elastic modulus using brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 568-576. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.08.004>
- Ji, S., & Marcotte, D., (2009). Correlations between Poisson's ratio and seismic wave velocities for some common rocks and sulfide ores. *Tectonophysics*, 469(1), 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.025>
- Kahraman, S. (2007). The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics*, 46(4), 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2007.05.003>
- Kandemir, R., (2004). *Sedimentary characteristics and accumulation conditions of early-middle Jurassic aged Şenköy formation nearby Gümüşhane* [PhD Thesis, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Karakul, H., & Ulusay, R. (2012). Prediction of strength properties of rocks at different saturation conditions from P-wave velocity and sensitivity of P-wave velocity to physical properties. *Hacettepe Earthscience*, 33(3), 239-268 (In Turkish).
- Karakul, H., & Ulusay, R. (2013). Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degree of saturation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(5), 981-999. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0353-8>
- Karaman, K., Kaya, A., & Kesimal, A. (2015). Effect of the specimen length on ultrasonic P-wave velocity in some volcanic rocks and limestones. *Journal of African Earth Sciences*, 112, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.09.017>
- Kaya, A., & Karaman, K. (2016). Utilizing the strength conversion factor in the estimation of uniaxial compressive strength from the point load index. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 341-357. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0721-1>
- Ketin, İ. (1966). *Tectonic units of Anatolian*. Bulletin of The Mineral Research and Exploration (MTA).
- Kim, K.Y., Zhuang, L., Yang, H., Kim, H., & Min, K.B. (2016). Strength anisotropy of Berea Sandstone: results of x-ray computed tomography, compression tests, and discrete modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(4), 1201–1210. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0820-0>
- Kumar, A. (2006). *Engineering behavior of anisotropic rocks* [PhD Thesis, Indian Institute of Technology Roorkee].
- Kundu, J., Mahanta, B., Sarkar, K., & Singh, T.H. (2018). The effect of lineation on anisotropy in dry and saturated Himalayan Schistose rock under Brazilian test conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(1), 5–21. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1300-5>
- Lezzerini, M., Franzini, M., Di Battistini, G., & Zucchi, D. (2008). The “macigno” sandstone from Matraia and Pian di Lanzola quarries (north-western Tuscany, Italy). A comparison of physical and mechanical properties. *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie Serie A*, 113, 71-79.
- Li, X., Lei, X., Li, Q., & Chen, D. (2021). Influence of bedding structure on stress-induced elastic wave anisotropy in tight sandstones. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(1), 98-113. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.003>
- Lin, C., He, J., Li, X., Wan, X., & Zheng, B. (2017). An experimental investigation into the effects of the anisotropy of shale on hydraulic fracture propagation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(3), 543-554. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1136-4>
- Matsukara, Y., Hazhizume, K., & Oguchi, C.T. (2002). Effect of microstructure and weathering on the strength anisotropy of porous rhyolite. *Engineering Geology*, 63, 39-47. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00067-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00067-9)
- Moradian, Z.A., & Behnia, M. (2009). Predicting the uniaxial compressive strength and static young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test. *International Journal of Geomechanics*, 9(1), 14-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2009\)9:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:1(14))
- Nasseri, M.H.B., Rao, K.S., & Ramamurthy, T. (2003). Anisotropic strength and deformation behavior of Himalayan schists. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 3-23. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00103-X)
- Onur, A.H., Bakraç, S., & Karakuş, D. (2012). Ultrasonic waves in mining application, In Auteliano Santos Jr. (Ed), *Ultrasonic Waves* (pp 189-211). In Tech.
- Pelin, S. (1977). *Geological survey of Alucra (Giresun) southeastern region in terms of petroleum possibilities*. Karadeniz Technical University Faculty of Earthscience Publications (In Turkish).
- Ramamurthy, T. (1993). Strength and modulus response of anisotropic rocks. In Hudson JA (Ed), *Compressive rock engineering principle, practice and projects volume 1* (pp 313–329). Pergamon Press, Oxford.
- Singh, T.N., & Sharma, P.K. (2008). A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1), 17-22. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0109-y>



- Singh, M., Samadhiya, N.K., Kumar, A., Kumar, V., & Singh, B. (2015). A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(4), 1387–1405. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0708-z>
- Tavallali, A., & Vervoort, A. (2010). Failure of layered sandstone under Brazilian test conditions: effect of micro-scale parameters on macro-scale behaviour. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(5), 641–653. <https://doi.org/10.1007/s00603-010-0084-7>
- Tavallali, A., & Vervoort, A., (2013). Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions: Layer orientation and shape effects. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5), 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.01.004>
- Tokel, S. (1972). *Stratigraphical and volcanic history of the Gümüşhane region, N.E. Turkey*. University College, London.
- Topuz, G., Altherr, R., Wolfgang, S., Schwarz, W.H., Zack, T., Hasanözbek, A., Mathias, B., Satır, M., & Şen, C. (2010). Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane pluton (NE Turkey). *Lithos*, 116(1-2), 92-110. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.01.003>
- Török, A., & Vásárhelyi, B. (2010). The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*, 115(3-4), 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.01.005>
- Vásárhelyi, B. (2003). Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in dry and saturated conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(3), 245-249. <https://doi.org/10.1007/s10064-002-0186-x>
- Wang, P., Cai, M., Ren, F., Li, C., & Yang, T. (2017). Theoretical investigation of deformation characteristics of stratified rocks considering geometric and mechanical variability. *Geosciences Journal*, 21, 213–222. <https://doi.org/10.1007/s12303-016-0052-7>
- Yaşar, E. (2001). Failure and failure theories for anisotropic rocks. *17th international mining congress and exhibition of Turkey (IMCET)* (pp 417–424).
- Yin, Q., Jing, H., & Su, H. (2018). Investigation on mechanical behavior and crack coalescence of sandstone specimens containing fissure-hole combined flaws under uniaxial compression. *Geosciences Journal*, 22, 825–842. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0081-x>
- Yücel, Ö. (2012). *Evaluation of the usefulness and performance of the core strangle test (cst) for determination of the strength anisotropy in rocks* [Ms Thesis, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Zhang, X.M., Yang, F., & Yang, J.S. (2010). Experimental study on anisotropic strength properties of sandstone. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1325–1335.

## Maden sektörü iş sağlığı ve güvenliği mevzuatının karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi

*Comparative analysis and evaluation of occupational health and safety legislation in mining*

Aydanur GÜNGÖR GÖKBOĞA\*<sup>1</sup> , Muhammet Mustafa KAHRAMAN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Gümüşhane

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul

• Geliş tarihi / Received: 02.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 27.05.2023

### Öz

Çalışma koşullarının ağır, iş kazalarının fazla olduğu aynı zamanda da beden gücünün fazlasıyla kullanıldığı maden ocaklarında 18. yüzyılda sanayi devrimiyle beraber makineleşme artmıştır. Artan dünya nüfusu ve sanayileşme sebebiyle maden ve metallerle olan talepler artmış ve ilk etapta üzerinde çok durulmayan iş sağlığı ve güvenliği konusu sanayinin geliştiği ülkelerde maddi kayıpların artışına neden olmuştur. Birçok insanın maden kazalarında öldüğü büyük felaketler sonrasında daha fazla gündeme gelmiştir. Yaşanan bu sorunlar üretimin ve verimin düşmesini de getirmiştir. Verimliliği arttırmak amacıyla iş güvenliğiyle ilgili kanunların çıkması ve iyileştirilmelerin yapılması gündeme alınmıştır. Türkiye'ye baktığımızda ise yakın geçmişte iş sağlığı ve güvenliği konusunda Avrupa Birliğine uyum amacıyla 2012 yılında kabul edilen ve yürürlüğe giren 6331 sayılı kanun iş güvenliği konusunda en kapsamlı çalışmadır. Ancak bu değişiklikler beklendiği gibi iş kazalarında istenen azalmayı sağlamamıştır. Bu çalışmada, madencilik faaliyetlerini güvenli ve verimli şekilde yapan ülkelerden bazıları olan; Amerika Birleşik Devletleri'nin ve Avustralya'nın madencilik sektöründeki yasal mevzuatlar ve maden iş kazalarına ilişkin istatistiksel bilgiler incelenmiştir. Bu ülkelere ait olan madencilikle alakalı mevzuat ve istatistikler Türkiye'nin bu alandaki yasal mevzuatları ve istatistikleriyle karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Son olarak ise yasal mevzuatın madencilikte iş güvenliğine olan etkisi tartışılmış ve öneriler sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** İş sağlığı ve güvenliği, İş sağlığı ve güvenliği kanunu, Madencilik, Yasal mevzuatlar

### Abstract

In the 18th century, with the industrial revolution, mechanization increased in mines. Working conditions in these mine operations were heavy, work accidents occurred often, and body power was used excessively at that time. Due to the increasing world population and industrialization, the demands for mines and metals have increased and the issue of occupational health and safety, which was not emphasized much in the first place, caused an increase in financial losses in the developed countries. It has come to the fore more after major disasters in which many people died in mining accidents. These issues have also brought about a decrease in production and efficiency. In order to increase productivity, enacting laws related to occupational safety and improving the safety performance was taken into consideration. In Turkey, the law numbered 6331, which was adopted and entered into effect in 2012 for the purpose of alignment with the European Union on occupational health and safety, is the most comprehensive study on occupational safety to date in this country. However, these changes did not provide the desired decline in occupational accidents as expected. In this study, United States and Australia were selected as two countries with better occupational safety track records for comparison with Turkey. Mining-related legislation and statistics belonging to these countries have been compared and evaluated with Turkey's legal regulations and occupational performance in this field. Finally, the effect of legal legislation on occupational safety in mining was discussed and suggestions were presented.

**Keywords:** Occupational health and safety, Occupational health and safety law, Mining, Legislation

## 1. Giriş

### 1. Introduction

M.Ö. 2000’li yıllara bakıldığında iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında Hammurabi tarafından inşaat sektörüne dair Hammurabi Kanunları çıkarıldığı görülmektedir. Antik Yunan döneminde Herodot işçi sağlığı ve güvenliği açısından işçilerin verimli bir şekilde çalışmalarını için sağlıklı ve yüksek enerjili besinler ile beslenmeleri gerektiğini savunmuştur. Zamanla Nicander meslek hastalıkları ve ortam risklerinin belirlemenin beraberinde önlemler alınması gerektiğinden bahsetmiştir. Plini ise tozlu ortamların oluşturabileceği zararlardan korunabilmek için çalışanların kafalarına torba geçirmeleri gerektiğini söylemiştir (Çiçek ve Öçal, 2016).

Deneylerin ve gözlemlerin ağırlık kazandığı Rönesans döneminde Bernardino Ramazzini’ni tarihte ilk meslek hastalıkları kitabı olan “De Morbis Artificum Diatriba” eseri ile günümüzde iş sağlığının babası olarak anılmaktadır. Bernardino Ramazzani, meslek hastalıklarının hastanelerde değil işyeri ortamında incelenmesi gerektiğini savunmuştur. İngiltere’de Sanayi Devrimi ile beraber çalışma hayatında yeni teknolojik gelişmelere ayak uydurmaya çalışırken iş kazalarında, zehirlenmelerde, çalışma ortamındaki patlamalarda, yaralanmalarda artış yaşanmıştır. 19. yy’da yaşanan bu gelişimler kömürle çalışan buharlı makinelerin artışıyla beraber kömüre olan ihtiyacı arttırmıştır. Kömüre bağlılığın artmasıyla beraber kömür üretiminde artış olmuş ve bununla beraber çalışma süreleri, kadın ve çocuk işçi çalıştırma durumları da artarak çalışma koşullarının kötüye gitmesine sebep olmuştur. Söz konusu olan bu kötüye gidişe dur demek adına ilk yasal düzenlemeler İngiliz Parlamentosu tarafından kömür ocaklarında yapılmıştır. Kadın ve çocukların kömür ocaklarında yaşanan olumsuzluklardan etkilenmemesi için düzenlemeler yapılması gerektiğine kanaat getirilmiştir. Ardından aynı yıl içerisinde iyileştirici kararlar alınmıştır (Çiçek & Öçal, 2016; Kaynak & Torun, 2015).

Madencilik, geçmişte tarih öncesi çağlara dayanan ve halen günümüzde de dünyanın birçok bölgesinde faaliyet gösteren bir sektördür (Yaşar vd., 2015). 18. yy’da sanayi devrimiyle beraber insan gücünün fazlasıyla kullanılmakta olduğu madencilik sektöründe makineleşmeyle beraber insan ve hayvan gücü kullanımına ek olarak özellikle sanayileşen toplumlarda makinelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu gelişmeler ile birlikte üretim miktarına bağlı olarak da sektörde çalışan sayısının artmasıyla beraber iş kazalarında, ölümlerde ve meslek hastalıklarında artışlar yaşanmaya başlamıştır (Karaahmetoğlu, 2020).

İş güvenliği açısından incelendiğinde alınan önlemleri belirlemek, meslek hastalıklarını önleyebilmek, mevcut durumu net olarak tespit etmek adına istatistikler önemli bir yere sahiptir. Dünyada kömür üretiminin yaklaşık %72’si ABD (Amerika Birleşik Devletleri), Çin, Rusya ve Avustralya’da gerçekleşmektedir. Türkiye ise dünya üretiminin yaklaşık %1’lik kısmını oluşturmaktadır (Kahraman, 2019). Türkiye’de üretilen 1 milyon ton kömür başına düşen ölüm oranı 0.246 iken; ABD’de bu oran 0.022’ye düşmektedir (Bilim, 2015). Madencilik sektöründe gelişmiş ülkelerden olan ABD ve Avustralya incelendiğinde madencilik sektöründe kullandıkları iş güvenliği kanunları ve maden işletmelerinin gerçekleştirdiği uygulamalar sayesinde sektöre ait iş kazaları oranının düşük olduğu görülmektedir (Sökmen, 2019). Bu ülkeler geçmiş yıllarda İSG kanunlarında yaptıkları değişiklikler ve başarılı uygulamalar ile bu istatistiklere ulaşmışlardır. Ancak Türkiye’de ise kanun ve mevzuatlarda yapılan bunca değişikliğe rağmen maden sektörü halen yüksek kaza oranlarına sahiptir. Konuyla ilgili literatür incelendiğinde madencilik sektöründe gelişmişlik seviyesi yüksek olan ülkelerde kullanılan kanunların ve sistemlerin yeterince incelenmediği; ülkemizle bu mevzuatların içeriklerinin karşılaştırılmadığı görülmektedir. Bu çalışma ülkemizdeki madencilik sektörü tarafından kullanılmakta olan kanun ve mevzuatların içeriğinin incelenmesi ve mevcut uygulamaların diğer ülkelerle karşılaştırılmasını konu almaktadır.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

Bu çalışmada madencilik sektöründe gelişmiş olan ülkelerden ABD ve Avustralya’nın Queensland eyaletine ait (kayıp zamanlı iş kazası, yıllık olarak ortalama maden ocaklarında çalışan madenci sayısı, meydana gelen iş kazası sonrası yaşanan ölümler ve yıllık kömür üretim miktarı) veriler Türkiye ile kıyaslanarak ülkelerin yürürlükte bulunan madencilik sektörüyle alakalı kanunları incelenmiştir. Yöntemin aşamaları;

Çalışma da kullanmak için veriler, Avustralya için veriler Safe Work Australia ve Australian Bureau of Statistic, Queensland eyaleti için Queensland Government, ABD için veriler MSHA ve NIOSH ve son olarak

Türkiye için SGK ve T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nda paylaşılmış olan veriler toplanmıştır. Bir araya getirilmiş olan veriler ayıklanıp çalışmada kullanılmayacak olan veriler ve hatalar ayıklanmıştır.

Ülkelerde çalışmakta olan madenci sayısı ve yıllık üretim miktarlarının eşit olmaması sebebiyle yapılacak karşılaştırmayı anlamlı hale getirmek için küresel performans göstergeleri (yılda bir milyon çalışan başına düşen ölüm sayısı ve kömür milyon ton üretim başına düşen ölüm sayısı gibi) hesaplanarak verilere eklenmiştir.

Araştırma da ham veriler üzerinde daha anlamlı sonuçlar için analizler yapılmıştır. Bu analizlerin sonucunda ülkelerde kullanılmakta olan kanunların yeterliliği, iş kazalarında olan artışlara-azalışlara etkisi incelenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda alınması gereken önlemler hakkında bilgi sağlanması amaçlanmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3. Results

Bu bölümün birinci kısmında ABD, Avustralya ve Türkiye'nin iş sağlığı güvenliği alanında tarihsel süreçleri, hukuki alt yapıları ve genel durumları incelenmiştir. İkinci kısımda ise son yıllara ait iş sağlığı ve güvenliği performanslarına ait bilgiler ve toz kontrol, havalandırma ve eğitim gibi maden sektöründe önemli bazı başlıklar incelenerek karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Ülkelerin genel durumu ve hukuki alt yapısı

##### 3.1 General situation and legal infrastructure of countries

##### 3.1.1. Türkiye

###### 3.1.1. Turkey

Bu bölümde Türkiye'de iş sağlığı güvenliğinin tarihsel gelişimi, hukuki alt yapısı ve genel durumu incelenmiş bulgular paylaşılmıştır.

##### 3.1.1.1. Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliğinin gelişimi

###### 3.1.1.1. Development of occupational health and safety in Turkey

Osmanlı dönemine bakıldığında madencilik sektörü için ilk olarak 1867-1921 yılları arasında uygulanan Dilaver Paşa Nizamnamesi çıkarılmıştır. Sadece Ereğli'de uygulanan bu kanunda hafta sonu tatili olmaksızın işçilerin günde 10 saat çalıştırılacakları kararı alınmıştır. Ereğli'de yaşayan halktan 13-50 yaş aralığında bulunan sağlıklı ve sakat olmayan erkeklerin maden ocaklarında çalışma zorunluluğu olduğu kararlaştırılmıştır (Çelikel Yiğitel, 2019).

1869 yılında Dilaver Paşa Nizamnamesinde bulunan eksiklikler Maadin Nizamnamesinin çıkarılmasıyla ortadan kaldırılmış ve maden ocaklarında zorunlu çalışma ortadan kaldırılıp bütün Osmanlı Devleti'nde uygulamaya başlanmıştır (Özveri, 2015). Cumhuriyetin ilan edilmesinden önce İzmir İktisat Kongresinde alınan karara göre; amele ifadesinin kaldırılıp işçi kavramının kullanılmasına, çalışma saatinin 8 saate düşürülmesine karar verilmiş ve Cumhuriyetin ilanından sonra 1924 yılında haftada bir gün tatil hakkı verilmiştir (Çelikel Yiğitel, 2019).

1971 yılında tam anlamıyla İSG kanunu olmamasına rağmen 1475 sayılı İş Kanunu çıkarılmış ve bu kanunda iş güvenliğine değinilmiştir (Çiçek & Öçal, 2016). 1475 sayılı iş kanunu ihtiyaca cevap vermediği için 2003 yılında 4857 sayılı iş kanunu ve nihayetinde iş sağlığı ve güvenliğine dair yönetmelikler ve tüzükler çıkarılmıştır. 2012 yılında ise Avrupa Birliğine uyum sağlayabilmek amacıyla 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği kanunu yürürlüğe girmiştir (Özveri, 2015).

### 3.1.1.2. Türkiye madencilik sektöründe iş sağlığı ve iş güvenliği açısından hukuki altyapısı ve genel durumu

3.1.1.2. *Legal interests and the general situation in terms of occupational health and safety in the Turkish mining sector*

Türkiye’de madencilik sektörü için özel olarak hazırlanmış bir kanun bulunmamaktadır. Ülkemizde 6331 sayılı İSG kanunu madencilik sektörü de dahil olmak üzere bütün sektörler tarafından kullanılmaktadır.

**Tablo 1.** Türkiye’de madencilik sektöründe kullanılan genel iş sağlığı ve iş güvenliği mevzuatları.  
**Table 1.** *General occupational health and safety legislation used in the mining sector in Turkey.*

Mevzuatlar	
Kanun ve Yönetmelikler	6331 Sayılı İş Sağlığı ve İş Güvenliği Kanunu
	28512 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Hizmetleri Yönetmeliği
	28532 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kurulları Hakkında Yönetmelik
	28453 Sayılı Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Yönetmeliği
	28713 Sayılı İşyeri Hekimi ve Diğer Sağlık Personelinin Görev, Yetki, Sorumluluk ve Eğitimleri Hakkında Yönetmelik
	28512 Sayılı İş Güvenliği Uzmanlarının Görev, Yetki, Sorumluluk ve Eğitimleri Hakkında Yönetmelik
	28750 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği ile İlgili Çalışan Temsilcisinin Nitelikleri ve Seçilme Usul Ve Esaslarına İlişkin Tebliğ
	28648 Sayılı Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik
	28770 Sayılı Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği
	28633 Sayılı Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik

Tablo 1’de görüldüğü üzere madencilik sektörüne özel Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği bulunmakta, bunun dışında özel bir kanun da bulunmamaktadır.

### 3.1.2. Avustralya

#### 3.1.2. *Australia*

Bu bölümde Avustralya’da iş sağlığı güvenliğinin tarihsel gelişimi, hukuki alt yapısı ve genel durumu incelenmiş bulgular paylaşılmıştır.

#### 3.1.2.1. Avustralya’da iş sağlığı ve güvenliğinin gelişimi

##### 3.1.2.1. *Development of occupational health and safety in Australia*

Avustralya’da erken yaşanan endüstri gelişimi beraberinde sektörlerde meydana gelen risklerin ve meslek hastalıklarının artışına sebebiyet vermiştir. Bu artışla beraber Avustralya’da 1829 yılında devlet çalışanları korumak amacıyla yasalarda değişikliğe gitmiştir. 1851 yılında altının keşfedilmesiyle maden ocaklarında, düşme sonucu ölmeler, su baskınları, çökmeler gibi kazaların arttığı bilinmektedir. Birinci Dünya Savaşı sonrası üretimin ve çalışma ortamındaki verimin artırılması amacının doğmasıyla beraber iş güvenliği ve meslek hastalıkları konusunda gelişmelerin yaşandığı bilinmektedir (Smith & Leggat 2004).

1972 yılında Robens Raporunun yayınlanması çalışma hayatı için önemli gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Bu raporda iş sağlığı ve güvenliğindeki noksanlıklar belirlenmiş ve kural koyucu olmayan bir mevzuatın oluşturulması gerektiğine değinilmiştir (History of OHS, t.y.).

Günümüzde ise Avustralya’da iş sağlığı ve güvenliği yönetimi eyaletler ve yerel yönetimler tarafından gerçekleştirilmektedir. Doğası gereği her eyaletin kendine özgü riskleri var anlayışıyla benzer endüstriler olsa dahi eyaletlere özel farklı mevzuatlar bulunmaktadır (Smith & Leggat, 2005).

### 3.1.2.2. Avustralya madencilik sektöründe iş sağlığı ve iş güvenliği açısından hukuki altyapısı ve genel durumu

#### 3.1.2.2. Legal infrastructure and the general situation in terms of occupational health and safety in the Australian mining sector

Avustralya'da madencilik sektörüyle ilgili mevzuatlar hükümet tarafından düzenlenmemektedir. Eyaletler ve bölgeler bu mevzuatları kendileri düzenlemektedir. Eyaletlere bakıldığında ise madencilik sektörü için ilk kanun 1994 yılında Batı Avustralya'da Mines Safety and Inspection Act (Maden Güvenliği ve Denetimi Yasası) çıkarılmıştır. Daha sonra 1999 yılında kömür üretiminde Avustralya için önemli bir yere sahip olan Queensland eyaletinde Mining and Quarrying Safety and Health Act (Maden ve Taş Ocakçılığı Güvenlik ve Sağlık Yasası), Coal Mining Safety and Health Act (Kömür Madenciliği Güvenlik ve Sağlık Yasası) yürürlüğe girmiştir. Tablo 2'de Avustralya'da eyaletlere ait mevcut maden iş sağlığı güvenliği mevzuatları yer almaktadır.

**Tablo 2.** Avustralya'da eyaletlerin madencilik sektöründe kullandığı iş sağlığı ve iş güvenliği mevzuatı ([Safe Work Australia, t.y.](#)).

**Table 2.** Occupational health and safety legislation used by Australian states in the mining sector ([Safe Work Australia, t.y.](#)).

Eyaletler	Kanunlar ve Yönetmelikler
Yeni Güney Galler	Work Health and Safety (Mines and Petroleum Sites) Act 2013
Victoria	Health and Safety (Mines and Petroleum Sites) Regulation 2014 Chapter 5.3 of the Occupational Health and Safety Regulations 2017
Queensland	Mining and Quarrying Safety and Health Act 1999, Mining and Quarrying Safety and Health Regulation 2017, Coal Mining Safety and Health Act 1999, Coal Mining Safety and Health Regulation 2017
Batı Avustralya	Mines Safety and Inspection Act 1994, Mines Safety and Inspection Regulations 1995
Güney Avustralya	Chapter 10 of the Work Health and Safety Regulations 2012 (SA)
Tazmania	Mines Work Health and Safety (Supplementary Requirements) Act 2012, Mines Work Health and Safety (Supplementary Requirements) Regulations 2012
Avustralya Başkent Bölgesi	Work Health and Safety Act 2011, Work Health and Safety Regulation 2011
Kuzey Bölgesi	Work Health and Safety (National Uniform Legislation) Act, Chapter 10 of the Mines Work Health and Safety (National Uniform Legislation) Regulations

Avustralya'da aktif kömür madeni ve kömür rezervi olarak Queensland eyaleti kömürün çıkarılması açısından önemli bir yere sahiptir ([Aktan vd., 2016](#)). Bu çalışmada Avustralya'daki bütün eyaletler yerine özellikle kömür sektörü açısından kapsamlı bir mevzuata sahip olan Queensland eyaleti göz önünde bulundurulmuştur.

### 3.1.3. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)

#### 3.1.3. United States of America (USA)

Bu bölümde Amerika Birleşik Devletleri'nde iş sağlığı güvenliğinin tarihsel gelişimi, hukuki alt yapısı ve genel durumu incelenmiş ve bulgular paylaşılmıştır.

#### 3.1.3.1. ABD'de iş sağlığı ve güvenliğinin gelişimi

##### 3.1.3.1. Development of occupational health and safety in the USA

Sanayi devrimi neticesinde Amerika'da çalışanlara yeni çalışma alanları sunulmuştur ancak diğer ülkelerde olduğu gibi önlem almama ve insan haklarına aykırı çalışma saatleri ve çalışanların yeni düzene alışamaması gibi sorunlar iş kazalarının artışına sebebiyet vermiştir. ABD tarihine baktığımızda iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili ilk düzenlemeler 1867 yılında Massachusetts eyaletinde yapılmıştır ([Baradan, 2006](#)).

ABD’de maden ocaklarında yaşanmakta olan kazaların önüne geçmek için 1872 yılında Maden Arama Kanunu yürürlüğe girmiştir. 1907 yılında ise Monongah Kömür Madeninde 362 madencinin hayatını kaybetmiş olması maden ocaklarında eksikliklerin neler olduğuna dair bir araştırılma yapılmasını sağlamıştır (Karahmetoğlu, 2020).

1971’de ABD’de yasallaşma süreci için önemli bir yere sahip olan OSHA (Occupational Safety and Health Administration) birimi kurulmuştur. Ardından 1977 tarihli Federal Maden Güvenliği ve Sağlığı Yasası’nın hükümlerini yönetmek üzere MSHA (Mine Safety and Health Administration) kurulmuştur (Significant Events in OHS, t.y.). Federal Maden Güvenliği ve Sağlığı Yasası’nın yürürlüğe girmesinin ardından 2006 yılında Maden İyileştirme ve Yeni Acil Müdahale Yasası (Miner Act) yürürlüğe girmiştir (Sökmen, 2016).

ABD 1971 yılında OSHA’nın yürürlüğe girmesiyle beraber buna müteakiben 1977 yılında Federal Maden Güvenliği ve Yasası yürürlüğe girmiştir. Madencilik sektöründe meydana gelen ölümleri, yaralanmaları, hastalıkları önlemek amacıyla ABD Çalışma Bakanlığına bağlı MSHA kurulmuştur (MSHE, t.y.). Tablo 3’te ABD’de maden sektörüne yönelik mevcut mevzuatlar yer almaktadır.

**Tablo 3.** Amerika’da madencilik sektöründe kullanılan iş sağlığı ve iş güvenliği mevzuatları (MSHA, t.y.)  
**Table 3.** Occupational health and safety legislation used in the mining sector in the USA (MSHA, t.y.)

İlgili Mevzuat	
Kanunlar	1952 - Federal Coal Mine Safety Act
	1966 - Federal Metal and Nonmetallic Mine Safety Act
	1969 - Federal Coal Mine Health and Safety Act (Coal Act)
	1977 - Federal Mine Safety and Health Act (Mine Act)
	2006 - Mine Improvement and New Emergency Response Act (Miner Act)

1977 yılında Federal Maden Güvenliği ve Yasası’nın yürürlüğe girmesinin ardından ABD tarihinde madencilik sektöründe trajedik bir yere sahip olan ve 13 madencinin Sago Kömür Maden ocağında mahsur kalma faciası 2006 yılında Maden İyileştirme ve Yeni Acil Müdahale Yasasının yürürlüğe girmesine sebep olmuştur (Madsen, 2009).

### 3.1.3.2. Yeni mevzuatların sektöre etkisi

#### 3.1.3.2. Impact of new legislation on the sector

Özellikle son yıllarda yaşanan büyük facialar sonrasında (Sago, Soma) sosyal ve sorumluluk amacıyla atılan adımların birçok kez yasal düzenlemelere dönüştüğünü söylemek mümkündür. Ancak atılan bu adımların sektöre olan etkilerinin sonuçlarını orta ve uzun vadede görmek mümkün olabilmektedir. Şekil 1’de bu üç ülkede İSG kanunlarının çıkarılmasının ardından ölümlü kazalarda yaşanan değişim gösterilmektedir. Bu şekil kanunların İSG performansına ilerleyen süreçte bir etkisi olup olmadığını göstermek amacıyla hazırlanmıştır. Şekil 1’e incelendiğinde ABD, Avustralya ve Türkiye’de kanunların çıkarılmasından sonra iş kazası sonucu ölüm sayılarının yüzdelik değişimi yer almaktadır. Bu şekle göre ABD ve Avustralya da yasal değişikliklerden sonra yaklaşık %50 oranında azalma görülmektedir. Ancak Türkiye de ise kanun değişikliğinden hemen sonra gerçekleşen Soma faciası şekilde ayrıca bir anomali oluştursa da; ilk altı yıl boyunca kanun yılı ve öncesine göre de daha yüksek ölümlü kaza gerçekleşmiştir.



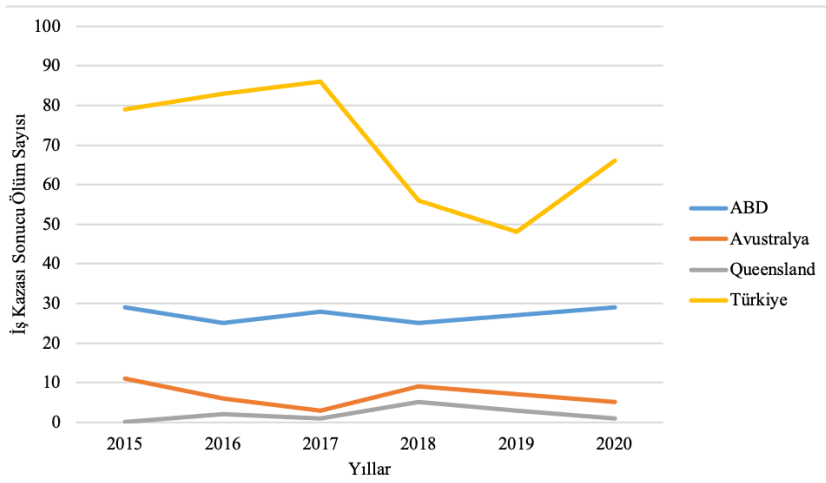
**Şekil 1.** Ülkelerde ilgili kanunların yürürlüğe girmesinden sonraki birkaç yıl boyunca madencilik sektöründe meydana gelen ölümlü iş kazalarının yüzdelik değişimi (SGK, t.y.; MSHA, t.y.; Safe Work Australia, t.y.).

**Figure 1.** Change in the percentage of fatal occupational accidents in the mining sector in the few years following the implementation of relevant regulations in the countries (SGK, t.y.; MSHA, t.y.; Safe Work Australia, t.y.).

### 3.2. Madencilik sektörü iş sağlığı ve güvenliği performanslarının ve mevzuatların karşılaştırılması

#### 3.2. A comparison of mining industry occupational health and safety performance and regulations

Madenciliğin gerekli önlemler alınmaması halinde birçok tehlikeyi bulunduran bir sektör olduğu bilinmektedir. Hatta zaman zaman ölümcül kazaların maalesef yaşandığı acı bir gerçektir. Şekil 2’de karşılaştırılan üç ülkede 2015-2020 yılları arasında maden sektöründe yaşanan ölümlü kaza istatistikleri verilmiştir.



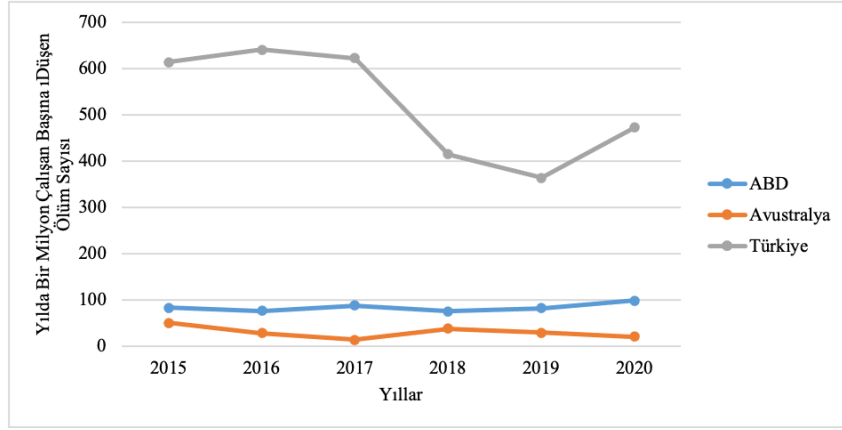
**Şekil 2.** Ülkelerin madencilik sektöründe iş kazası sonucu ölüm sayıları (SGK, t.y.; MSHA, t.y.; Safe Work Australia, t.y.; Queensland Government Publications Portal, t.y.).

**Figure 2.** Number of deaths due to occupational accidents in the mining sector of countries (SGK, t.y.; MSHA, t.y.; Safe Work Australia, t.y.; Queensland Government Publications Portal, t.y.).

ABD’de yıllık ortalama 27 madenci iş kazası sonucu hayatını kaybederken yıllara göre bu sayının doğrusal seyrettiği görülmektedir. Avustralya ve Queensland’da da ABD’de olduğu gibi önemli bir değişiklik bulunmamaktadır. Avustralya’da yıllık ortalama 7 madenci hayatını kaybederken bu sayı Queensland için 2’ye düşmektedir, bazı yıllarda (2015, 2020) ölümlü kazanın hiç gerçekleşmediği görülmektedir. Türkiye’ye baktığımızda ise yıllık ortalama 80 madenci iş kazası sonucu hayatını kaybetmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken noktalardan birisi ABD ve Avustralya Türkiye’ye oranla çok daha büyük hacimde maden üretimine ve çalışan sayısına sahip olmasına rağmen yaşanan kaza ve ölüm sayılarının Türkiye’den çok daha az olduğudur. Yukarıda Şekil 2’de üretilen ton miktarına göre normalleştirilmediği takdirde aslında yaşanan



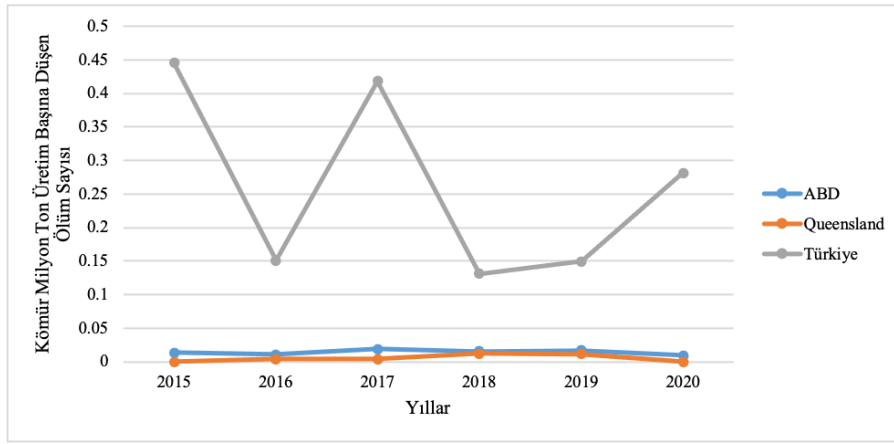
ölümlü kaza oranları arasındaki fark çok ayırt edilemeyebilir. İSG dünyasında yaygın kullanılan ve çalışan sayılarının eşitlenerek ölüm sayılarının hesaplandığı gösterge (bir milyon çalışan başına düşen ölüm sayısı) Şekil 3'te yer almaktadır. Bir milyon çalışan başına düşen ölüm sayısına bakıldığında Türkiye'de meydana gelen ölümlü kaza sayılarının 2 yıl için düştüğü görülse de hemen sonrasında bu düşüşün tekrar yükselmeye başladığı görülmektedir. Dünya maden sektöründe üretim açısından önemli bir yere sahip olan ve yıllık olarak yaklaşık 450 milyon ton kömür üretimi yapan Avustralya'nın bütün eyaletlerine ait İSG istatistikleri göz önünde bulundurulduğunda şekilde de görüldüğü üzere madencilik sektöründe yılda bir milyon çalışan başına düşen ölüm sayısının Türkiye'ye kıyasla oldukça düşük bantlarda olması dikkat çekicidir.



**Şekil 3.** Ülkelerin madencilik sektöründe yılda bir milyon çalışan başına düşen ölüm sayısı (Australian Bureau of Statistics, Bureau of Labor Statistics, t.y.; MSHA, t.y.; Safe Work Australia, t.y.; SGK, t.y.).

**Figure 3.** Number of deaths per million workers per year in the mining sector in countries (Australian Bureau of Statistics, Bureau of Labor Statistics, t.y.; MSHA, t.y.; Safe Work Australia, t.y.; SGK, t.y.).

Mevcut kanun ve yönetmelikler kullanımdayken kömür sektörü için üretim miktarına bağlı ölüm sayıları üzerinden ülkelere ait İSG performansları Şekil 4'te yer almaktadır. Bu grafik incelendiğinde Türkiye'de bu rakamın ABD ve Queensland/Avustralya'ya göre oldukça yüksek olduğu ve kömür üretim miktarının diğer ülkelere oranla yüksek olmamasına rağmen ölümlü kaza sayılarında düzensiz artış ve azalışların olduğu görülmektedir. Diğer yandan ABD ve Queensland'da ise çok yüksek oranda maden kazası olmadığı ve buna bağlı olarak ölüm sayılarının çok düşük olduğu ve doğrusal şekilde ilerlediği görülmektedir (Şekil 4). Bu istatistiklere göre Türkiye'de üretilen ortalama her beş milyon ton kömürde bir can kaybı yaşanmaktadır. Bu kadar yüksek can kaybının yaşanmasında doğası gereği daha tehlikeli bir ortama sahip yer altı işletmelerinde kömür üretiminde yeterli iş sağlığı güvenliği önlemlerinin alınmaması ve insan gücünün daha fazla kullanılması akla gelen ilk sebepler arasında olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.** Kömür milyon ton üretim başına düşen ölüm sayısı (Bureau of Labor Statistics, t.y.; MSHA, t.y.; SGK, t.y.; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, t.y.; Queensland Government Open Data, t.y.; Queensland Government Publications Portal, t.y.).

**Figure 4.** Number of deaths per million tons of coal production (Bureau of Labor Statistics, t.y.; MSHA, t.y.; SGK, t.y.; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, t.y.; Queensland Government Open Data, t.y.; Queensland Government Publications Portal, t.y.).

### 3.2.1 Toz kontrol düzenlemeleri

#### 3.2.1 Dust control regulations

Ülkelerin toz kontrol düzenlemeleri yeraltı maden işletmeleri için incelendiğinde Türkiye’de 6331 sayılı kanunda tozlar için herhangi bir yükümlülük bulunmamaktadır. Solunabilir tozla alakalı olarak uyulması gereken hususlar 28770 sayılı Maden İşyerlerinde İSG Yönetmeliği ve 28812 sayılı Tozla Mücadele Yönetmeliği’nde mevcuttur. ABD’de Federal Maden Güvenlik Yasası tozlar konusuna ayrıntılı bir şekilde yer verilmiş solunabilir toz konsantrasyonları net sınırlarla belirlenmiştir. ABD gibi Avustralya’da net konsantrasyon sınırları belirlemiş ve mevzuatta kanun, yönetmelik ve tozlar için özel standartlar çıkararak tozla mücadele sağlamaktadır.

Ülkeler için Tablo 4’te TWA (Zaman Ağırlıklı Ortalama) değerlerine bakıldığında Türkiye’de Tozla Mücadele Yönetmeliğinde maden ocaklarında maruziyet yaşanabilecek tozlara ilişkin değerler mevcuttur, ancak bazı değerler için kesinlik bulunmamakta ve formüle bağlı hesaplama yöntemi kafa karışıklığına sebep olabilmektedir. Queensland ve ABD’de baktığımızda net sınır değerleri olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Türkiye’de yürürlükte olan kanuna göre bazı önemli TWA değerlerinin Queensland ve ABD’ye göre yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Kristal yapıda SiO<sub>2</sub> Kuvars, Kristobalit ve Tridimit için mevcut değerler diğer iki ülkeye kıyasla oldukça bazı durumlarda (%SiO<sub>2</sub> içeriğine bağlı olarak) yüksektir.

**Tablo 4.** Türkiye, Queensland ve ABD’de kullanılan düzenlemelere göre maden ocaklarında bulunabilmesi muhtemel kirlenici tozların TWA değerinin kıyaslanması (Tozla Mücadele Yönetmeliği, 2013; Federal Mine Safety & Health Act, 1977; Coal Mining Safety and Health Regulation, 2017)

**Table 4.** Comparison of the TWA value of possible polluting dust in the mines according to the regulations used in Turkey, Queensland, and the USA (Tozla Mücadele Yönetmeliği, 2013; Federal Mine Safety & Health Act, 1977; Coal Mining Safety and Health Regulation, 2017)

Toz Çeşitleri	Türkiye	Queensland	ABD
Kuvars	10mg/m <sup>3</sup> %SiO <sub>2</sub> +2	0,05 mg/m <sup>3</sup>	0,1 mg/m <sup>3</sup>
Kristobalit	Formülle hesaplanan kuvars değerinin ½ si kullanılır.	0,05 mg/m <sup>3</sup>	0,05 mg/m <sup>3</sup>
Tridimit	Formülle hesaplanan kuvars değerinin ½ si kullanılır.	0,05 mg/m <sup>3</sup>	0,05 mg/m <sup>3</sup>
Solunabilir Toz	5 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/ m <sup>3</sup>	3 mg/m <sup>3</sup>
Kömür tozu için %5’ten daha az SiO <sub>2</sub> içeren solunabilir toz	2,4 mg/ m <sup>3</sup>	1,5 mg/ m <sup>3</sup>	2 mg/m <sup>3</sup>

### 3.2.2 Havalandırma sistemleri

#### 3.2.2 Ventilation systems

Türkiye’de 28770 sayılı Maden İşyerlerinde İSG Yönetmeliğinde maden ocaklarında havalandırma sistemleri ile ilgili uyulması gereken yükümlülükler mevcuttur. Avustralya’nın kömür üretiminin yarısından fazlasının üretildiği Queensland eyaletinde kömür madenlerinde havalandırma sistemlerine dair yükümlülükler ve Coal Mining Safety and Health Regulation 2017 yönetmeliği ve Coal Mining Safety and Health Act 1999 Yasasında bulunmaktadır. ABD’de havalandırma ile ilgili yükümlülükler Federal Maden Güvenlik Yasasında bulunmaktadır. Yasanın haricinde MSHA havalandırmayla alakalı yönergeler ve kılavuzlar hazırlamaktadır.

**Tablo 5.** Türkiye, Queensland ve ABD’de kullanılan düzenlemelere göre maden ocaklarında bulunabilmesi muhtemel kirletici gazların TWA değerinin kıyaslanması

**Table 5.** Comparison of the TWA value of the polluting gases that may be found in the mines according to the regulations used in Turkey, Queensland, and the USA

Kimyasallar	Türkiye	Queensland	ABD
Oksijen	Havada %19'dan az olmayacak. (190.000 ppm)	Havada %19'dan az olmayacak.	Havada % 19,5'den az olmayacak.
Metan	Havada %2'den çok olmayacak. (20.000 ppm)	Havada %2,5'den çok olmayacak. (25.000 ppm)	Havada % 2'den çok olmayacak. Değerin %1'in üstüne çıkması halinde alınması gereken birçok önlemden bahsediyor.
Karbondioksit	Havada %0,5'den çok olmayacak. (5.000 ppm)	Havada %0,00125'den çok olmayacak. 12,5 ppm	Havada %0,5'den çok olmayacak. (5000 ppm)
Karbonmonoksit	Havada %0,005'den çok olmayacak. (50 ppm)	Havada %0,003'den çok olmayacak. (30 ppm)	Havada %0,005'den çok olmayacak. (50 ppm)
Hidrojen Sülfür	Havada %0,002'den çok olmayacak. (20 ppm)	Havada % 0,001'den çok olmayacak. (10 ppm)	Havada % 0,001'den çok olmayacak. (10 ppm)
Nitrik oksit	-	Havada % 0,0025'den çok olmayacak. (25 ppm)	Havada % 0,001'den çok olmayacak. (10 ppm)
Kükürt dioksit	-	Havada % 0,0002'den çok olmayacak. (2 ppm)	Havada % 0,0002'den çok olmayacak. (2 ppm)

Yukarıda yer alan Tablo 5’te kömür maden ocaklarında bulunabilecek muhtemel gazlar gösterilmektedir. Türkiye’de hidrojen sülfür, oksijen, metan karbondioksit ve karbonmonoksit için değerler Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğinde net sayılarla verilmiştir. Ancak bakıldığında yönetmelikte kimyasal gazlara ait TWA bulunmamaktadır. 28733 sayılı Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Yönetmeliğine bakıldığında ise bazı kimyasalların değerleri varken bazı gazlara ait TWA değerleri bulunmamaktadır. Ancak yönetmelikte, 6331 sayılı kanun uyarınca sınır değerler için uluslararası kuruluşlarca yayımlanmış sınır değerlerinin de dikkate alınabileceği belirtilmektedir. Queensland ve ABD’ye bakıldığında bütün sayısal değerler açık ve net bir şekilde verilmiştir.

### 3.2.3 Maden ocaklarında çalışanların İSG eğitimleri

#### 3.2.3 Occupational health and safety training of workers in mines

Eğitimler için Türkiye’de 6331 sayılı İSG Kanunu’nda, 28681 sayılı Acil Durumlar Hakkında Yönetmeliği’nde, 28648 sayılı Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmeliği’nde ve 28770 sayılı Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği’nde eğitimler ile alakalı yükümlülükler bulunmaktadır. Eğitimler bütün sektörler için belirlenmiş olan konulardan oluşmaktadır. Her sektörün çalışma tekniğinde çalışma ortamında kendine özgü riskleri ve tehlikeleri bulunmaktadır. Queensland eyaletinin kömür madenlerinde çalışan eğitimlerine dair yükümlülükler 1999 yasasında ve 2017 yönetmeliğinde bulunmaktadır. Yönetmelik ve kanuna bakıldığında madencilik ve taş ocakçılığına ait özel bir eğitim şeması olmasının yanı sıra sadece kömür madenciliğine özgü bir eğitim şeması bulunmaktadır. ABD’de

Federal Maden Güvenlik Yasasında bulunan eğitimler ile ilgili yükümlülükler haricinde MSHA çalışanların eğitimleri ile alakalı kılavuzlar ve yönergeler yayınlamaktadır. Yerüstünde ve yeraltında çalışan deneyimli ve deneyimsiz madencilere özel eğitim konuları bulunmaktadır. Tablo 6'da Türkiye, Queensland ve ABD'ye ait iş sağlığı eğitim kapsamaları verilmiştir. Peryodik eğitimler konusunda Türkiye ve ABD'nin durumu Queensland'den iyi olmasına karşın; eğitimlerin içeriği ve yaklaşım konusunda Türkiye'nin daha geride olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** Türkiye, Queensland ve ABD'de iş sağlığı ve güvenliği eğitim kapsamının karşılaştırması  
**Table 6.** Comparison of occupational health and safety training coverage in Turkey, Queensland and the USA

	Türkiye	Queensland	ABD
<b>Paydaşların iş sağlığı ve güvenliği eğitimine yaklaşım şekli nasıldır?</b>	Çoğunlukla olumsuz tutum	Çoğunlukla olumlu tutum	Çoğunlukla olumlu tutum
<b>Eğitimin içeriği yeterli mi?</b>	Bazı durumlarda formalite kapsamında hazırlanmıştır.	İşe uygun eğitim konularıyla çeşitlendirilmiş içerik mevcuttur.	İşe uygun eğitim konularıyla çeşitlendirilmiş içerik mevcuttur.
<b>İşe başlarken ve çalışma süresi boyunca eğitim yeterli mi?</b>	İşe başlarken çalışana eğitim verilmelidir ve çalışma süresi boyunca 2 yılda bir yenileme eğitimi verilmelidir.	İşe başlarken çalışana eğitim verilmelidir ve çalışma süresi boyunca 5 yılda bir yenileme eğitimi verilmelidir.	İşe başlarken çalışana eğitim verilmelidir ve çalışma süresi boyunca en az yılda bir kere yenileme eğitimi verilmelidir.
<b>Eğitimler büyük/ küçük işletme fark etmeksizin yapılabilmekte mi?</b>	Küçük işletmelerin eğitimleri göz ardı ettiği bilinmektedir. Kurumsal ve büyük işletmelerde durum daha iyidir.	Büyük/küçük fark etmeksizin kapsamlı eğitimlerin verilmesi sağlanmaktadır. Küçük işletmelerde göz ardı durumları zaman zaman olabilmektedir.	Büyük/küçük fark etmeksizin kapsamlı eğitimlerin verilmesi sağlanmaktadır. Küçük işletmelerde göz ardı durumları olabilmektedir.

Türkiye'de sektöre özel eğitim konularının olmamasının risklerin ve tehlikelerin belirlenememesi sonucu iş kazalarında artışa sebep olabileceği tahmin edilebilir. ABD ve Queensland'da ise madencilik sektöründe eğitim son derece önemsenmektedir. Kurumsal firmaların yasal zorunlulukların çok daha ilerisinde bir eğitim programına sahip oldukları görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Bu çalışmada Türkiye, ABD ve Avustralya'da halen maden sektörleri tarafından kullanılan iş güvenliği yönetimi, İSG mevzuatlarının içeriği ve bu üç ülkenin maden sektörüne ait İSG performansı sayısal ve görsel olarak sunulmuştur. Önceki çalışmalar çoğunlukla performans kıyaslamaları olarak yapılırken, bu çalışma İSG performansını doğrudan etkileme potansiyeline sahip mevzuatları konu alması sebebiyle bu alandaki ilk çalışmalardan biridir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

ABD'de maden sektöründe madencilerin sağlığına yönelik oldukça fazla çalışma yapıldığı görülmekle beraber bunları destekleyen yasaların Çalışma Bakanlığı ile beraber çalışmalar yürüten yalnızca maden sektörüne yönelik olarak faaliyet gösteren MSHA kuruluşunun destekleriyle yapıldığı görülmüştür. Bu sektörde kullanılan yasaların ne kadar etkili olduğunun yasalar çıktıktan sonra kaza ve ölümlerin düzenli olarak azalmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Maden sektörüne yönelik hazırlanan bu mevzuatların açık ve anlaşılır olması ve sektör tarafından benimsenmesi yine performansa olumlu etki eden diğer faktörler olarak değerlendirilebilir.

Avustralya da maden sektöründeki mevzuat ve yasalar ülkedeki eyaletlere göre değişkenlik göstermektedir. Özellikle kömür üretiminde ülkenin en önemli eyaleti olan ve bu çalışmada da yer alan Queensland eyaletinde risk yönetim ilkesi anlayışı hakimdir. Maden ocaklarında işçilerin oluşabilecek riskleri en aza indirme ve ortadan kaldırmasına yönelik mevzuatları mevcuttur. Bu mevzuatlarda temel sorumlu olarak işletmecinin olduğu görülür. Queensland mevzuatlarında net, detaylı ve kesin bir dil kullanılmıştır. Bu eyaletin maden

sektörünün İSG performansı incelendiğinde hazırlanan yasalar ve mevzuat değişikliklerinin yaşanan ölümlü maden kazaları üzerinde önemli ölçüde azaltıcı etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Türkiye’de ise ABD ve Avustralya da olduğu gibi yasalarda net, kesin bir dil kullanılmamakla beraber genel olarak maden sektörüne özel bir iş güvenliği yasası bulunmaktadır. ABD ve Queensland’a göre kömür üretiminin daha az olduğu madencilik sektöründe ölümlü kaza sayılarının oldukça daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak da iş güvenliği yasasındaki eksiklikler ve uygulamada yapılan yanlışlar ilk akla gelen sebepler arasında yer almaktadır. Sonuç olarak maden ocaklarında kaza ve ölümlerin azalmasını sağlamak için madencilik sektörüne yönelik özel olarak net bir dille hazırlanmış, sorumlulukların somut bir biçimde ortaya konulduğu ve işletmecilerin bu mevzuatları benimsediği bir yasal çerçevenin oluşturulması gerektiği söylenebilir.

Türkiye’nin mevcut havalandırma ve toz kontrol düzenlemelerinin oldukça eksik kaldığı ve kriterlerin yeterli düzeyde olmadığı görülmektedir. Kullanılan mevzuatlar gereği kimyasal ve toz konsantrasyonları için kesin bir sayısal sınır belirtilmemekte ancak bu konuda mevzuatın uygulanmasında uluslararası değerlerin alınabileceği ifade edilmektedir. Maden sektörüne özel herhangi bir eğitim planı kanunlarda bulunmamaktadır. Yasalara göre belirli periyotlarda verilen iş sağlığı güvenliği eğitimlerinin de çoğunlukla yasal prosedürlerin sağlanması amacıyla verildiği üzerinde fazla durulmadığı bilinmektedir. Türkiye maden sektörü iş sağlığı güvenliği konusu temel başlıklar açısından incelendiğinde kullanılan mevzuatların ve yasaların muğlak ve yetersiz olduğu, mevcut yasaların sektör tarafından uygulanmasında eksiklikler olduğu ve bunun sonucunda sektörün ölümlü kaza sayılarının ve oranlarının ABD ve Avustralya gibi ülkelere kıyasla oldukça yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır.

## 5. Tartışma

### 5. Discussion

Bu sonuçlar neticesinde madencilik için kullanılan iş sağlığı güvenliğine yönelik yasaların eksikliği göze çarpmaktadır. Madenlerde oluşan kazalarda ölüm ve yaralanmaların en aza indirgenmesi için bu çalışmanın yazarlarının önerileri aşağıda yer almaktadır:

- Maden ocakları için özel olarak sadece bu sektörü ilgilendiren düzenleme mevzuatlar hazırlanmalı ve Çalışma Bakanlığına bağlı sadece maden sektörüne (MSHA benzeri) yönelik bir kurum tarafından bu mevzuatlar güncellenmeli ve periyodik olarak denetlenmelidir. Bunun sonucunda mevcut olumsuz performans iyileştirilebilir.
- Yasal mevzuatlar hazırlanırken Avustralya örneğinde olduğu gibi bölgesel farklılıkların gözetilmesi işletmelerin adaptasyonu daha yerinde olacaktır. Örneğin kömür üretiminin yoğun olduğu bölgelerde yıllık asgari tatbikat sayısı veya doğal taş üretiminin yoğun olduğu bölgelerde zaman ağırlıklı toz yoğunluğunun nispeten farklılıklar gösterebilmesi gibi.
- Bu düzenlemelerde devlet, işveren ve çalışanların ölümlü kazaları ve yaralanmaları azaltmak veya sonlandırmak için beraber çalışması gerekmektedir. Devlete bağlı ancak bağımsız bir kurum tarafından aralıklı olarak düzenlemeler denetlenmeli ve iş sağlığı ve güvenliğine uygun çalışma ortamı hazırlanmalıdır.
- Devlet çıkarılan mevzuat ve yasalara bağlı kalınıp kalınmadığını görmek için sürekli olarak nitelikli denetimler yapmak zorundadır.
- İş sağlığı ve güvenliği kurumsal kültürün bir parçası haline getirilmeli ve buna yönelik teşvikler yapılmalıdır. Örneğin daha az kazaların olduğu işletmelere ayrıcalıkların tanınması gündeme alınabilir.
- İş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin periyodik olarak tekrar edilmesi, çalışanların verilen eğitimlerde sınanması ve içeriklerin sürekli olarak yenilenmesi için çalışmalar yapılması yerinde olacaktır.
- Acil durumlara yönelik hazırlıkların artırılması, rutin tatbikatların dışında devletin destek verdiği daha büyük tatbikatlar yapılarak herkesin hazırda bulunması gerekmektedir.

- Maden sektöründe belirtilen sayısal verilerin açık, net ve kesinlikle doğru zamanda açıklanması bir zorunluluktur. Kazaları, olayları ve ramak kala durumlarını zamanında ve tam olarak bildirmeyen kurumlara yönelik ciddi yaptırımların gündeme alınması yerine bir karar olacaktır.

### **Yazar katkısı**

#### *Author Contribution*

Bu makalenin hazırlanmasında Aydanur GÜNGÖR GÖKBOĞA'nın yüksek lisans tezinden faydalanılmıştır. Veri toplama, analiz, değerlendirme ve yazım A.G.G., konunun belirlenmesi, verilerin değerlendirilmesi, yazım ve sonuçların yorumlanması kısımları ve revizyonlar ise M.M.K. tarafından gerçekleştirilmiştir.

### **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**

#### *Conflict of Interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Kaynaklar**

#### *References*

- Aktan, M., Uygun, M., Erbayat, C.K., & Gezici, S. (2015). *Avustralya kömür madenleri ve arge kuruluşlarına yapılan incelemelerle ilgili teknik rapor*. [https://www.academia.edu/35140179/AVUSTRALYA\\_MADENCİLİK\\_YÖNETİM\\_SİSTEMİ\\_ARGE\\_KURULUŞLARI\\_VE\\_KÖMÜR\\_MADENCİLİĞİ\\_HAKKINDA\\_KAPSAMLI\\_RAPOR\\_MINING\\_POLICY\\_AND\\_COAL\\_MINING\\_IN\\_AUSTRALIA](https://www.academia.edu/35140179/AVUSTRALYA_MADENCİLİK_YÖNETİM_SİSTEMİ_ARGE_KURULUŞLARI_VE_KÖMÜR_MADENCİLİĞİ_HAKKINDA_KAPSAMLI_RAPOR_MINING_POLICY_AND_COAL_MINING_IN_AUSTRALIA)
- Australian Bureau of Statistics (t.y.). *Australian Industry Statistics*. <https://www.abs.gov.au/statistics/industry/industry-overview/australian-industry/latest-release>.
- Baradan, S. (2006). Türkiye inşaat sektöründe iş güvenliğinin yeri ve gelişmiş ülkelerle kıyaslanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 87-100.
- Bilim, N. (2015). Kömür madenlerinde meydana gelen iş kazalarının istatistiksel değerlendirilmesi. *Madencilik Türkiye*, (44), 78-82. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.435729>
- Bureau of Labor Statistics (t.y.). *Natural Resources and Mining*. <https://www.bls.gov/iag/tgs/iag10.htm>
- Coal Mining Safety and Health Regulation (2017). *Queensland Legislation* (Subordinate Legislation 2017 No. 165, 2017)
- Çelikel Yiğitel, S., (2019). Türkiye'de İş Sağlığı ve Güvenliğinin Tarihsel Gelişim Süreci. İslamoğlu, E. & Yıldırımalp, Sosyal bilimlerde yeni araştırmalar. (ss. 213-226). Berikan.
- Çiçek, Ö. & Öçal, M. (2016). Dünyada ve Türkiye'de iş sağlığı ve iş güvenliğinin tarihsel gelişimi. *Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, 5(11), 106-129.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (t.y.). *Denge Tabloları*. <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-denge-tabloları>
- History of OHS. (t.y.). *A short history of occupational health and safety*. <https://www.inspireeducation.net.au/blog/a-short-history-of-occupational-health-and-safety-with-videos/>
- Kahraman, E. (2019). Kömür madenciliğinde ölümlü iş kazalarının karşılaştırılması: Türkiye-Çin. *Madencilikte İş Sağlığı ve Güvenliği Uluslararası Sempozyumu* (ss. 110-118). Adana.

- Karaahmetoğlu, A. (2020). Dünyü ve bugünüyle dünyada ve Türkiye’de maden işçilerine yönelik iş sağlığı ve güvenliği bağlamında yaşanan gelişmeler üzerine bir değerlendirme. *Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi*, (79), 129-165. <https://doi.org/10.26650/jspc.2020.79.0046>
- Kaynak, S.Ö. & Torun, M. (2015). Geçmişten günümüze işçi sağlığı ve iş güvenliği. Ö. Kılıç, A. M. Kılıç, M. Altın ve M. Yılmaz (Der.), *Maden işletmelerinde işçi sağlığı ve iş güvenliği sempozyumu bildiriler kitabı* (ss. 1-17). Adana.
- Madsen, P. M. (2009). These lives will not be lost in vain: organizational learning from disaster in U.S. coal mining. *Organization Science*, 20(5), 861-875. <https://doi.org/10.1287/orsc.1080.0396>
- Mine Safety and Health Administration (t.y.). *Data, reports- mine data retrieval system*. <https://www.msha.gov/data-reports>
- Mine Safety and Health Administration (t.y.). *Regulations*. <https://www.msha.gov/regulations>
- MSHE. (t.y.). *Mine Safety and Health Enforcement*. <https://www.msha.gov/about/program-areas/mine-safety-and-health-enforcement>
- Özveri, M. (2015). *İşçi sağlığı, iş güvenliği ve iş cinayetleri*, Birleşik Metal-İş Yayınları, [http://www.birlesikmetal.org/kitap/isig\\_2015.pdf](http://www.birlesikmetal.org/kitap/isig_2015.pdf).
- Queensland Government Open Data (t.y.). *Coal industry review statistical tables*. <https://www.data.qld.gov.au/dataset/coal-industry-review-statistical-tables>
- Queensland Government Publications Portal (t.y.). *Queensland mines and quarries safety performance and health reports and data*. <https://www.publications.qld.gov.au/dataset/queensland-mines-and-quarries-safety-performance-and-health-reports-and-data>
- Safe Work Australia (t.y.). *Data and research*. <https://www.safeworkaustralia.gov.au/data-and-research>
- Safe Work Australia (t.y.). *Law and regulation*. <https://www.safeworkaustralia.gov.au/law-and-regulation>
- Significant Events in OHS. (t.y.). *Significant Events in the History of Occupational Safety and Health*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK225533/>
- Smith, D. R., & Leggat, P. A. (2004). The historical development of occupational health in Australia: part 1 1788-1970. *Journal of UOEH*, 26(4), 431-441. <https://doi.org/10.7888/juoeh.26.431>
- Smith, D. R., & Leggat, P. A. (2005). The historical development of occupational health in Australia: part 2 1970-2000. *Journal of UOEH*, 27(2), 137-150. <https://doi.org/10.7888/juoeh.27.137>
- Sosyal Güvenlik Kurumu (t.y.). *SGK istatistik yıllıkları*. [http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk\\_istatistik\\_yilliklari](http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari)
- Sökmen, M.E. (2016). *Yeraltı madenlerinde personel takip ve haberleşme sistemlerinin incelenmesi*. [İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü]
- Sökmen, M. E. (2019). *Madencilik sektöründe iş güvenliği uzmanlığı eğitimlerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi]
- Federal Mine Safety and Health Act of 1977, *USA Public Law 91-173 as amended by Public Law 95-164*, <https://arlweb.msha.gov/regs/act/acttc.htm>
- Tozla Mücadele Yönetmeliği (2013), *T.C. Resmî Gazete* (28812, 5 Kasım 2013).
- Yaşar, S., İnal, S., Yaşar, Ö., & Kaya, S. (2015). Geçmişten günümüze büyük maden Kazaları. *Madencilik*, 54(2), 33-43.

## Endüktif iris yapısı kullanarak C-bandında bant geçiren dikdörtgen dalga kılavuzu filtrenin analitik olarak tasarımı

*Analytical design of band-pass waveguide filter in C-band using inductive iris*

Sinan BİÇER<sup>1</sup> , Habib DOĞAN<sup>2</sup> , İbrahim Bahadır BAŞYİĞİT<sup>3</sup> , Abdullah GENÇ<sup>\*4</sup> 

<sup>1</sup>Akdeniz Üniversitesi, Elmalı Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 07716 Antalya

<sup>2</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Gölhisar Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri ve Bilişim Sistemleri Bölümü, 15400, Burdur

<sup>3</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 32260, Isparta

<sup>4</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 32260, Isparta

• Geliş tarihi / Received: 02.09.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 12.06.2023

### Öz

Mikrodalga teknolojisinde dikdörtgen dalga kılavuzu (DDK) filtreler, genellikle düşük kayıp ve yüksek güç taşıma kapasitesinden dolayı yaygın olarak kullanılırlar. Bu çalışmada, istenilen derece ve frekans bölgesinde simetrik endüktif iris yapısına sahip bant geçiren DDK filtrelerin analitik yöntemle tasarımı ve MATLAB kodları verilmiştir. Örnek bir tasarım olarak 4.5-4.8 GHz aralığında 5. dereceden bir filtre, analitik ve nümerik olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, filtre derecesi, farklı iris kalınlıkları ve değişik iris tiplerinin filtre performansına olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, iris kalınlığı filtrenin frekans cevabında etkili iken, iris uçları veya irislerin dalga kılavuzuyla birleştiği noktalarda belli oranlarda yapılan ovalleştirilmelerin frekans cevabında önemli bir etkisi yoktur. % 6.5 bant genişliğine sahip olarak tasarlanan DDK filtre, benzer frekansta tasarlanmış filtrelere göre daha geniş bir bant genişliğine sahiptir. Analitik sonuçlarına göre, 4.5-4.8 GHz aralığında  $S_{11}$  değeri -20 dB değerinden küçük iken; aynı bölgede  $S_{21}$  değeri, yaklaşık 0 dB civarındadır. Diğer taraftan CST Studio Suite Microwave programı ile elde edilen simülasyon sonuçlarına göre ise, aynı frekans bandında  $S_{11}$  değeri -18 dB değerinden küçük iken; aynı bölgede  $S_{21}$  değeri, yaklaşık 0.09 dB civarındadır.

**Anahtar kelimeler:** Bant geçiren filtre, C bandı, Dalga kılavuzu filtre, Endüktif iris

### Abstract

Rectangular waveguide (RWG) filters are commonly utilized in microwave technology due to their low loss and high power carrying capacity. In this study, analytical method design and MATLAB codes of band-pass RWG filters with symmetrical inductive iris structure in the desired degree and frequency region are given. As an example of the design, a 5th order filter in the 4.5-4.8 GHz range is analytically and numerically designed. In addition, the order of filter, the effect of different iris thicknesses and various iris types on the filter performance is investigated. The results revealed that the thickness of the iris has an effect on the frequency response of the filter, but the bending at the iris tips or the bending at the junction of the iris with the waveguide has significantly no effect on the frequency response. The filter designed with a bandwidth of 6.5% has a wider bandwidth than filters designed with a similar frequency. According to the analytical results, in the 4.5-4.8 GHz range, the value of  $S_{11}$  is less than -20 dB, while the value of  $S_{21}$  in the same region is around 0 dB. On the other hand, according to the simulation results obtained with the CST Studio Suite Microwave program, in the same frequency band, the value of  $S_{11}$  is less than -18 dB, while the value of  $S_{21}$  in the same region is about 0.09 dB.

**Keywords:** Band-pass filter, C band, Inductive Iris, Waveguide filter

\*Abdullah GENÇ; abdullahgenc@isparta.edu.tr



## 1. Giriş

### 1. Introduction

Elektronik filtreler giriş sinyallerine göre bir frekans cevabı üreten iki terminalli devrelerdir. İstenilen frekans cevabına göre alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran olarak farklı yapılar tasarlanabilirler. Ayrıca kullanılan eleman tipine göre de aktif ve pasif filtreler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Haberleşmede oldukça yaygın bir biçimde kullanılan filtreler, giriş sinyallerini çıkışta zayıflatarak bir frekans cevabı üretirler. Matematiksel olarak farklı fonksiyonlara sahip çeşitli filtre türleri (Butterworth, Chebyshev, Bessel veya Elliptic-Cauer vb.) bulunmaktadır (Eroglu, 2022).

Butterworth filtre, bant geçiren bölgede mümkün olduğu kadar düz bir frekans cevabına sahipken, Chebyshev filtrenin frekans karakteristiği bu bölgede daha dalgalı (ripple) yapıya sahiptir. Chebyshev ve Eliptik filtreler göre daha düz geçiş bölgesine sahip olan Butterworth filtrelerde, durdurma bant bölgesine geçişin daha keskin olması için daha yüksek dereceli tasarımlara ihtiyaç vardır. Yüksek kalite faktörü (Q) gereken ve durdurma bant bölgesine daha keskin geçiş istenen filtre tasarımlarında genellikle Chebyshev filtreler tercih edilir. Chebyshev filtreler, tip-I (veya Chebyshev filtre) ve tip-II (veya ters Chebyshev filtre) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tip-I'de dalgalanmalar, bant geçiren frekans bölgesinde meydana gelirken; tip-II'de ise bunlar, bant durduran frekans bölgesinde oluşur. Ayrıca, tip-II'de daha fazla bileşen gerektirdiği için, tip-I daha fazla yaygındır (Hunter, 2001).

Normal devre teknolojisinde filtreler;  $R$ ,  $L$ ,  $C$  gibi toplu elemanlar kullanılarak tasarlanırken, mikrodalga teknolojisinde mikroşerit ve dalga kılavuzları gibi yapılar kullanılarak tasarlanmaktadır. Dalga kılavuzları dikdörtgen veya dairesel içi boş metal yapılar olup, yüksek güç taşıma kapasitesi ve düşük kayıplı özelliklerinden dolayı özellikle yüksek frekans bölgesinde tercih edilmektedirler. Fakat bu tip dalga kılavuzu filtrelerin dezavantajı da düşük frekanslarda fiziksel boyutlarının büyük olmasıdır. Tarım, savunma, güvenlik, telekomünikasyon gibi sektörlerdeki iletişim sistemlerinde önemli bir role sahip dalga kılavuzu filtreler, kompakt yapıya sahip olma, düşük maliyet, güç taşıma kapasitesi, ağırlık, çalışma frekansı bölgesi, termal kararlılık gibi amaçlar için literatürde yoğun bir biçimde çalışılmıştır (Genc vd., 2018; Akatimagool vd., 2016; Bianchi & Sorrentino, 2007; D'Auria vd., 2015; Dahle vd., 2017; Genc vd., 2019; Piltyay vd., 2021; Yechou vd., 2014). Bu alanlarda hem dar bant hem de geniş bant özellik gösteren dalga kılavuzu filtre tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dar bantlı uygulamalar gürültü bastırma ve daha yüksek duyarlılık gerektiren uygulamalarda kullanılırken, geniş bantlı tasarımlar ise daha fazla güç transferinin yapılması istenen uygulamalarda tercih edilirler (Boria & Gimeno, 2007; Máximo-Gutiérrez vd., 2021).

Mikrodalga frekans bölgesinde dalga kılavuzu filtre yapımında, farklı tasarım teknikleri geliştirilmiştir. Geleneksel uygulamalarda kılavuz içerisine metal iris ve postlar eklenirken, bazı yeni uygulamalarda da, boyut olumsuzluğunu ortadan kaldırmak için alt taşa sahip tümleşik devre (Substrate Integrated Circuits-SIC) tasarımları yapılmıştır (Jin vd., 2014; Soreng & Mishra, 2018; İmeci, 2022). Kullanılan irisler endüktif ve kapasitif etkiler oluşturmakta ve tasarlanan yapılara göre de değişik frekans cevapları elde edilebilmektedir. Dikdörtgen dalga kılavuzunun geniş bölgesine yerleştirilen irisler endüktif etki oluştururken; dalga kılavuzunun dar bölgesine yerleştirilen irisler ise kapasitif etki oluşturmaktadır. Endüktif iris yapıları ise kendi içinde simetrik (karşılıklı iki iris kullanıldığı durum) veya non-simetrik (tek iris kullanıldığı durum) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu çalışmada, simetrik endüktif iris yapıları tercih edilmiştir.

Son zamanlarda iris ve post tasarımlarına alternatif olarak, dalga kılavuzu içerisine frekans seçici yüzey (FSS) ve metamateriyal yapılarla desteklenmiş tasarımlar eklenmeye başlanmıştır (Bage & Das, 2017; Bod & Hatefi Ardakani, 2018; Piltyay vd., 2021). FSS ve metamateriyal yapılar dalga kılavuzu içerisinden uzaysal bir mikrodalga filtrenin oluşturulmasını ve boyutların daha minimize edilmesini sağlarlar (Lin vd., 2013). Dalga kılavuzu içerisine eklenecek metamateriyal sayısı filtrenin devre teorisindeki derecesine karşılık gelmektedir. Bu şekilde eklenen metamateriyal sayısı artırılarak istenen derecede filtreler elde etmek mümkündür (AbuHussain & Hasar, 2020). Ayrıca, literatürde bulunan diğer bir çalışmada, minyatürleştirilmiş bant geçiren 5. derece dalga kılavuzu filtre tasarlamak için kalın bir endüktif irise bir veya iki metal blok eklenerek oluşturulan özgün bir rezonans bağlantı yapıları önerilmektedir (Xiang vd., 2023).

Bu çalışmamızda endüktif irisler kullanarak bant geçiren dalga kılavuzu filtrenin tasarım aşamaları analitik olarak verilmiştir. Tasarım sonucunda, istenilen filtre derecesine bağlı olarak, kılavuza yerleştirilecek irislerin konumları ve iris boyları MATLAB kodlarıyla hesaplanabilmektedir. Ayrıca, Chebyshev tip-I fonksiyonları

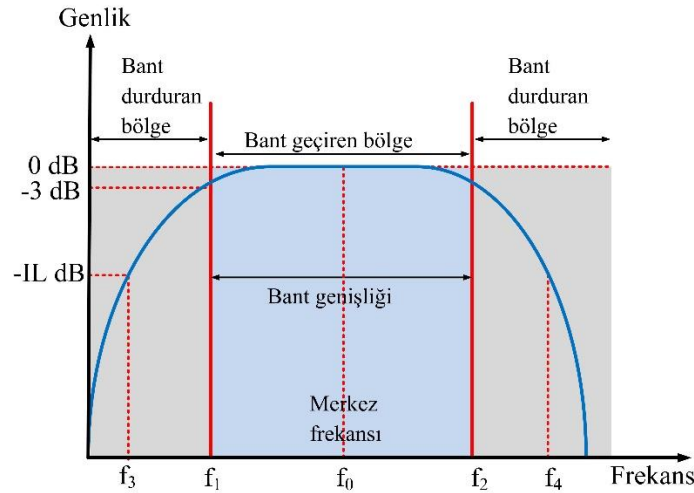
kullanılarak 5. dereceden bir bant geçiren filtre tasarlanmış ve frekansa bağlı olarak geri dönüş ve araya girme kaybı elde edilmiştir. C bandında (4.5-4.8 GHz) tasarlanan filtrenin performansı, nümerik sonuçlarla doğrulanmıştır. Ayrıca, filtre derecesi, farklı iris kalınlıkları ve değişik iris tiplerinin filtre performansına olan etkisi CST Studio Suite Microwave programı yardımıyla incelenmiştir. Bu çalışmanın 2. Bölümünde analitik yöntemle DDK bant geçiren filtre tasarımı tasarım prosedürü detaylı bir şekilde verilmiştir. 3. Bölümde ise iris kalınlığının ve iris tipinin filtre performansı üzerine etkileri nümerik olarak verilmiştir. 4. Bölüm elde edilen sonuçla tartışılmış olup Ek-A bölümünde ise tasarlanan filtrenin MATLAB kodları verilmiştir.

## 2. Analitik yöntemle dikdörtgen dalga kılavuzu bant geçiren filtre tasarımı

### 2. Rectangular waveguide band-pass filter design by analytical method

Bir filtre tasarımında, önce filtrenin hangi türde olacağına karar verilir. Yani alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren veya bant durdurucu özelliklerden hangi transfer fonksiyonuna ihtiyaç duyulduğu belirlenir. Filtre tasarımı yapılırken öncelikle prototip olarak alçak geçiren filtre tasarımı yapılır ve daha sonra bu alçak geçiren yapıdan diğer yapılar elde edilir.

Tipik bir bant geçiren filtrenin frekans cevabı, Şekil 1’de verilmiştir. Burada  $f_0$  merkez frekansı,  $f_1$  alt kesim frekansı ve  $f_2$  üst kesim (@-3 dB) frekansıdır. Ayrıca,  $f_3$  ve  $f_4$  durdurma bant aralığını gösterir. Bant geçiren filtrenin tasarımında öncelikle filtrenin özellikleri belirlenmesi gerekir. Bunlar, filtrenin çalışacağı frekans bant aralığı (Şekil 1’deki mavi bölge) ve karşılanması gereken geri dönüş kaybı ( $S_{11}$ ) değeri belirlenir. Bu değer, filtrenin frekans cevabındaki dalgalanmayla (ripple) doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden, bazı tasarımlarda geri dönüş kaybı yerine ripple ( $\epsilon$ ) değeri de verilebilir. Tasarımda dalgalanma değerinin yanında, uygulamada gerekli olan durdurma bandındaki araya girme kaybı ( $S_{21}$ ) da belirlenir. Bu değer (-IL, insertion loss), filtrenin geçiş bandı ile durdurma bandı arasındaki geçişin keskinliğini dolayısıyla filtre derecesini belirler. Tasarlanan filtrenin derecesi yükseldikçe hem filtrenin maliyeti hem de performansı artar.



Şekil 1. Tipik bir bant geçiren filtrenin frekans cevabı

Figure 1. Frequency response of a typical bandpass filter

Bu çalışmadaki tasarım adımları, farklı frekans bantları ve dikdörtgen dalga kılavuzları (DDK) için kullanılabilir. Seçilen bu frekans çalışma bölgesine uygun dalga kılavuzu boyutlarına bağlı olarak kesim frekansı (Denklem 1)’e göre belirlenir (Hunter, 2001).

$$f_c = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (1)$$

$$w_c = 2\pi f_c \quad (2)$$

Burada,  $a$  ve  $b$  DDK’nın ebatları olup  $m$  ve  $n$  ise elektromanyetik dalganın olası modlarıdır. Merkez frekansı, (Denklem 3)’e göre hesaplanır.

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (3)$$

DDK'nın içinin havayla dolu olduğu varsayılırsa ( $\epsilon_r = 1$ ) çeşitli frekanslar için dalga boyları (Denklem 4)'e göre elde edilebilir.

$$\lambda_i = \frac{c}{f_i} \quad i = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

(Denklem 5)'de verilen DK içindeki dalga boyu, kesim frekansına, çalışma frekansına ve ortamın elektriksel özelliklerine bağlıdır.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{[1 - (\omega_c/\omega)^2]^{1/2}} \quad (5)$$

Buradan,  $f_1$  ve  $f_2$  için DK dalga boyları, (Denklem 6)'ya göre hesaplanır.

$$\lambda_{g1} = \frac{\lambda_0}{[1 - (\omega_c/\omega_1)^2]^{1/2}} \quad (6a)$$

$$\lambda_{g2} = \frac{\lambda_0}{[1 - (\omega_c/\omega_2)^2]^{1/2}} \quad (6b)$$

Merkez frekansındaki dalga boyu, frekanstan bağımsız olarak (Denklem 7) ile elde edilir.

$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_{g1} + \lambda_{g2}}{2} \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\lambda_{g1} \cos\left(\frac{\pi \lambda_{g2}}{2 \lambda_{g1}}\right) + \lambda_{g2} \cos\left(\frac{\pi \lambda_{g1}}{2 \lambda_{g2}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \lambda_{g2}}{2 \lambda_{g1}}\right) + \sin\left(\frac{\pi \lambda_{g1}}{2 \lambda_{g2}}\right)} \right] \quad (7)$$

Eş dalgalanmalı bir bant geçiren yapının frekans cevabı (araya girme kaybı), (Denklem 8) ile verilir.

$$|S_{21}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 T_n^2 \left\{ \alpha \left( \frac{\lambda_g}{\lambda_{g0}} \right) \sin \left[ \pi \left( \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) \right] \right\}} \quad [\text{linear}] \quad (8a)$$

$$IL = -10 \log_{10} \left[ 1 + \epsilon^2 T_n^2 \left\{ \alpha \left( \frac{\lambda_g}{\lambda_{g0}} \right) \sin \left[ \pi \left( \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_g} \right) \right] \right\} \right] \quad [\text{dB}] \quad (8b)$$

Burada,  $\epsilon$  dalgalanma faktörü,  $\alpha = \left[ \frac{\lambda_{g1}}{\lambda_{g0}} \sin \left( \frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_{g1}} \right) \right]^{-1}$  ve  $\theta = \frac{\pi \lambda_{g0}}{\lambda_g}$  dir. Eğer tasarım aşamasındaki istenilen IL değeri sağlanmazsa filtrenin derecesi artırılmalıdır. Ayrıca,  $T_n(x)$ ; n. dereceden tip-I bir filtre Chebyshev polinomlarını gösterir ve (Denklem 9)'da verilmiştir. Bu polinomlar, Jacobi polinomlarının özel durumlarıdır.

$$T_n(x) = 2x T_{n-1}(x) - T_{n-2}(x); \quad T_0(x) = 1 \text{ ve } T_1(x) = x \quad (9a)$$

$$T_n(x) = \frac{2^{2n}(n!)^2}{(2n)!} P\left(n, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, x\right) \quad (9b)$$

Örneğin; n=5 için Chebyshev polinomu,  $T_5(x) = 16x^5 - 20x^3 + 5x$  olarak hesaplanabilir. Bu sayede (Denklem 8b) kullanılarak frekansa bağlı araya girme kaybı (IL) grafiği elde edilebilir.

Bu aşamadan sonra filtredeki irisler arası mesafe ( $l_r$ ) ve her bir iris boşluğunu ( $d_r$ ) teorik olarak belirlemek için suseptanslar hesaplanmalıdır. Bu suseptans değerleri için Kurado dönüşümleri ve karakteristik empedansları kullanılır. Öncelikle elde edilen prototip filtrenin normalize karakteristik empedansları (1  $\Omega$ 'a göre normalize) (Denklem 10)'a göre belirlenir.

$$Z_r = \frac{2\alpha}{\eta} \sin \left[ \frac{(2r-1)\pi}{2n} \right] - \frac{1}{4\eta\alpha} \left\{ \frac{\eta^2 + \sin^2(r\pi/n)}{\sin[(2r+1)\pi/2n]} + \frac{\eta^2 + \sin^2[(r-1)\pi/n]}{\sin[(2r-3)\pi/2n]} \right\} \quad r = 1, \dots, N \quad (10)$$

Burada,  $\eta = \sinh \left[ \frac{1}{N} \sinh^{-1} \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) \right]$  olarak verilmiştir. Daha sonra, (Denklem 11)'deki Kurado dönüşümleri kullanılarak, suseptansların değerleri (Denklem 12)'ye göre elde edilir.

$$K'_{r,r+1} = \frac{[\eta^2 + \sin^2(r\pi/N)]^{1/2}}{\eta} \quad r = 0, \dots, N \quad (11)$$

$$B_{r,r+1} = \frac{(Z_r Z_{r+1})^{1/2}}{K_{r,r+1}} - \frac{K_{r,r+1}}{(Z_r Z_{r+1})^{1/2}}; \quad Z_0 = Z_{N+1} = 1 \quad (12)$$

Suseptans değerleri kullanılarak tasarlanan iris yapılarının elektriksel uzunlukları (Denklem 13)'e göre hesaplanabilir.

$$\psi_r = \pi - \frac{1}{2} \left[ \cot^{-1} \left( \frac{B_{r+1,r}}{2} \right) + \cot^{-1} \left( \frac{B_{r,r+1}}{2} \right) \right] \quad (13)$$

İrisler arasındaki gerçek fiziksel mesafeler (Denklem 14)'e göre bulunabilir.

$$\ell_r = \frac{\psi_r \lambda_{g0}}{\pi} \quad (14)$$

Son olarak, karşılıklı simetrik olarak konumlandırılmış endüktif iris yapıları (paralel iris) kullanıldığında suseptans değerleri (Denklem 15)'de verilmiştir (Bianchi & Sorrentino, 2007).

$$B_r = \frac{2\pi}{\beta a} \cot^2 \left( \frac{\pi d_r}{2a} \right) \left[ 1 + \frac{\alpha \gamma_3 - 3\pi}{4\pi} \sin^2 \left( \frac{\pi d_r}{a} \right) \right] \quad (15)$$

Burada,  $\beta = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left( \frac{\pi}{a} \right)^2}$  ve  $\gamma_3 = \sqrt{\left( \frac{3\pi}{a} \right)^2 - \omega^2 \varepsilon \mu}$ 'dir. Bu suseptans değerleri kullanılarak dr iris boşluklarını doğrudan hesaplamak oldukça karmaşık olduğu için bu işlem iterasyonla gerçekleştirilebilir. Buraya kadarki işlem adımlarını içeren MATLAB kodları, literatüre katkı sağlamak amacıyla Ek-A'da verilmiştir.

## 2.1. Örnek uygulama

### 2.1. An example application

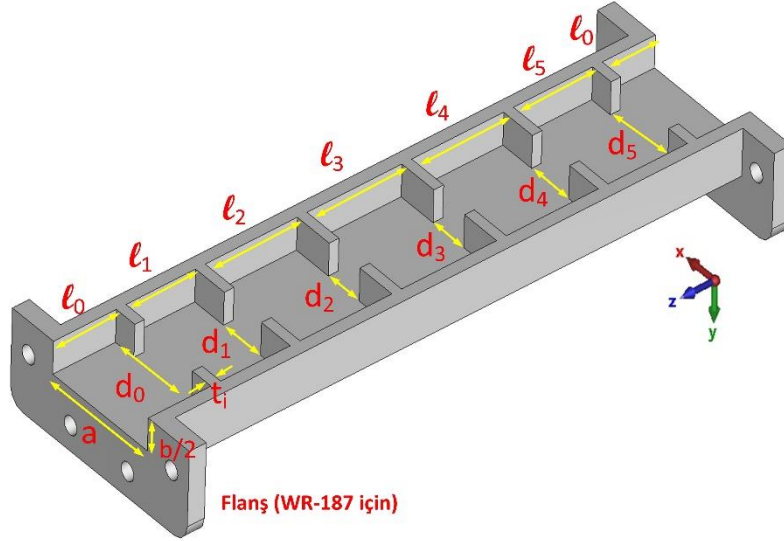
Bu çalışmada tasarlanan C bandında iris yapılı tipik DK filtrenin özellikleri aşağıdaki gibidir.

*Bant genişliği:* 4.5-4.8 GHz

*Geri dönüş kaybı:*  $\geq 20$  dB ( $\varepsilon = 0.01$ )

*Durdurma bandı araya girme kaybı:*  $\geq 50$  dB@4 GHz ve  $\geq 35$  dB@5.5 GHz

Öncelikle radar uygulamalarında kullanılan C bandı için WR-187 (3.95-5.95 GHz) DDK kullanılmıştır. Bu dalga kılavuzunun boyutları  $47.55 \times 22.15$  mm<sup>2</sup>'dir. Bu özellikleri sağlayan filtre elde etmek için Ek-A'da verilen MATLAB kodlarına göre filtre derecesi en az 5 olmalıdır. Bu kodlarla filtre ebatlarına ek olarak filtre derecesine bağlı olarak empedans değerleri, Kurado dönüşümleri ve suseptans değerleri elde edilebilir. Ayrıca analitik olarak filtrenin frekans cevabı otomatik olarak çizdirilebilir. İris yapısı kullanılan 5. derece DK filtrenin kesit görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre, iris sayısı filtre derecesinin bir fazlasıdır.  $l_0$  değeri DK içindeki dalga boyunun  $\frac{1}{4}$ 'ü kadar belirlenmiş olup bu uzunluğun filtre performansına kayda değer etkisi yoktur. Ayrıca ilgili kodlar ile analitik yöntemle elde edilen dalga kılavuzu filtrenin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.



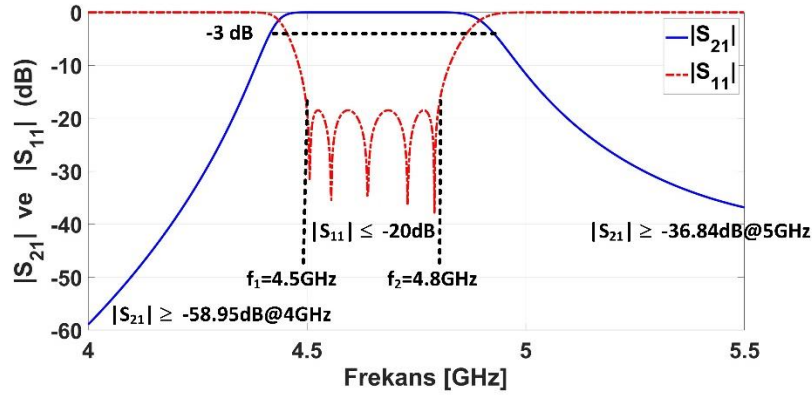
**Şekil 2.** İris yapısı kullanılarak 5. derece dalga kılavuzu filtrenin kesit görünümü  
**Figure 2.** Sectional view of a 5th order waveguide filter designed using an iris structure.

**Tablo 1.** Analitik yöntemle elde edilen dalga kılavuzu filtrenin boyutları  
**Table 1.** Dimensions of the waveguide filter obtained by the analytical method

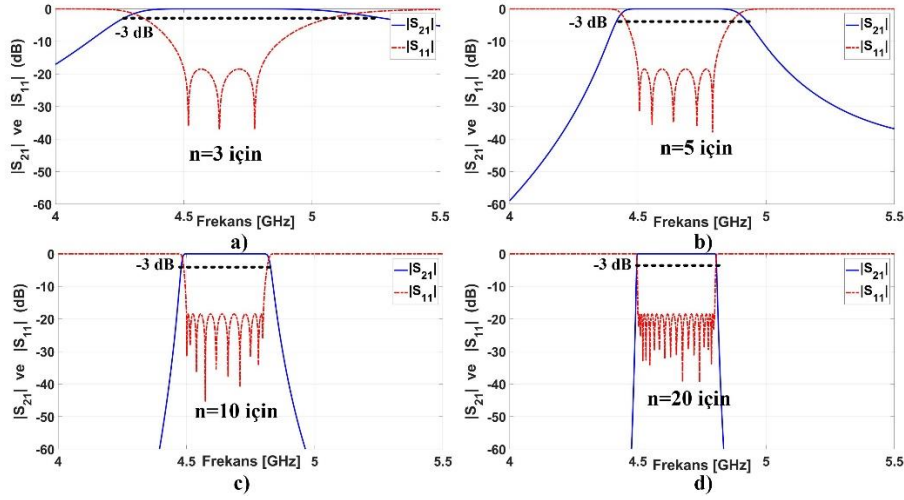
Parametreler	Açıklamalar	Değerler (mm)
$a$	DK genişliği	47.55
$b$	DK yüksekliği	22.15
$d_1$	1. iris boşluğu	28.95
$d_2$	2. iris boşluğu	18.68
$d_3$	3. iris boşluğu	15.44
$d_4$	4. iris boşluğu	15.44
$d_5$	5. iris boşluğu	18.68
$d_6$	6. iris boşluğu	28.95
$l_1$	1. ve 2. iris arasındaki mesafe	32.79
$l_2$	2. ve 3. İris arasındaki mesafe	38.07
$l_3$	3. ve 4. iris arasındaki mesafe	39.29
$l_4$	4. ve 5. iris arasındaki mesafe	38.07
$l_5$	5. ve 6. iris arasındaki mesafe	32.79
$l_0$	Flanş ile iris arasındaki mesafe	21.95 ( $=\lambda_g/4$ )

Analitik olarak tasarlanan 5. dereceden bir filtrenin frekans cevabı Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerlerinin, tasarımdan beklenen kriterleri sağladığı görülmektedir.  $S_{11}$  değerinin 4.5-4.8 GHz aralığında -20 dB değerinden küçük iken; aynı bölgede  $S_{21}$  değeri, yaklaşık 0 dB civarındadır.  $f_3$  ve  $f_4$  frekanslarındaki araya girme kaybı değerlerinin ise, sırasıyla -58.95 dB ve -36.84 dB değerlerini sağladığı görülmektedir. Teorik olarak irislerin kalınlığı ( $t_i$ ) sıfırdır. Fakat uygulamalarda bu imkânsız olduğu için mümkün olan en ince kalınlık seçilmesi tavsiye edilir.

Farklı filtre derecelerine (3., 5., 10. ve 20. derecede) göre frekans cevaplarının değişimi, Şekil 4'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, beklenildiği gibi filtre derecesi arttıkça durdurma bant bölgesine geçiş daha keskin hale gelmektedir. Bu istenilen bir durum olmasına rağmen derecenin yükselmesi daha fazla sayıda iris gerektirdiği için hem maliyet artışına hem de tasarım karmaşıklığına neden olur. Bunun yanı sıra filtre derecesi arttıkça DK'nun toplam fiziksel uzunluğu da artar. Ayrıca, Şekil 4'de görüldüğü gibi filtre derece sayısı kadar  $S_{11}$  grafiği üzerinde rezonans bölgeleri oluşur. Filtre derecesi arttıkça bant geçiren bölgedeki geri dönüş kaybının dalgalanma seviyesi azalır.



Şekil 3. Analitik olarak tasarlanan filtrenin frekans cevabı  
Figure 3. Frequency response of the analytically designed filter



Şekil 4. Farklı filtre derecelerine göre frekans cevaplarının değişimi  
Figure 4. Variation of frequency responses according to different filter orders.

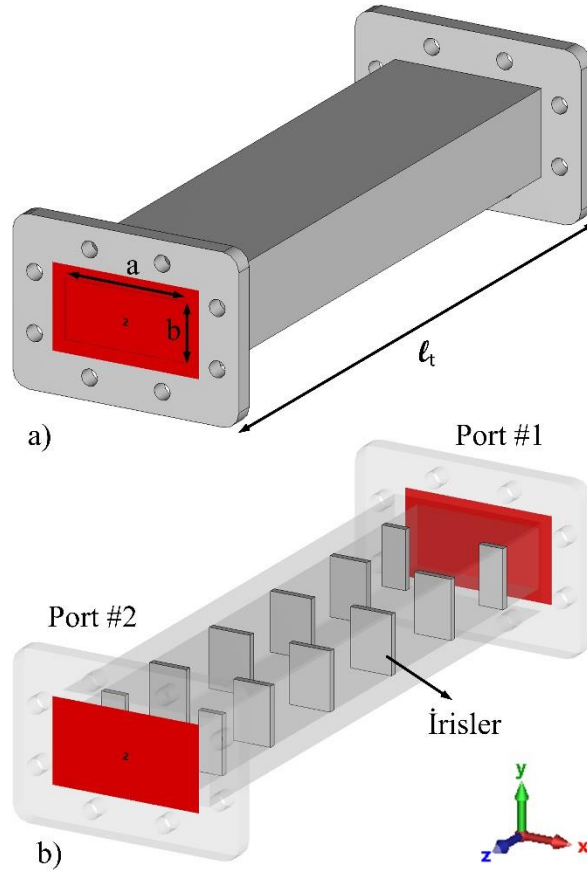
### 3. Sonuçlar

#### 3. Results

##### 3.1. Nümerik yöntemle sonuçların elde edilmesi

###### 3.1. The results obtained by numerical method

Bu çalışmadaki tasarımlar, 3D full elektromanyetik simülasyon programı olan CST Studio Suite Microwave kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon set-up, Şekil 5’de verilmiştir. Burada, DK,  $TE_{10}$  modunda ve waveguide port kullanılarak beslenmiştir. DK içerisi hava ile doludur. Simülasyonlarda frekans solver kullanılmıştır ve bu program, nümerik yöntem olarak sonlu entegrasyon tekniği (FIT- finite integration technique) kullanmaktadır. Zmin ve Zmax düzlemlerine Port#1 ve Port#1 yerleştirilmiştir. Bu düzlemlerdeki sınır koşulları Open (add space) olarak seçilmiştir.



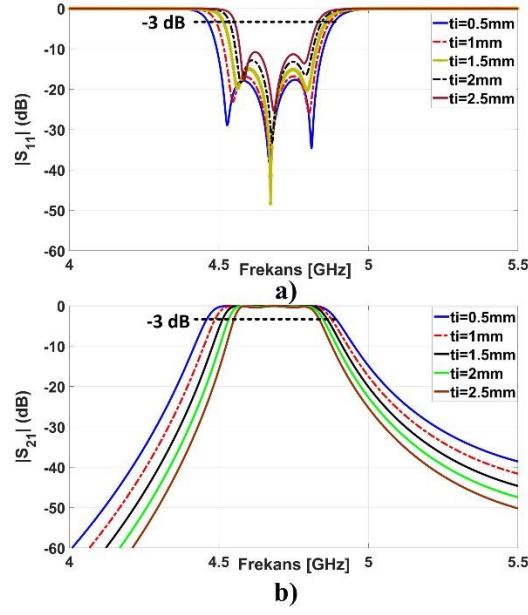
**Şekil 5.** Simülasyon set-up, a) filtrenin dış ve b) iç perspektif görünümü  
**Figure 5.** Simulation set-up, a) external and b) internal perspective view of the filter

### 3.2. İris kalınlığının ve iris tipinin filtre performansı üzerine etkileri

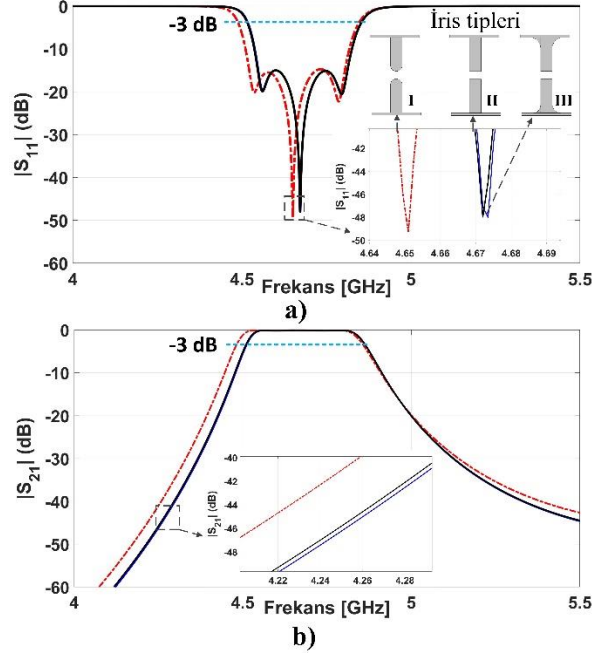
#### 3.2. Effects of iris thickness and iris type on filter performance

Tablo 1'deki boyutlar kullanılarak simülasyon programında  $TE_{10}$  modu için 5. derece DK filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Teorik hesaplamalardan farklı olarak  $t_i$  parametresi 1.5 mm olarak seçilmiştir. İris kalınlıklarının filtre performansına etkisini görmek için 5 farklı tasarımdan elde edilen  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerleri, Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, en iyi sonucun  $t_i = 0.5$  mm iris kalınlığı için elde edildiği açıkça görülmektedir çünkü bu tasarım analitik yöntemdeki iris kalınlığına en yakındır. Simülasyon sonuçlarına göre ise, aynı frekans bandında  $S_{11}$  değeri -18 dB değerinden küçük iken; aynı bölgede  $S_{21}$  değeri, yaklaşık 0.09 dB civarındadır. Ayrıca, iris kalınlığı arttıkça filtre performansının olumsuz etkilendiği söylenebilir. Yani, iris kalınlığı arttıkça geri dönüş kaybının seviyesi artar. Bunun sebebi ise, iris kalınlığı arttıkça dalga kılavuzu boyunca iki ardışık iris arasındaki faz farkının değişmesidir. Faz farkı değiştiği için (Denklem 8)'e göre frekans cevabı değişecektir. Bu da filtre performansını olumsuz etkiler.

Bu çalışmada özgün olarak, çeşitli iris tiplerinin filtre performansı üzerine etkisi Şekil 7'de verildiği gibi incelenmiştir. II. iris tipi, geleneksel iris yapısıdır. Fakat I. iris tipinde, iris uçları ovalleştirilmiş iken III. iris tipinde ise, iris dalga kılavuzuyla birleştiği noktalar ovalleştirilmiştir. I. tip iris için ovalleştirme yarıçapı  $t_i/2$  iken, III. tip iris için ovalleştirme yarıçapı, 3 mm'dir. Şekil 7 incelendiğinde II. ve III. iris tipleri için frekans cevabında kayda değer bir fark görülmemektedir. Buna göre III. tip ovalleştirmenin geleneksel iris yapısına herhangi bir olumlu etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılabilir. I. ve II. iris tipleri karşılaştırıldığında, iris uçlarındaki ovalleştirme sonucu merkez frekansı 200 MHz sola kaymıştır. Dolayısıyla bu tip bir ovalleştirmenin rezonans frekansı üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır. Benzer biçimde  $S_{21}$  değerinde sola doğru kayma söz konusudur. Ayrıca araya girme kaybının istenmeyen en yüksek seviyesi I. iris tipinde ortaya çıkmıştır. Tüm iris tiplerinde  $S_{11}$  seviyesi yaklaşık -18 dB civarındadır.



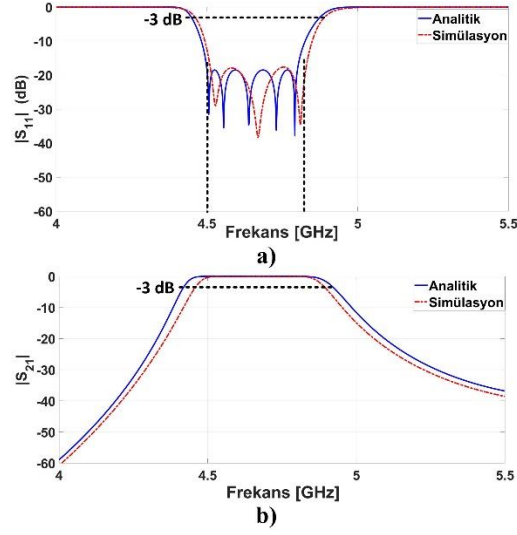
**Şekil 6.** Farklı iris kalınlıklarının filtre performansına üzerine etkisi  
**Figure 6.** Effect of different iris thicknesses on filter performance



**Şekil 7.** Çeşitli iris tiplerinin filtre performansı üzerine etkisi  
**Figure 7.** Effects of various iris types on filter performance

Önerilen 5. derece DDK filtrenin analitik ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 8’de verilmiştir. Buna göre analitik sonuçların, simülasyon sonuçlarına göre kısmi olarak daha iyi olduğu söylenebilir. Bunun nedeni ise simülasyon tasarımında kullanılan malzemeden kaynaklı kayıplardır. Diğer taraftan her iki sonuç için de merkez frekansı ( $f_0$ ), 4.65 GHz’dir.  $f_1$  alt kesim frekansı ve  $f_2$  üst kesim (@-3 dB) frekansıdır.  $f_1$  ve  $f_2$  değerleri analitik sonuçlar için sırasıyla 4.42 GHz ve 4.91 GHz iken; simülasyon sonuçlar için sırasıyla 4.46 GHz ve 4.82 GHz’dir.

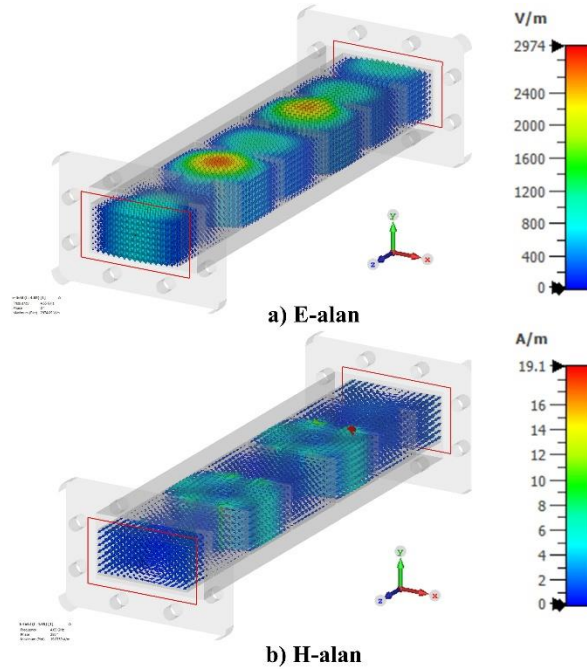




**Şekil 8.** Önerilen 5. derece DDK filtrenin analitik ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

**Figure 8.** Comparison of analytical and simulation results of the proposed 5th order DDK filter

$TE_{10}$  modu için dalga kılavuzundaki E-alan ve H-alan dağılımları Şekil 9’da verilmiştir. Bu sonuçlar, merkez frekansı olan 4.65 GHz’de elde edilmiş olup, E-alan ve H-alan değişim aralığı sırasıyla 0-2974 V/m ve 0-19.1 A/m arasında değişmektedir. Bilindiği gibi, irisler arasındaki mesafe ( $l$ ) sayısı kadar kılavuz içerisinde dalga sayısı bulunur. E-alan dağılımı incelendiğinde  $l_2$  ve  $l_4$  olduğu boşluk rezonatör bölgelerinde E-alan şiddetinin genliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. H-alan dağılımına göre E-alan şiddetinin yüksek olduğu bölgelerde doğal olarak H-alan değerinin de yüksek olduğu sonucuna ulaşılabılır.



**Şekil 9.**  $TE_{10}$  modu için 4.65 GHz’de dalga kılavuzundaki a) E-alan ve b) H-alan dağılımları

**Figure 9.** a) E-field and b) H-field distributions in the waveguide at 4.65 GHz for  $TE_{10}$  mode

Literatür taraması sonucu iris yapılı DDK filtre tasarımlarına ait bazı çalışmalar Tablo 2’de karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile karşılaştırılması amacıyla sadece bant geçiren filtre tipi dikkate alınmıştır. Bu tabloya göre çalışmalar genelde X bandında veya daha yüksek frekanslarda yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmanın frekans

aralığı 300 MHz olup, bu frekans bölgesine yakın (Akatimagool vd., 2016)'daki çalışmaya göre daha geniş bir bant genişliğine sahiptir.

**Tablo 2.** Literatürdeki iris yapıları DDK filtrelerin karşılaştırması  
*Table 2. Comparison of iris structured RWG filters in the literature*

Ref.	Filtre türü	Frekans bölgesi (GHz)	Rezonatör Türü	Filtre derecesi	Bant genişliği	Merkez frekansı ( $f_0$ ) (GHz)	$S_{11}$ (dB)	$S_{21}$ (dB)	Yöntem*
(D'Auria vd., 2015)	Bant geçiren	8-12 75-110	İris	6	%6.3	107.2	11 dB	0.95 dB	N/Ö
(Piltyay vd., 2021)	Bant geçiren	12-18	İris ve post	4	%17.9	11.75	13.79 dB	0.177 dB	A
(Akatimagool vd., 2016)	Bant geçiren	3.2-4.8	İris	2	%6.25	4	19.5 dB	0.54 dB	N/Ö
(Yechou vd., 2014)	Bant geçiren	12-15	İris	5	%6.3	14.2	25 dB	0.274 dB	N/Ö
(Dahle vd., 2017)	Bant geçiren	8-12	İris	2	%6.8	10.24	15 dB	1.5 dB	N/Ö
<b>Bu çalışma</b>	Bant geçiren	4-5.5	İris	5	%6.5	4.65	20 dB	0.09 dB	A/N

\*Analitik A, Nümerik N, Ölçüm Ö olarak kısaltılmıştır.

## 4. Tartışma ve değerlendirme

### 4. Discussion and comparison

Bu çalışmada C bandında endüktif iris yapısı kullanılarak 5. derece DDK filtre hem analitik hem de numerik olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın literatürdeki çalışmalardan farkları, radar uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen C-bandında tasarlanmasının yanı sıra iris kalınlığının ve iris tipinin filtre performansı üzerine etkilerinin incelenmesidir. İstenilen derecede ve frekans bölgesinde de bant geçiren filtre tasarlamak için tüm tasarım aşamaları detaylı bir şekilde kodlarıyla beraber verilmiştir. Ayrıca hem üç farklı iris tipinin hem de iris kalınlığının filtre performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Buna göre ince iris kalınlığına ve II. iris tipine sahip tasarımın daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılabılır. Önerilen 5. derece DDK bant geçiren filtrenin iris kalınlığının  $t_i = 0.5$  mm olduğu durum için filtre, daha iyi performans gösterir ve bu değerdeki simülasyon sonuçlarına göre, frekans bandında  $S_{11}$  değeri -18 dB değerinden küçük iken; aynı bölgede  $S_{21}$  değeri, yaklaşık 0.09 dB civarındadır. Bu çalışmada 4.5-4.8 GHz aralığı seçilmiş olmakla birlikte, EK-A'da verilen MATLAB kodu ile istenilen frekans aralığında ve derecede bir filtre tasarımı mümkündür. Bu çalışmada simetrik endüktif iris yapısı çalışılmış olup, ileriki çalışmalarda 4 farklı türde (simetrik endüktif iris, non-simetrik endüktif iris, simetrik kapasitif iris, non-simetrik kapasitif iris) iris yapılarının filtre performansı üzerine etkisi incelenecektir.

### Yazar katkısı

#### Author contribution

Araştırmacıların tümü makalenin oluşumunda 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.

**Kaynakça***References*

- Genç, A., Başıyigit, İ. B., Göksu, T., & Helhel, S. Farklı güç oranları için dikdörtgen dalga kılavuzu güç bölücülerinin karakteristiklerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 261-270. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.420745>
- AbuHussain, M., & Hasar, U. C. (2020). Design of X-bandpass waveguide Chebyshev filter based on CSRR metamaterial for telecommunication systems. *Electronics*, 9(1), 101. <https://doi.org/10.3390/electronics9010101>
- Akatimagool, S., Intarawiset, N., & Inchan, S. (2016). *Design of waveguide bandpass filter using cascade inductive and capacitive irises*. 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP) (ss. 387-388), <https://doi.org/10.1109/APCAP.2016.7843256>.
- Bage, A., & Das, S. (2017). Stopband performance improvement of CSRR-loaded waveguide bandpass filters using asymmetric slot structures. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(8), 697-699. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2723983>
- Bianchi, G., & Sorrentino, R. (2007). *Electronic filter simulation & design*. McGraw Hill Professional.
- Bod, M., & Hatefi Ardakani, H. (2018). A dual-mode waveguide filter based on stereometamaterial CSRR resonator. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(12), 3003-3006. <https://doi.org/10.1002/mop.31409>
- Boria, V. E., & Gimeno, B. (2007). Waveguide filters for satellites. *IEEE Microwave Magazine*, 8(5), 60-70. <https://doi.org/10.1109/MMM.2007.903649>
- D'Auria, M., Otter, W. J., Hazell, J., Gillatt, B. T., Long-Collins, C., Ridler, N. M., & Lucyszyn, S. (2015). 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 5(9), 1339-1349. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2462130>
- Dahle, R., Laforge, P., & Kuhling, J. (2017). 3-D printed customizable inserts for waveguide filter design at X-band. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(12), 1080-1082. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2754345>
- Eroglu, A. (2022). *RF/Microwave engineering and applications in energy systems*. John Wiley & Sons.
- Genc, A., Goksu, T., & Helhel, S. (2019). Investigation of the performances of waveguide bend components fabricated with 3D printing and copper plating. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2). <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416538>
- Genc, A., Dogan, H., Basyigit, I. B., & Helhel, S. (2019). Fabrication of low-weight broadband 90 waveguide twist at X-Ku band with 3D printing technology. *Proceedings of 10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems* (pp. 971-978), Sakarya.
- Hunter, I. (2001). *Theory and design of microwave filters*. IET.
- Jin, J., Lin, X., Jiang, Y., Wang, L., & Fan, Y. (2014). A novel E-plane substrate inserted bandpass filter with high selectivity and compact size. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 24(4), 451-456. <https://doi.org/10.1002/mmce.20785>
- İmeci, Ş. T., Tütüncü, B., Bešlija, F., & Herceg, L. (2022). Microstrip filters based on open stubs and SIR for high frequency and ultra-wideband applications. *Journal of Engineering Research*, 10(3A). <https://doi.org/10.36909/jer.10711>
- Lin, X., Jin, J., Jiang, Y., & Fan, Y. (2013). Metamaterial-inspired waveguide filters with compact size and sharp skirt selectivity. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 27(2), 224-232. <https://doi.org/10.1080/09205071.2013.743450>
- Máximo-Gutiérrez, C., Hinojosa, J., & Álvarez-Melcón, A. (2021). Narrowband and wideband bandpass filters based on empty substrate integrated waveguide loaded with dielectric elements. *IEEE Access*, 9, 32094-32105. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060516>

- Piltyay, S., Bulashenko, A., Sushko, O., Bulashenko, O., & Demchenko, I. (2021). Analytical modeling and optimization of new Ku-band tunable square waveguide iris-post polarizer. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 34(5), e2890. <https://doi.org/10.1002/jnm.2890>
- Soreng, A. M., & Mishra, A. (2018). Design techniques of microwave cavity and waveguide filters: A literature review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 8(4).
- Xiang, K. R., Chen, F. C., & Chu, Q. X. (2023). Compact waveguide filters using novel resonant coupling structures. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 71(5), 2129-2138. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2022.3224755>
- Yechou, L., Tribak, A., Kacim, M., Zbitou, J., & Mediavilla, A. (2014). *Ku-band waveguide band-pass filter with iris radius*. 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) (ss. 1-4) <https://doi.org/10.1109/ICMCS.2014.6911230>

**EK-A: Filtre tasarımı ve frekans cevabı için MATLAB kodları**

```

%% İstenilen derecede bant-geçiren dalga kılavuzu filtre tasarımı:
% Not: Bu kodla herhangi bir frekans bantında istenilen özellikte tasarım
% yapılabilir.
clear all
close all
clc
format long
% Filtrenin özellikleri girilir:
f1=4.5*10^9;% Çalışma frekans aralığı(f1-f2)
f2=4.8*10^9;
f3=(4)*1e9;%Bant durdurma frekans aralığı(f3-f4)
f4=5.5*1e9;% Örnek: >-25dB @5.5GHz
n=5; %Filtre derecesi=n, iris sayısı=n+1
e=0.01; %Chebyshev filtredeki ripple faktörü
eps1=1;m1=1;n1=0;
% Kılavuzun içindeki dielektrik ortamın elektriksel ve manyetik özellikleri
a=47.55e-3;% WR-187 dikdörtgen dalga kılavuzu ebatları
b=22.15e-3;
% *****%
c=299792458;%ışık hızı
f0=sqrt(f1*f2);% Merkez frekans
fc=(c./(2.*sqrt(eps1)).*(sqrt((m1/a).^2+(n1/b)^2)));% Kesim frekansı
wc=2*pi*fc;% Kesimdeki açısal frekans
w1=2*pi*f1;
w2=2*pi*f2;
w3=2*pi*f3;
w4=2*pi*f4;
lamda0=c/f0;% Merkez frekansı için dalga boyu
lamda01=c/f1;% f1 frekansı için dalga boyu
lamda02=c/f2;% f2 frekansı için dalga boyu
lamda03=c/f3;
lamda04=c/f4;
lamdag1=lamda01/sqrt(1-((wc/w1)^2));% f1 için kılavuz dalga boyu
lamdag2=lamda02/sqrt(1-((wc/w2)^2));% f2 için kılavuz dalga boyu
lamdag3=lamda03/sqrt(1-((wc/w3)^2));
lamdag4=lamda04/sqrt(1-((wc/w4)^2));
aaa=(lamdag1+lamdag2)/2;
bbb=(lamdag1*cos((pi/2)*(lamdag2/lamdag1)))+(lamdag2*cos((pi/2)*(lamdag1/lamdag2)));
ccc=(sin((pi/2)*(lamdag2/lamdag1)))+(sin((pi/2)*(lamdag1/lamdag2)));
lamdag0=aaa+(1/pi)*(bbb/ccc);% Merkez frekansı için kılavuz dalga boyu
alfa=(lamdag1/lamdag0)*sin((pi*lamdag0)/lamdag1)^(-1);
% alfa, araya girme kaybını (S21) hesaplamak için gereken bir katsayıdır.
x3=(alfa*lamdag3)/lamdag0*sin(pi*(lamdag0)/lamdag3);
x4=(alfa*lamdag4)/lamdag0*sin(pi*(lamdag0)/lamdag4);
Tn=chebyshevT(n,x4); % Dereceye bağlı Chebyshev type-1 fonksiyonu
IL=10*log10(1+e^2*Tn*Tn);
% Tasarım başındaki (>-25dB @5.5GHz) IL değerini (araya girme kaybı)sağladığı
%kontrol edilmeli. Sağlamazsa n derecesi artırılmalıdır.
nu=sinh(((1/n)*asin(1/e)));% z empedansını hesaplamak için katsayıdır.
for r=1:n
    ddd=(nu*nu+sin((r*pi)/n)*sin((r*pi)/n))/(sin(((2*r+1)*pi)/(2*n)));
    eee=(nu*nu+sin(((r-1)*pi)/n)*sin(((r-1)*pi)/n))/(sin(((2*r-3)*pi)/(2*n)));
    z(r)=((2*alfa)/nu)*sin(((2*r-1)*pi)/(2*n))-(1/(4*nu*alfa))*(ddd+eee);
end
z=[1 z 1];% Empedans değerleri
for r=1:n+1 % Kurado dönüşümleri
k(r)=(sqrt((nu*nu)+sin((r-1)*pi/n)*sin((r-1)*pi/n))/nu;
end
for r=2:n+2 % Suseptans değerleri
b(r-1)=(sqrt(z(r-1)*z(r))/k(r-1))-k(r-1)/(sqrt(z(r-1)*z(r)));
end
% Kurado dönüşümleri kullanılarak, suseptanslar elde edilir.
b_son=b;
for r=1:n
fi(r)=pi-0.5*[acot(b(r)/2)+acot(b(r+1)/2)];% fi, faz değerleridir.
boy(r)=(fi(r)/pi)*(lamdag0/2);% İrisler arası gerçek mesafeleri belirtir.
end
% Suseptans değerleri kullanılarak iterasyon ile her bir iris boşluğu [d(1).....d(n+1)] bulunur.
iris=0; nn=10000;

```

```

for kk=1:n+1
for k1= 1:nn
    d=(k1*a)/nn;
beta=sqrt(((2*pi*f0)*(2*pi*f0))*eps1*4*pi*10^(-7)*8.854*10^(-12))-(pi/a)*(pi/a));
gama3=sqrt(((3*pi)/(a))*((3*pi)/(a))-(((2*pi*f0)*(2*pi*f0))*eps1*4*pi*10^(-7)*8.854*10^(-12)));
BB(k1)=((2*pi)/(beta.*a)).*cot((pi.*d)/(2.*a)).*cot((pi.*d)/(2.*a)).*(1+((a.*gama3-
3*pi)/(4.*pi)).*sin((pi.*d)/a).*sin((pi.*d)/a));
if abs(b_son(kk)-BB(k1))<=0.2
iris(kk)=d;% İris boşlukları
end
end
end
for indis=1:n+1
fprintf('%d. iris aralığı, %4.2f mm"dir. \n', indis,(iris(indis)*1000));
end
for indis=1:n
fprintf('%d. ve %d. irisler arası mesafe, %4.2f mm"dir. \n', indis, indis+1,(boy(indis)*1000));
end

%% l_son ve l_0 hesaplanması:
% Not: l_son=l_0, merkez frekans için kılavuz dalga boyunun dörtte birine eşittir.
lamda0=c/f0;
lamdac=c/fc;
lamda_g=lamda0/sqrt(1-(lamda0/lamdac)^2);
fprintf('l_son ve l_0 değeri, %4.2f mm"dir. \n', (lamda_g*1000)/4);

%% Araya girme kaybı (S21) ve geri dönüş kaybının (S11) frekansa göre çizdirilmesi:
f=linspace(f3,f4,1000);% Fonksiyon aralığını tanımlayınız.
w=2.*pi.*f;
lamda0=c./f;
lamdag=lamda0./sqrt(1-((wc./w).^2));
x=((alfa.*lamdag)./lamdag0).*sin(pi.*(lamdag0./lamdag));
Tn=chebyshevT(n,x);
IL=10.*log10(1+e.^2.*Tn.*Tn);
plot(f/10^9,-IL,'Color','blue','LineStyle','-', 'LineWidth', 3); hold on;
% Araya girme kaybı
S21_db=-IL;
S21_li=(10.^(S21_db/10));
S11_li=sqrt(1-(S21_li.*S21_li));
S11_db=10.*log10(S11_li);
plot(f/10^9,S11_db,'Color','red','LineStyle','-', 'LineWidth', 3); hold on;
% Geri dönüş kaybı
grid on;axis([f3/10^9 f4/10^9 -60 0])
xlabel('Frequency [GHz]', 'fontsize', 30,'fontweight', 'b');
ylabel('|S_{21}| ve |S_{11}| (dB)', 'fontsize', 30,'fontweight', 'b');
title('Bant geçiren filtrenin frekans cevabı')
h = legend('fontsize{30}\bf{|S_{21}|}','fontsize{30}\bf{|S_{11}|}');
set(gca,'FontWeight','bold','fontsize',30)

```

## GNSS hızlarında kümelemeden topluluk kümelemesine: Meta-kümeleme odaklı bir yaklaşım

*From clustering to ensemble clustering in GNSS velocities: A Meta CLustering-based approach*

Seda ÖZARPACI \*<sup>1</sup> , Batuhan KILIÇ <sup>1</sup> , Mehmet KÖKÜM <sup>2</sup> , Uğur DOĞAN <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 23.02.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 12.06.2023

### Öz

Kıtasa deformasyonları anlayabilmek ve yorumlayabilmek için farklı yaklaşımlar ve modeller bulunmakta olup, bunlardan biri de blok modelleme yöntemidir. Blok modelleme yardımıyla plaka hareketleri, kayma hızları, faylardaki kilitleme derinlikleri, Euler kutbu gibi parametreler belirlenebilmektedir. Ancak, blok sınırları ne kadar iyi belirlenirse, modelleme sonuçları o kadar gerçeğe yaklaşmaktadır. Blok modellemenin en önemli adımlarından biri blok sınırlarının tespiti olup, kümeleme işlemi bunun için bir araç olarak kullanılabilir. Kümeleme analizi, kümelemeye konu verideki benzerlik ve farklılıklara dayanarak veriyi benzer gruplara atamaktadır. Bu çalışmada, çalışma alanı olarak Türkiye belirlenmiştir. Bu kapsamda Türkiye'nin en güncel Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite Systems – GNSS) hız alanı topluluk kümeleme algoritması ile kümelendi ve bu hız alanına uygun blok sınırları belirlenmiştir. Türkiye için %22'si sürekli ve %78'i kampanya tipi verilerden oluşan GNSS gözlemlerinin birarada değerlendirilerek güncellenmiş hız alanı ilk defa bu çalışma ile kümelendi. Kümeleme öncesinde üç ayrı yöntemle, Davies-Bouldin, Gap (gap istatistiği) ve Silhouette ile, veriye en iyi uyum sağlayan optimum küme sayısı (GNSS hız alanına en uygun küme sayısı) tespit edilmiştir. Daha sonra, k-ortalamlar, HAC ve spektral kümeleme teknikleri kullanılarak güncel GNSS hızları kümelendi. Son olarak, Meta-Kümeleme Algoritması (Meta-CLustering Algorithm - MCLA) olan topluluk kümeleme tekniği ile güncel hız alanı yatay bileşenleri kümelendi ve sonuçlar paylaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Blok sınırlarının belirlenmesi, GNSS, Güncel hız alanı, Kümeleme, Meta-Kümeleme

### Abstract

Although there are different approaches and models to understand and interpret the structures in crustal deformations, one of them is the block modeling method. Using block modeling, one can determine plate movements, parameters such as slip rates, locking depths or Euler poles on faults. However, the accuracy of the block modeling results is related to how well the block boundaries are determined. One of the most important steps of block modeling is the detection of block boundaries and clustering can be used as a tool for this. Cluster analysis assigns data to similar groups based on similarities and differences in the data subject to clustering. In this study, Türkiye was determined as the study area. In this context, we utilized the ensemble clustering algorithm to cluster recent Global Navigation Satellite Systems (GNSS) velocity field in Türkiye and determine block boundaries. Current GNSS velocity field, which consists of 78% survey and 22% continuous type GNSS data processed together, used for clustering analysis for the first time in this study. Before clustering, we employed three different methods - Davies-Bouldin, Gap statistics, and Silhouette - to determine the optimal number (cluster number that best fit to GNSS velocity field) of clusters. Then, k-means, HAC, and spectral clustering techniques were then applied to cluster current GNSS velocities. Finally, we utilized the Meta-Clustering Algorithm (MCLA) as an ensemble clustering technique to cluster the horizontal components of the current velocity domain and present our findings.

**Keywords:** Determining block boundaries, GNSS, Current velocity field, Clustering, Meta-Clustering

\*Seda ÖZARPACI; ozarpaci@yildiz.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Türkiye'nin tektoniği, Avrasya ve Arap levhalarının çarpışmaları, bu çarpışma sonucu oluşan kaçış, Kıbrıs ve Helen yayları boyunca Anadolu ve Afrika levhalarının oluşturduğu yitim zonları gibi etkiler nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir (McClusky vd., 2000). Bu süreçlerin sonucu olarak meydana gelen Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF) bölgenin en önemli doğrultu atımlı faylarını oluşturmaktadır. Bu yapıları anlamak ve yorumlayabilmek için birçok model kullanılmakla birlikte, blok modelleme yüzey deformasyonlarına en yakın sonuçları üretmektedir (Thatcher, 2009). Modelleme sonuçlarının gerçeğe yaklaşması blok sınırlarının ne kadar iyi belirlendiği ile alakalıdır. Birçok araştırmacı blok sınırlarını belirlerken haritalanmış fay yüzey izlerini, sismoloji verilerini ve/veya GNSS hız alanını kullanmış olmakla birlikte blok sınırlarının belirlenmesi yoruma açık ve öznel (Reilinger vd., 2006; Thatcher, 2009).

Blok sınırları belirlenirken kullanılacak bir yöntem de kümeleme yöntemidir. Kümeleme analizi herhangi kümelemeye konu verideki benzerlik ve farklılıklara dayanarak veriyi benzer gruplara atamaktadır. 2000'li yıllardan itibaren bu yöntem GNSS hızlarının kümeleneğinde de kullanılmakta olup, blok modelleme öncesinde, blok sınırlarını belirlemeye yardımcı olarak da kullanılabilir.

Kümeleme analizi, aynı bloklar üzerinde GNSS ile elde edilen yatay hızların birbirleri ile olan benzerliklerini dikkate alarak herhangi bir öncül bilgi olmaksızın küme/blok sınırlarını belirlemek amacıyla, bir çözüm olarak kullanılabilir. Küme analizi, ilk olarak 1932 yılında Driver ve Kroeber tarafından Antropoloji alanında gerçekleştirdikleri ufuk açıcı çalışma ile başlamıştır (Driver & Kroeber, 1932). Son 20 yıllık süreçte ise, veri madenciliği, örüntü tanıma, istatistik ve makine öğrenimi gibi çok sayıda gerçek dünya probleminin çözümünde ele alınmaktadır (Vega-Pons & Ruiz-Shulcloper, 2011; Golalipour vd., 2021). Buna ek olarak, birçok çalışma disiplinde olduğu gibi jeodezik çalışmalarda blok modellemeler öncesinde blok sınırlarının belirlenmesinde de kullanılmıştır (Savage & Simpson, 2013a; Özarpacı vd., 2023). Simpson vd. (2012), San Francisco Körfez bölgesinde yer alan 168 sürekli Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System - GPS) hız verisinin kümeleneşi için Birleştirici Hiyerarşik Kümeleme (Hierarchical Agglomerative Clustering – HAC) ve  $k$ -medoidler yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Her iki yöntem için de kümeleme öncesinde kümelerin beklenen değerlerinin karelerinin toplamının, beklenen değerlerine göre log olarak farkını karşılaştırmaya dayanan Gap istatistik tekniği kullanılmıştır ve en uygun küme sonuçlarının 4'lü kümeler ile sağlandığı görülmüştür. Kümeleme ile küme/blok sınırları boyunca bölge bölge hem kilitli ve hem de deprem üretmeden yavaş kayma hareketi (krip) olan üç büyük fay ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Savage ve Simpson (2013a;b),  $k$ -medoidler ve Euler-vektör kümeleme yöntemlerini kullanarak sırasıyla Mojave bloğu, Sierra Nevada bloğu, Kuzey Walker Lane Kuşağı, Orta Nevada Sismik Kuşağı ve Kaliforniya-Nevada bölgelerini kapsayan bir GPS ağına hızları kümelemiştir. Savage ve Simpson (2013a) ayrıca kümeleme işlemine GPS istasyonlarının konum bilgisini de eklemiş ancak sonuçlar üzerinde bir değişiklik görmemiştir. Savage ve Wells (2015), Kuzeybatı Pasifik bölgesinde bulunan 319 GPS istasyona ait hızlar için ilk olarak  $k$ -medoidler yöntemi ile en uygun kümeleme ( $k = 2 - 10$ ) sonuçlarını tespit etmiş ve elde edilen sonuçları Euler-vektör kümelemesi için başlangıç olarak kullanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, McCaffrey vd. (2013) tarafından aynı bölgede önerilen ana blok sınırları ile tutarlı kümeleme sonuçları ortaya koymuştur. Savage (2018), Japonya'nın güneybatısındaki 469 GEONET istasyonuna ait (ortalama olarak 1996-2006 yılları arasında) hızları Euler-vektör yöntemi kullanarak kümelemiş ve ana blok sınırlarını tanımlamada bu kümeleme yönteminin yararlı olduğunu belirlemiştir. Özdemir ve Karşoğlu (2019), Türkiye'deki GPS hızlarını  $k$ -ortalamlar, HAC ve Gauss Karışım Modeli (Gaussian Mixture Model - GMM) yaklaşımlarını kullanarak kümelemiştir. Özellikle, bölgede yer alan KAF ve DAF gibi en önemli aktif faylar boyunca kümeleme yöntemlerinin uyumlu sonuçlar verdiğini tespit etmiş ve bu yöntemlerde optimum küme sayısının belirlenmesi için Silhouette kullanılmıştır. Takahashi vd. (2019), Tayvan'da bulunan (2007 – 2013 yılları arasında) 281 sürekli GNSS istasyonuna ait hızları HAC yöntemi ile kümelemiştir ( $k = 2 - 11$ ). Sonuç olarak, küme sonuçlarının tektonik özellikleri yansıttığını belirtmiştir. Granat vd. (2021), Kaliforniya ve çevresinde bulunan 919 istasyona ait yatay hızların yanı sıra düşey hızlar ve coğrafi koordinat bilgilerini bir arada  $k$ -ortalamlar yöntemi ile kümelemiştir ( $k = 2 - 10$ ). Bu işlemleri gerçekleştirirken bölgedeki deprem anı, deprem sonrası deformasyonları ve yer değiştirmeleri dikkate almıştır. Özarpacı vd. (2023), Türkiye'deki üç farklı veri setine ait sürekli ve kampanya GNSS istasyonlarının hızlarını  $k$ -ortalamlar yöntemi ile kümelemiştir. Ayrıca, diğer çalışmalardan farklı olarak, kümeleme işlemi öncesinde Davies-Bouldin indeksi, Elbow yöntemi, Gap istatistiği ve Silhouette yöntemi gibi çeşitli iç göstergeler kullanarak optimum küme sayılarının belirlenmesi ve



bu veri setleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Son olarak, [Kılıç ve Özarpacı \(2022\)](#), Türkiye’de bulunan 188 sürekli GNSS istasyonuna ait hızlar üzerinde ilk kez Hibrit Çift Parçalı Graf Formülasyonu, Meta-Kümeleme Algoritması ve Negatif Olmayan Matris Faktörizasyonu (Hybrid Bipartite Graph Formulation – HBGF, Meta-CLustering Algorithm – MCLA ve Non-Negative Matrix Factorization-based clustering- NMF) odaklı topluluk kümeleme yöntemleri kullanarak küme/blok sınırlarının uyumunu incelemiştir. Tekli kümeleme algoritmalarına göre küme/blok sınırları hakkında daha iyileştirilmiş çözümler sunabileceklerini ortaya koymuş ve MCLA yönteminin GNSS verileriyle elde edilen hız alanının kümelenmesi analizinde kullanılabileceğini göstermiştir.

GNSS verilerinden elde edilen hızlarının kümelenmesinde tekli kümeleme uygulamaları çok çeşitli olması ve yaygın bir şekilde kullanılmasına rağmen, kendine özgü çeşitli sınırlamaları mevcuttur. İlk olarak, kümeleme işlemi doğası gereği denetimsiz bir öğrenme yöntemi olarak bilinmekte ve genellikle darboğaz bir problem oluşturmaktadır. Denetimli öğrenmeden farklı olarak, etiketsiz verileri anlamlı kümeler halinde gruplamaktadır ve dolayısıyla veriler hakkında öncül bir bilgi bulunmamaktadır ([Jain vd., 1999](#); [Alqurashi & Wang, 2019](#)).

İkinci olarak, [Kleinberg \(2002\)](#) tarafından ele alınan “Kümeleme için Olanaksızlık Teoremi” adlı çalışmadan yola çıkarak, farklı problemler için uygun ve optimum sonuçlar üretebilen tek bir kümeleme algoritmasının ve/veya belirli bir problem için herhangi bir kümeleme algoritmasının seçimi hakkında evrensel bir standart fikir birliği bulunmamaktadır.

Üçüncü ve son olarak, kümeleme çalışmalarında ele alınan çeşitli yöntemlerin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, konveks yapıda olmayan kümeleri bazı algoritmalar (örn. bölütleme odaklı algoritmalar) tespit edemezken, hiyerarşik ve graf (çizge) temelli çalışan bazı algoritmalar rastgele şekil gözlemlerine sahip veriler ile daha uyumlu çalışmaktadır. Dolayısıyla, çeşitli kümeleme algoritmalarından her biri, benzer bir veri kümesine örtük veya açık bir şekilde belirli bir yapı empoze ederek farklı sonuçlar üretebilmektedir. Bu noktada, birçok tekli kümeleme algoritmasının öznelliğinden kaçmak ve bir veri seti üzerine uygulanan çeşitli algoritmaların güçlü yönlerini birleştirmek için verimli yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır ([Ghaemi vd., 2009](#)). Bu nedenle, araştırmacılar tarafından bu türde problemlerin üstesinden gelebilmek ve tekli kümeleme algoritmalarının sonuçlarını iyileştirmek için topluluk kümeleme (konsensüs kümeleme) algoritmaları ortaya çıkarılmıştır ([Strehl & Ghosh, 2002](#)).

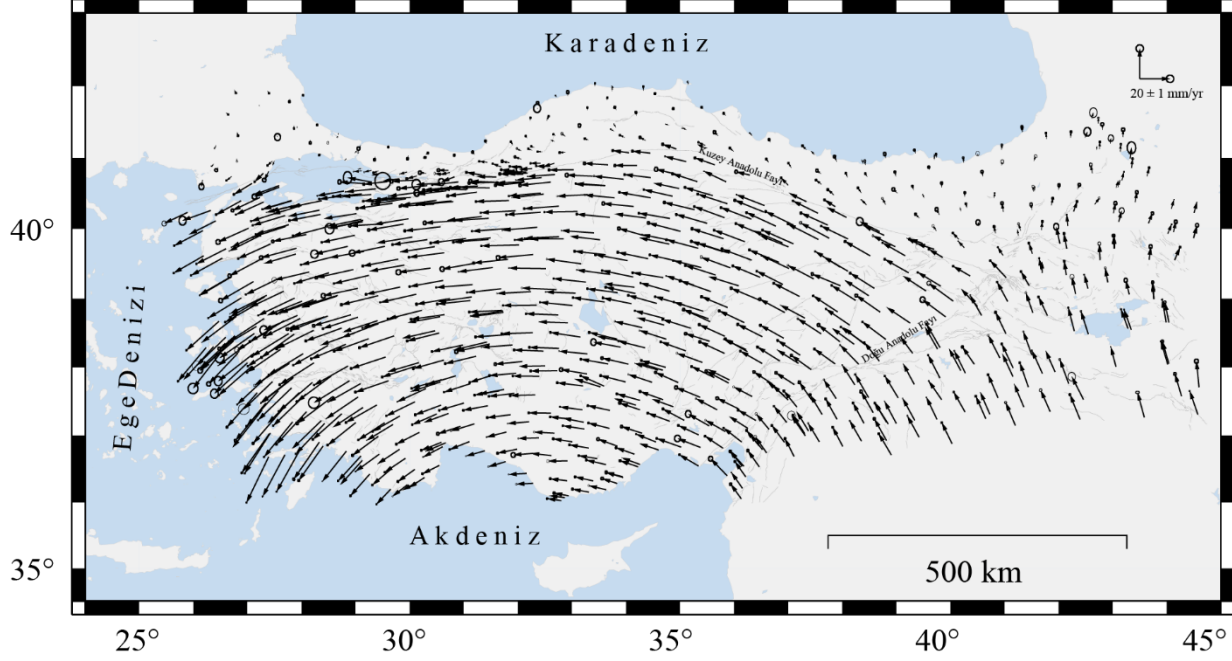
Bu çalışmada, [Kurt vd. \(2023\)](#)’de yayımlanmış Türkiye’nin en güncel ve kapsamlı GNSS verilerinden elde edilen yatay hızlar topluluk kümeleme algoritması ile kümelenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Güncel hız alanı ile kümeleme işlemi öncesi kullanılacak yöntemlerinin geçerliliklerini test etmek ve veriyi en iyi temsil eden optimum küme sayısını belirlemek için Davies-Bouldin, Gap istatistik ve Silhouette olmak üzere üç farklı iç geçerlilik yöntemi kullanılmıştır. Optimum küme sayısının tespitinin gerçekleştirilmesi ile birlikte,  $k$ -ortalamalar, HAC ve spektral kümeleme ile yatay hızlar kümelenmiştir. Bu kümeleme işlemlerinin ardından, ayrı ayrı her bir tekli kümeleme yönteminin aksine, yöntemlerin güçlü yanlarını birleştirmeye dayalı bir topluluk kümeleme algoritması olan Meta Kümeleme Algoritması ile de kümelenmiştir. Meta Kümeleme yöntemi ile tekli kümeleme algoritmalarının sonuçları girdi olarak alınarak, son bir kümeleme işlemi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca, literatürde bulunan kümeleme çalışmaları, Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalar özelinde incelenecek olunursa, sadece sürekli verilerden oluşan ve yaklaşık 200 nokta kullanılarak ya da sürekli ve kampanya noktalarının farklı çalışmalardan birleştirilerek oluşturulduğu araştırmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada kullanılan ve 836 noktadan oluşan hız alanı hem sürekli hem de kampanya noktalarının birlikte değerlendirilerek üretildiği, çalışma bölgesinin güncel hız alanıdır. Bu çalışma ile yoğunlaşan hız alanıyla elde edilen blok sınırlarının önceki kümeleme çalışmalarıyla oluşturulan blok sınırlarıyla farkları da vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, literatürde var olan blok modelleme çalışmalarındaki blok sınırları ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmanın Türkçe literatüre katkısı dışında, buradan elde edilecek blok sınırlarının bundan sonra gerçekleştirilecek blok modelleme çalışmalarında altlık olarak kullanılabilir olması önemlidir.

## 2. Veri ve yöntem

### 2. Data and method

Bu çalışmada kullanılan veri seti [Kurt vd. \(2023\)](#)’den Türkiye’nin GNSS verilerinden elde edilen en güncel ve kapsamlı yatay hızlardır (Şekil 1). Bu hızların %78’i kampanya verilerinden %22’si ise sürekli istasyonlara ait

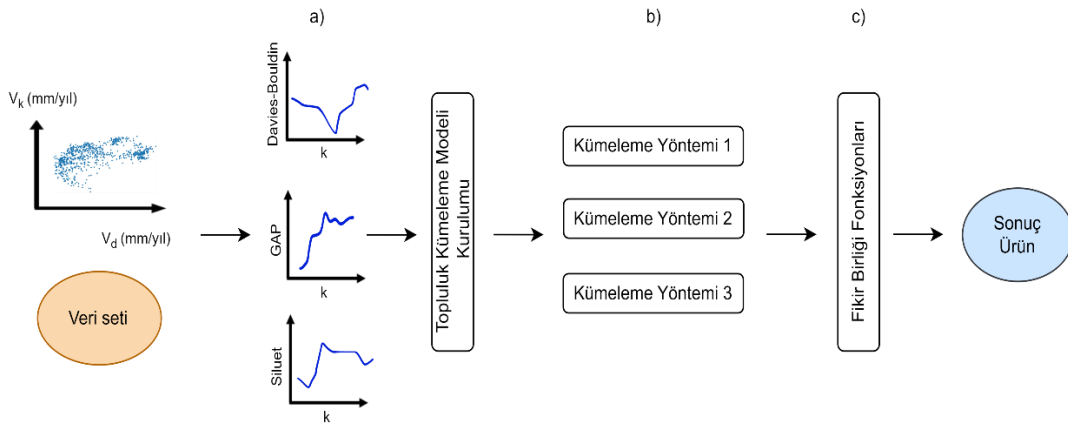
verilerin değerlendirilmesinden elde edilmiştir. Kampanya noktalarındaki ölçülerin 7-10 saat arasında yapıldığı ve 24 saatlik sürekli verilerin de dahil edildiği veri aralığı 1992 ile 2020 yılları arasını kapsamaktadır. Veriler genel olarak, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı, Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif (TUSAGA-Aktif) ağlarından yararlanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, veri sıklığını arttırabilmek adına, Türkiye Marmara Araştırma Merkezi verileri (MAGNET) ve Bursa, Sakarya, İstanbul illerinin su ve kanalizasyon idarelerine ait bölgesel ağlar da veriye entegre edilmiştir.



**Şekil 1.** Türkiye'nin Avrasya referanslı güncel yatay hız alanı (Kurt vd., 2023). Gri çizgiler Emre vd. (2013)'den alınan diri fayları göstermektedir.

**Figure 1.** Eurasia-fixed current horizontal velocity field of Turkey (Kurt et al., 2023). The grey lines indicate the active faults from Emre et al. (2013).

Kümeleme analizi için güncel GNSS hız alanı kullanılarak, toplam 836 noktanın yatay hızları değerlendirilmiştir. İlk olarak, üç farklı iç geçerlilik indeksi kullanarak veriye en uygun optimum küme sayısı ( $k$ ) belirlenmiştir (Şekil 2a). Üç yöntemden de en uyumlu sonuçlar elde edildikten sonra, topluluk kümeleme yaklaşımını oluşturmak adına farklı kümeleme tekniklerinden (topluluk üyeleri) kümeleme modelleri oluşturulmuştur (Şekil 2b). Son olarak, nihai kümeleme sonuçlarını elde etmek için topluluk kümeleme yöntemi kullanılarak üyelerin çıktıkları birleştirilmiştir (Şekil 2c) ve nihai çözümlerin blok sınırları ile uyumu incelenmiştir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Akış diyagramı

**Figure 2.** The flowchart of this study

## 2.1. Küme geçerlilik analizleri

### 2.1. Cluster validity analyses

Kümeleme analizlerinde otomatik kümeleme problemi, hem veriye uygun küme sayısının belirlenmesi hem de bu duruma karşılık gelen doğal bölütleme işleminin incelenmesini gerektirir. Bir başka ifade ile, bir veri setinin analizinde ve yorumlanmasında kullanılacak parametreler için  $k$  küme sayısının otomatik olarak belirlenmesi, araştırmacılar, uygulayıcılar ve son kullanıcılar için temel bir sorun olmaktadır (Pakhira, 2012). Bununla birlikte, uygun  $k$  küme sayısının seçimi, bir veri setindeki parametrelerin dağılım şekline, yapısına ve ölçeğine bağlı olarak bir belirsizlik sorunu ortaya çıkarmaktadır. Bu türdeki problemleri ortadan kaldırmak için, bir kümeleme sonucunun ilgili verinin altında yatan yapıya hangi ölçüde iyi uyduğunu tahmin etme süreci olarak bilinen küme geçerlilik işlemi uygulanır. Literatürde, küme geçerlilik tespiti için çeşitli indeksler geliştirilmiştir. Küme geçerlilik indeksleri, bir kümeleme işleminde veriye uygun anlamlı gruplamayı oluşturabilmek için küme içi uyum (grup içi dağılım) ve kümeler arası ayırım (gruplar arası dağılım) arasındaki ilişkiyi tanımlar (Arbelaitz vd., 2013; Xu & Tian, 2015). Bu indeksler, kümeleme algoritmasının oluşturulması sürecinde test verileri açısından iç ve dış geçerlilik indeksleri olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Dış geçerlilik indeksleri, bir veri kümesindeki veriye uygun küme sayısını tespit etmek için veri hakkında daha önceden belirlenen öncül bilgileri kullanır. Öte yandan, iç geçerlilik indeksleri, veri kümeleri için herhangi bir öncül bilgiye gerek duymamakta ve uyum iyiliğini veya geçerliliğini belirlemek için veriye özgü bilgileri kullanmaktadır (Rendón vd., 2011).

Bu çalışmada, veriye ait öncül bir bilgi olmaması nedeniyle Davies-Bouldin, Gap ve Silhouette gibi popüler üç farklı iç geçerlilik indeksi kullanılmıştır. Bu yöntemlerin her biri farklı hesaplama modellerine sahiptir (Tablo 1). Kümeleme çalışmalarında tek bir yöntem yerine farklı sayıda yöntemin incelenmesi, optimum küme sayısı tespitinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır (Özarpacı vd., 2023).

Davies-Bouldin (DB) indeksi, kompakt ve düzgün dağılımlı kümelerin belirlenmesi için sıklıkla kullanılan iç geçerlilik indekslerinden biridir. Bir kümede yer alan noktalardan merkeze olan uzaklığa göre küme içi uyum ve merkezler arasındaki uzaklığa bağlı olarak da kümeler arası ayırımı tahmin eder.  $DB(k)$  değerini en küçük yapan  $k$  değeri, bu indekse göre ideal küme sayısını ifade eder (Tablo 1). Bir diğer yöntem olan Gap istatistiği, küme değerlendirmelerinin geçerliliğini ve uyum iyiliğini tespit eden bir veri madenciliği algoritmasıdır. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre avantajı, herhangi bir kümeleme algoritmasına ve mesafe ölçüsüne uygulanabilecek şekilde tasarlanmış olmasıdır. Bu yöntem,  $k$  farklı sayıda kümedeki toplam küme içi varyasyonu, referans boş hipotez ( $W_k^{ref}$ ) dağılımı (önemli kümelenecek yok) altında verilerin beklenen değerleriyle ( $W_k^{göz}$ ) karşılaştırır (Tablo 1). Bu, hız uzayında test edilecek verilerle aynı uzamsal kapsamı işgal eden rastgele bir nokta dağılımı (Monte Carlo örnekleme yöntemi) oluşturularak elde edilir. Son olarak Silhouette indeksi, bir veri kümesindeki bir nesnenin diğer kümelere (ayırım) kıyasla kendi kümesine (uyum) ne kadar yakın olduğunu gösteren bir ölçüttür (Tablo 1). Uyumluluk, aynı kümedeki tüm noktalar arasındaki ortalama mesafeye göre ölçülür ve ayırım en yakın komşu mesafesine dayanır (Özarpacı vd., 2023). Burada, bir silhouette değeri -1 ve +1 aralığında değişim gösterir. Değer 1'e yaklaştığında,  $i$ . nesnenin atandığı küme daha uygun olmaktadır.

**Tablo 1.** Küme iç geçerlilik indeksleri

**Table 1.** Cluster internal validity indices

İsim	Formül	Açıklama	Referans
Davies-Bouldin	$R_i = \max_{i \neq j} \frac{e_i + e_j}{d_{ij}},$ $DB = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_i$	<p><math>DB</math> değeri, hesaplanan <math>R_i</math> değerleri arasından en büyük değer seçilerek elde edilir.</p> <p><math>e_i</math> kümenin ortalama hatası; <math>d_{ij}</math>, <math>i</math> ve <math>j</math> kümelerinin merkezleri arasındaki mesafeyi göstermektedir.</p>	Davies & Bouldin (1979)

**Tablo 1.** Devamı  
**Table 1.** Continuing

<b>GAP</b>	$GAP_n(k) = E_n^* \{\log(W_k^{ref})\} - \log(W_k^{göz})$	$E_n^*$ referans veri dağılımındaki $n$ örneğin beklenen değerine karşılık gelir. En optimum küme sayısının seçimi, $\log(W_k)$ değerinin referans değerinin altında en uzun düşünüşe sahip olduğu $k$ değeridir.	<b>Tibshirani vd. (2001)</b>
<b>Silhouette</b>	$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{b(i), a(i)\}}$	$a(i)$ , $i$ . nesne ile aynı kümedeki diğer tüm nesnelere arasındaki ortalama mesafeye; $b(i)$ ise $i$ . nesne ile diğer kümedeki nesnelere arasındaki ortalama uzaklıkların minimum değerine karşılık gelir.	<b>Rousseeuw (1987)</b>

## 2.2. Topluluk kümeleme modelinin kurulumu

### 2.2. Generation of ensemble clustering model

Topluluk kümelemesi veya fikir birliği kümelemesi olarak da adlandırılan bir kümeleme yöntemi, mevcut birden fazla kümeleme algoritmasına ait sonuçları nihai bir kümede birleştirir. Bir başka ifade ile, kümeleme algoritmalarının sonuçlarının avantajlarını bir araya getirmek için alternatif bir yaklaşım sunar (Strehl & Ghosh, 2002; Vega-Pons & Ruiz-Shulcloper, 2011). Topluluk kümeleme yaklaşımları, birçok tekli kümeleme algoritmasının güçlü yönlerini birleştirerek bir sonuç ürün ortaya çıkarır (Ghaemi vd., 2009). Bu nedenle, tek bir kümeleme algoritmasına ait aşağıda çeşitli açılardan listelenen durumların ötesine geçebilmektedir:

- Sağlamlık: Birleştirme işlemi, tekli kümeleme algoritmalarına kıyasla daha iyi ortalama performansa sahip olmalıdır.
- Yenilik (Orijinallik): Herhangi bir kümeleme algoritması tarafından ulaşılamayan yeni bir çözüm bulma.
- Kararlılık: Gürültü ve aykırı değerlere karşı daha düşük hassasiyete sahip sonuçları üretme kabiliyeti.
- Ölçeklenebilirlik ve Parallelleştirme: Dağıtılmış verileri hesaplama ve birden fazla veri kaynağından gelen çözümleri entegre edebilme (paralel kümeleme) yeteneğine sahip olma (Topchy vd., 2005; Ghaemi vd., 2009; Ghosh & Acharya, 2011; Golalipour vd., 2021; Kılıç & Özarpacı, 2022).

Topluluk kümeleme işlemi iki temel aşamada gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, topluluk üyelerinin üretilmesi için üretim mekanizmasının oluşturulmasıdır. Diğer adım ise, üretilen topluluk üyelerini birleştirmek için bir uzlaşma ya da fikir birliği fonksiyonunun kullanılmasıdır. Üretim mekanizmalarının oluşturulması yani topluluk üyelerinin üretilmesi işleminde literatürde farklı kümeleme algoritmalarının kullanımı, tekli bir kümeleme algoritmasında farklı parametrelerin kullanılması, nesnelere farklı alt kümelerinin kullanımı (yeniden örnekleme) gibi çeşitli yaklaşımlar mevcuttur (Kılıç & Özarpacı, 2022). Buradaki temel amaç, topluluk kümeleme işleminin kalitesini artırmak için dağılımın (çeşitliliğin) oluşturulmasıdır. Bu çalışmada, her bir topluluk üyesinin oluşturulması için farklı kümeleme algoritmalarının kullanımı stratejisi dikkate alınmıştır.

Öte yandan, uzlaşma fonksiyonunun oluşturulması, herhangi bir kümeleme topluluğu algoritmasının temel işlem adımıdır ve nihai çözümleri elde etmek için topluluk üyelerinin sonuçlarını farklı yaklaşımlar kullanarak bir araya getirir. Bu yaklaşımlar, nesnelere birlikte oluşumuna dayalı ve medyan bölütlemeyle dayalı olarak iki sınıfta toplanmaktadır (Vega-Pons & Ruiz-Shulcloper, 2011). Bu çalışmada, nesnelere birlikte oluşumuna dayalı olarak çalışan ve popüler bir topluluk kümeleme yöntemi (Golalipour vd., 2021) olan Meta-Kümeleme Algoritması kullanılmıştır.

## 2.3. Topluluk kümeleme üyelerinin oluşturulması

### 2.3. Building of ensemble clustering members

Daha önceden belirtildiği gibi, her bir kümeleme algoritması veri kümesini özel bir bakış açısıyla (belirli kriterlere göre) bölümlere ayırır ve farklı algoritmalar ortak veri kümesi üzerinde farklı sonuçlar oluşturabilir.

Bu nedenle, verilerin altında yatan örüntüler hakkında daha fazla bilgi elde etmek için üye sonuçlarının mümkün olduğundan çeşitli olması gerekmektedir (Abbasi vd., 2019; Golalipour vd., 2021; Kılıç & Özarpacı, 2022). Bu çalışmada, topluluk kümeleme üye sonuçları için gerekli çeşitliliği oluşturmak için  $k$ -ortalamalar, HAC ve spektral kümeleme gibi üç farklı kümeleme tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemler arasından,  $k$ -ortalamalar ve bölümlenme odaklı, HAC hiyerarşiye dayalı ve spektral kümeleme ise graf odaklı çalışma prensibine sahiptir.

Bölümlenme odaklı çalışan kümeleme algoritmalarındaki temel düşünce, veri noktalarının merkezini ilgili kümenin merkezi olarak kabul etmektir. Bu yöntemlerden biri olan  $k$ -ortalamalar yöntemi, ilk olarak MacQueen (1967) tarafından kullanılan denetimsiz bir öğrenme algoritmasıdır. Yöntemin altında yatan ana fikir,  $n$  veriden oluşan bir veri tabanı içerisinde her nesnenin en yakın ortalamaya sahip kümeye ait olduğu  $k$  adet kümeyi bölümlenmektir. Bu sayede, küme içi varyanslar minimize edilmekte ve küme içi benzerlikler homojen halde olmaktadır.

Hiyerarşiye dayalı olarak çalışan algoritmalarındaki temel fikir, kümeleme işleminde veri grupları arasında hiyerarşik bir ilişki oluşturmaktır. İki türlü çalışma prensibine sahiptir. Veri tabanı içerisinde yer alan her bir veri noktası başlangıçta ayrı bir küme olarak temsil edilir ve daha sonrasında en yakın komşu iki küme birleştirilir ve yeni bir kümede toplanır. Buradaki işlem  $n - 1$  defa tekrarlanır ve son olarak iki küme birleştirilerek tek bir küme oluşturulur. Kullanılan algoritmanın çalışma prensibine göre gerçekleştirilen bu işlem adımlarının tersi de uygulanabilmektedir. HAC yöntemi, bir veri setindeki belirli seviyelerdeki benzerlikleri (uzaklık ölçüleri) dikkate alarak nesnelere birleştirmeyi amaçlayan bir algoritmadır. Her yinelemede HAC kümeleme yöntemi en yakın küme çiftini birleştirmektedir. Bir başka ifade ile veri setindeki her bir nesneden başlayarak aşağıdan yukarıya doğru bir hareket izler. Tüm bu işlemler, nesnelere dendrogram olarak bilinen ağaç yapıları halinde gruplandırmaya dayanır (Kaufman & Rousseeuw, 1990). Hangi nesnelere/kümelere birleştirilmesi gerektiğine karar vermek açısından karesel Öklid, Manhattan, Kosinüs ve Minkowski gibi yöntemler aralarındaki benzerliği ölçmek için kullanılır. Öte yandan, nesne çiftlerinin benzerliklerine dayalı olarak kümelere olan yakınlıkları tanımlamak için ise: (1) Tek ya da minimum bağlantı (en yakın komşu); (2) Ortalama bağlantı (aritmetik ortalama ile ağırlıklandırılmamış grup çifti yöntemi); (3) Tam bağlantı; (4) Ağırlıklı bağlantı (aritmetik ortalama ile ağırlıklandırılmış grup çifti yöntemi); (5) Merkezi bağlantı; (6) Medyan bağlantı ve (7) Ward bağlantı kümeleme yöntemleri kullanılmaktadır (Ward, 1963).

Graf ya da spektral graf temelli çalışan algoritmalarındaki temel fikir, kümeleme problemini bir graf bölümlenme problemine dönüştürmektir. Bunun için verilen bir veri kümesinde yer alan her nesneyi bir düğüm olarak ele alarak graf oluşturur ve nesnelere arasındaki benzerliği ağırlıklı kenar olarak kabul eder (Xu & Tian, 2015). Farklı gruplar arasındaki bağlantı ağırlığını mümkün olduğunca küçük ve aynı grup içindeki kenarlar arasındaki toplam bağlantı ağırlığını mümkün olduğunca yüksek yapan bir graf bölümlenme işlemi uygular. Bu yöntem, parametrik olmayan bir model ve daha geniş bir geometri yelpazesini yakalama yeteneğine sahiptir ve güçlü bir denetimsiz öğrenme algoritmasıdır (Von Luxburg, 2007; Yan vd., 2009).

Çalışmada ele alınan her bir topluluk kümeleme üyesi verinin farklı yönlerini ortaya çıkarsa da kendi aralarında bazı avantaj ve dezavantajları da bulunmaktadır (Tablo 2).

**Tablo 2.** Kümeleme yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları  
**Table 2.** Advantages and disadvantages of the clustering methods

Yöntem	Çalışma prensibi	Avantaj	Dezavantaj
HAC	Hiyerarşi odaklı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keyfi (rastgele) türde şekillere ve özniteliklere sahip veri setleri için uygun olma,</li> <li>Yüksek ölçeklenebilirlik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Genel anlamda, zaman karmaşıklığının yüksek olması</li> </ul>
K-ortalamalar	Bölümleme odaklı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Genel olarak, düşük zaman karmaşıklığına ve yüksek hesaplama verimliliğine sahip olma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konveks olmayan verilere uygun olmama,</li> <li>Gürültülü veriye duyarlılığının olması,</li> <li>Kümeleme sonucunun küme sayısına duyarlı olması</li> </ul>
Spektral kümeleme	Graf odaklı	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keyfi (rastgele) türde şekillere ve yüksek boyutlu veri setlerine uygun olma,</li> <li>Girdi olarak yalnızca benzerlik matrisi kullanma,</li> <li>Aykırı değerlere duyarlı olmama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kümeleme sonucunun ölçekleme parametresine duyarlı olması,</li> <li>Zaman karmaşıklığının yüksek olması,</li> <li>Öz vektör seçiminin optimize edilememesi</li> </ul>

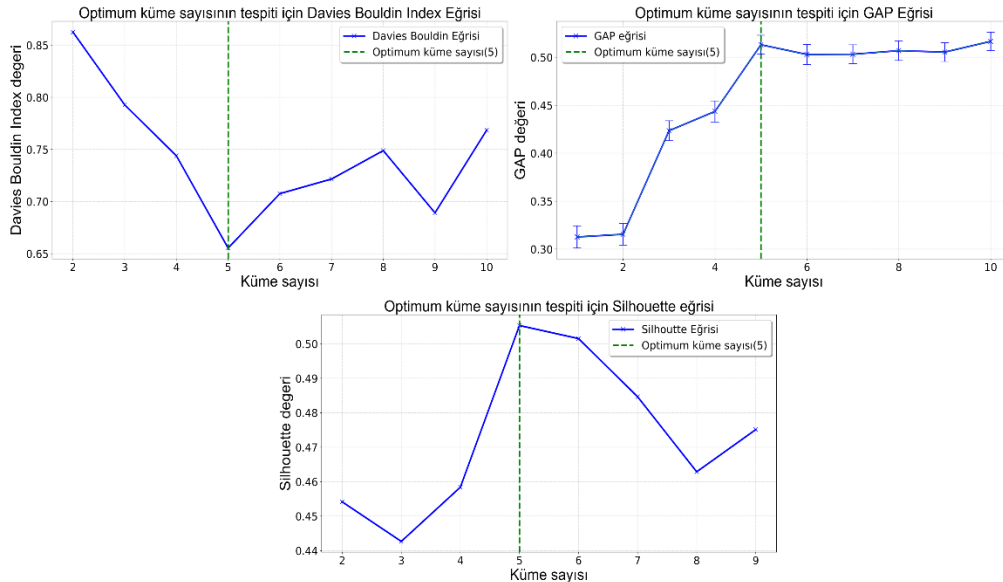
### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

##### 3.1. Optimum küme sayısının belirlenmesi

###### 3.1. Determining the optimum number of clusters

Kavramsal olarak, en uygun küme sayısının belirlenmesi genellikle öznel olarak gerçekleştirilir. Ancak veri setindeki parametrelerin dağılım şekline, yapısına ve ölçeğine bağlı olarak, veriye en uyumlu olan küme sayısının seçimi için Davies-Bouldin, Gap istatistik ve Silhouette küme geçerlilik indeksleri kullanılmıştır (Şekil 3).



**Şekil 3.** Optimum küme sayısının tespiti için küme geçerlilik indeksi sonuçları

**Figure 3.** Cluster validity index results for determining the optimum number of clusters

Şekil 3'de,  $k = 2$ 'den 10'a kadar her bir küme sayısına ait DB değerlerinin değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Küme sayısının 5 ve 9 olduğu durumlarda DB değerlerinin birbirine yakın en düşük sonuçlar elde ettiği

söylenbilir (sırasıyla  $DB(5)=0.655$  ve  $DB(9)=0.689$ ). DB sonuçları arasından, bu iki değer en iyi optimum küme sayısını temsil edebileceği görülmektedir. Bununla birlikte,  $DB(k)$  değerini en küçük yapan  $k$  değerinin, bu indekse göre ideal küme sayısını ifade ettiği düşünüldüğünde, bu veri seti için en uygun değer  $k=5$  için olduğu sonucuna varılmaktadır.

Gap istatistiği algoritması, daha önceden belirtildiği gibi  $\log(W_k)$  değerinin, veri setine ait boş referans dağılımı ile karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Gap istatistik grafiği veriyi standart sapmaları ile birlikte temsil etmektedir. Eğriye ait sonuçlar incelendiğinde  $k$  değerinin 1'den 5'e kadar artış gösterdiği, sonrasında ise önemli bir artışın olmadığı görülmektedir. Gap istatistiği ( $GAP_n(k)$ ) ile en uygun küme sayısının seçimi,  $\log(W_k)$  değerinin referans değerinin altında en uzun düşüşe sahip olduğu  $k$  değeridir. Bu nedenle,  $k=5$ 'in optimum  $k$  seçimi olduğu söylenebilir.

Bir diğer yöntem olan Silhouette indeksine ait sonuçlar incelendiğinde (Şekil 3),  $k$  küme sayılarına ait Silhouette değerinin  $k=5$  ve 6 için en uygun sonuçları elde ettiği söylenebilir (sırasıyla  $s(5)=0.505$ ,  $s(6)=0.502$ ). Bununla birlikte, Silhouette değerinin 1'e daha yakın olduğu ve buna bağlı olarak en iyi sonuçları verdiği göz önüne alındığında,  $s(i)=5$ 'in en uygun  $k$  seçimi olduğu sonucuna varılabilir. Bu durumlar, GNSS hızlarının kümelenmesi için en uygun küme sayısının 5 olduğunu göstermektedir.

Literatür incelendiğinde, bu bölgede yapılan çalışmalar için optimum küme sayısının beş olduğunu (Özdemir & Karslıoğlu, 2019; Özarpacı vd., 2023) ve veri yoğunluğunun ya da verilerin kampanya / sürekli GNSS verilerinden elde edilmiş olmasının, optimum küme sayısını değiştirmedeği görülmektedir.

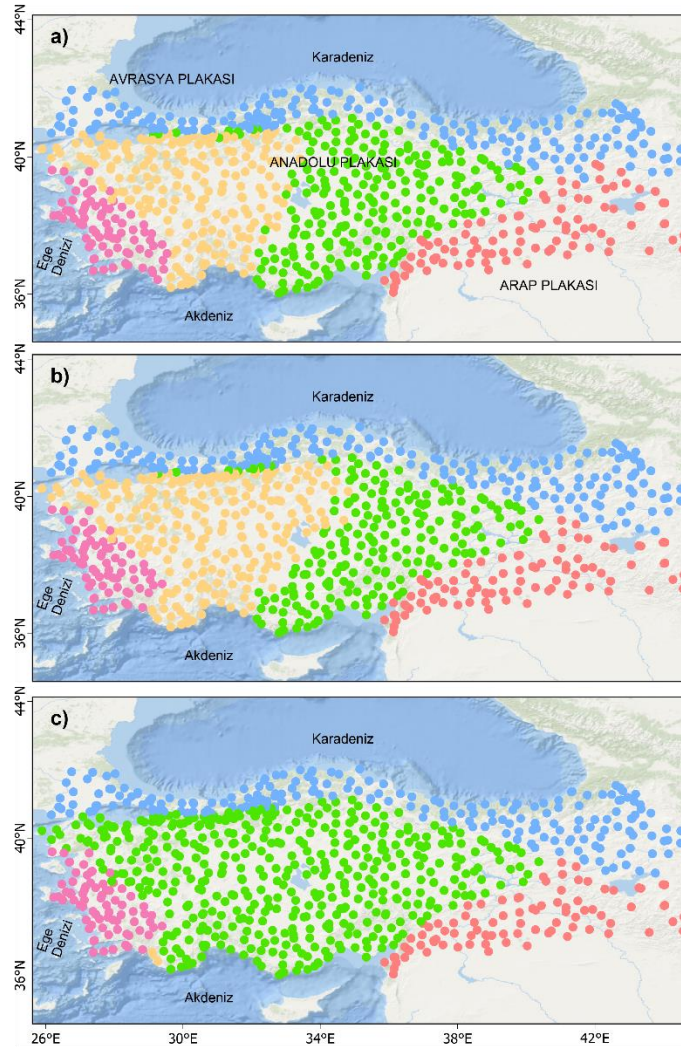
### 3.2. Tekli kümeleme algoritma sonuçları

#### 3.2. Results of the single clustering algorithm

Tekli kümeleme yöntemleri ile kümelere ayrılan güncel hız alanı Şekil 4'te paylaşılmaktadır. Kümeleme sonuçları şekillendirilirken, aynı bölgeye gelen kümeler benzer renklerde gösterilmiştir. Genel olarak, mavi daireler Avrasya levhasını, pembe daireler Arap levhasını, mor daireler Ege bloğunu, sarı ve yeşil daireler Anadolu bloğunda kalan noktaların renklendirilmesi için kullanılmıştır. Şekil 4a,  $k$ -ortalamlar, 4b HAC ve 4c spektral kümeleme yöntemlerinin sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde (Şekil 4), Anadolu bloğunu Avrasya'dan ayıran KAF ve Arap levhasından ayıran DAF, bütün yöntemlerde hemen fark edilmektedir. Ayrıca Ege bloğu dikkat çekmektedir. Rijit bir yapısı olduğu bilinen Anadolu bloğunun Şekil 4a ve b'de doğu ve batı şeklinde ikiye ayrılması bu bölgedeki hız değişiminin etkisinden kaynaklanmaktadır. Özarpacı vd. (2023), çalışmalarında  $k$ -ortalamlar yöntemini kullanarak ve optimum küme sayısını  $k=2-10$  arasında kümeleme yaparak değişimleri incelemiş ve küme sayısının artmasıyla değişmeyen sınırların blok sınırı olarak kabul edilebileceğini vurgulamıştır (Savage & Wells, 2015). Çalışmada artan  $k$  optimum küme sayısı ile Anadolu bloğu sürekli daha küçük kümelere ayrılarak bu bölgede gerçekten bir blok sınırının olmadığı gösterilmiştir.

Üç yöntemin de benzer sonuçları olmasına rağmen, tekli kümeleme yöntemlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde aradaki farklar hemen göze çarpmaktadır.  $k$ -ortalamlar yönteminin Ege bloğu ve Arap levha sınırları diğer yöntemlere göre daha genişken, spektral kümeleme algoritması Anadolu levhasının neredeyse tamamını tek bir kümeye atamıştır.  $k$ -ortalamlar ve HAC yöntemlerinde KAF boyunca özellikle 1999 depremlerinin yüzey kırığına yakın alanda bulunan noktaların fayın sınırından etkilendiği ve sınırın kümeleme yönteminden baskın çıktığı (Savage & Simpson, 2013a) görülürken, spektral kümeleme yönteminde Anadolu bloğunun tamamı aynı kümede olduğundan bu etki görülmemektedir.

Tekli kümeleme algoritmalarının dezavantajı olan bu değişken sonuçlar, Meta-Kümeleme yöntemi için girdi olarak kullanılmış ve Meta-Kümeleme yardımıyla tek bir kümeleme sonucu üretilmiştir. Konsensüs kümeleme yöntemi olan Meta-kümeleme ile GNSS verilerinden elde edilen yatay hız alanı kümelenecek sonuçlar irdelenmiştir. Literatürde oylama yöntemi ile GNSS verilerinden elde edilen hızlar Kılıç ve Özarpacı (2022) ile kümelenecek ancak bu çalışmada, Kılıç ve Özarpacı (2022)'de kullanılan hız alanından daha yoğun bir veri seti ele alınmış ve sonuçları aşağıda paylaşılmıştır.



**Şekil 4.** Tekli kümeleme algoritmaları ile kümeleme sonuçları. a) *k*-ortalamalar b) HAC c) spektral kümeleme yöntemlerinin sonuçlarını göstermektedir. Renkli daireler her bir kümeye denk gelen GNSS gözlem noktasının yerini ifade etmektedir.

**Figure 4.** Clustering results with single clustering algorithms. a) *k*-means b) HAC c) spectral clustering methods. Coloured circles indicate the location of the GNSS observation point corresponding to each cluster.

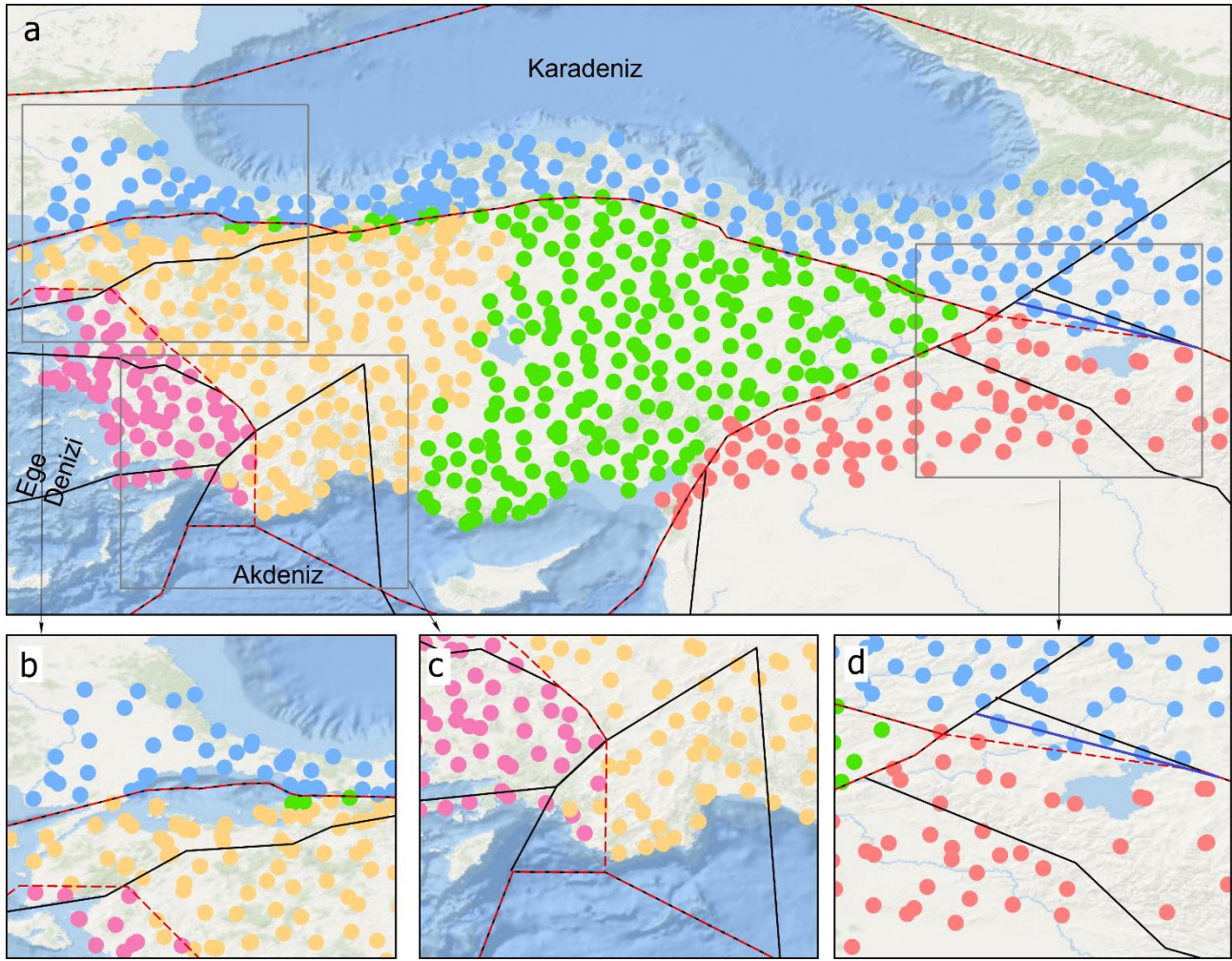
### 3.3. Meta-Kümeleme yöntemi sonuçları

#### 3.3. Meta-Clustering method results

Tekli kümeleme sonuçlarının oylanması işleminin gerçekleştirildiği Meta-Kümeleme topluluk kümelemesi ile elde edilen sonuçlar (Şekil 5) incelendiğinde, tekli kümeleme yöntemlerinin sonuçlarında ortak olarak görülen, KAF ve DAF hemen fark edilmektedir. Ayrıca Ege bloğu göze çarpmakta ve Anadolu bloğunun ikiye ayrılarak beş küme oluşturulduğu görülmektedir.

Literatürde yapılan oylama kümeleme sonuçları ile (Kılıç & Özarpacı, 2022) Doğu Anadolu bölgesindeki kümeleme sonucunda oluşan blok sınırı karşılaştırıldığında, hız alanındaki yoğunluğun artmasının buradan geçen blok sınırının değişmesine neden olduğu görülmektedir. Literatürde belirlenen blok sınırı mavi düz çizgi ile gösterilirken, yeni hız alanının kümelenmesi sonucunda elde edilen blok sınırı kırmızı kesikli çizgi olarak gösterilmektedir. Yeni blok sınırının KAF'ın Karlıova'da DAF ile birleştiği üçlü eklem bölgesinden başladığı göze çarpmaktadır.





**Şekil 5.** Meta-Kümeleme ile yapılan topluluk kümeleme sonuçları a) Türkiye'nin tamamını b) Marmara Bölgesi'ni c) Güney Ege ve Batı Akdeniz civarını d) Türkiye'nin doğusunu göstermektedir. Siyah sürekli çizgiler Reilinger vd. (2006) çalışmasından alınan blok sınırlarını, mavi sürekli çizgi Kılıç ve Özarpacı (2022) çalışmasından alınan sınır çizgisini, kırmızı kesikli çizgiler ise bu çalışma sonucunda elde edilen yenilenmiş blok sınırlarını göstermektedir.

**Figure 5.** Ensemble clustering results with Meta-Clustering. a) All Türkiye b) Marmara Region c) South Aegean and Western Mediterranean region d) Eastern Turkey. Black solid lines indicate block boundaries from Reilinger et al. (2006), blue solid line show boundary line from Kılıç and Özarpacı (2022) and red dashed lines indicate the revised block boundaries obtained in this study.

Bu çalışmada oluşturulan blok sınırları (Şekil 5), literatürdeki blok modelleme çalışmalarında kullanılan blok sınırları (Reilinger vd., 2006) referans alınarak incelenmiştir. Şekil 5b, Marmara Bölgesi'nin kümeleme sonuçlarını göstermektedir. KAF, Marmara bölgesinde güney ve kuzey kollara ayrılmaktadır (Ergintav vd., 2014). KAF'ın kayma hızının büyük bir bölümünü üzerine alan kuzey kol (Meade vd., 2002) boyunca hızdaki değişim kümeleme sonuçlarına yansımış ve kümeler kuzey kol boyunca birbirinden ayrılmıştır (Şekil 5b). Reilinger vd. (2006) çalışmasında, güney kol boyunca da bir blok sınırı belirlerken, burada önemli bir hız değişimi olmadığı görüldüğünden, bir sınır oluşturulmamıştır (Şekil 5b).

Ege bloğu da Reilinger vd. (2006) çalışmasından farklılaşmakta ve sınırlarının değiştiği görülmekte olup, Akdeniz Bölgesinin batısında bulunan üçgen benzeri blok sınırı boyunca çalışmamızda herhangi bir hız değişimi görülmemiştir (Şekil 5c).

Son olarak, Şekil 5d'de Türkiye'nin doğusu, Arap levhası ile Avrasya levhasının birleştiği bölgenin blok sınırları incelendiğinde, Reilinger vd. (2006)'den farklı olarak buradaki hız değişiminin Karlıova'dan başlayarak iki ayrı blok oluşturduğu görülmektedir.

## 4. Sonuçlar

### 4. Conclusions

Bu çalışma, topluluk kümeleme yöntemlerinden biri olan Meta-Kümeleme yönteminin, Türkiye'nin yeni yayımlanmış, en güncel ve kapsamlı GNSS hız alanından elde edilen yatay hızlar üzerindeki performansı incelenmiştir. Bu kapsamda, GNSS yatay hız alanına en uygun optimum küme sayısı tespit edilmiş ve farklı türde çalışma prensibine sahip üç tekli kümeleme yöntemi ile GNSS hızları kümelendi. Kümeleme yöntemleri ile elde edilen değerler, Meta-Kümeleme yöntemine entegre edilerek çalışma bölgesi ile olan uyumluluk düzeyi irdelenmiştir.

Sonuç olarak yeni bulunan blok sınırları; literatürle benzerlik ve farklılıklar göstermektedir. Kümeleme sonucunda, KAF ve DAF net bir şekilde görülürken, Ege bloğu da Anadolu bloğundan ayrılmaktadır. Bunlarla birlikte, KAF'ın Marmara Bölgesi'ndeki güney kolu boyunca bir blok sınırı oluşmamakta ve çarpışma kuşağındaki hız değişimi ise, iki ayrı değil tek bir çizgi şeklinde kendini göstermektedir.

Çalışmamız, topluluk kümelemesi yöntemlerinden biri olan Meta-Kümeleme algoritmasının GNSS verilerinden elde edilen yatay hız alanında kullanılabildiğini göstermektedir. Ancak veri yoğunluğu bu kümeleme yönteminin sonuçlarını etkilemektedir.

Güncel hız alanı ile elde edilen sonuçlar, bu bölgede yapılmış önceki çalışmaları geliştirir niteliktedir.

### Yazar katkısı

#### Author contribution

Bu çalışmada Özarpacı ve Kılıç yazım ve içeriğin oluşturulmasından, Köküm ve Doğan okuma ve düzenlemeden sorumludur.

### 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

- Abbasi, S. O., Nejatian, S., Parvin, H., Rezaie, V., & Bagherifard, K. (2019). Clustering ensemble selection considering quality and diversity. *Artificial Intelligence Review*, 52(2), 1311-1340. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9642-2>
- Alqurashi, T., & Wang, W. (2019). Clustering ensemble method. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 10, 1227-1246. <https://doi.org/10.1007/s13042-017-0756-7>
- Arbelaitz, O., Gurrutxaga, I., Muguerza, J., Pérez, J. M., & Perona, I. (2013). An extensive comparative study of cluster validity indices. *Pattern Recognition*, 46(1), 243-256. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.07.021>
- Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-1(2), 224-227. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1979.4766909>
- Driver, H. E., & Kroeber, A. L. (1932). Quantitative expression of cultural relationships. *University of California Publications in American Archaeology and Ethnology*, 31(4), 211-256.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., & Şaroglu, 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

- Ergintav, S., Reilinger, R. E., Çakmak, R., Floyd, M., Cakir, Z., Doğan, U., King, R. W., McClusky, S., & Özener, H. (2014). Istanbul's earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap. *Geophysical Research Letters*, 41(16), 5783-5788. <https://doi.org/10.1002/2014GL060985>
- Ghaemi, R., Sulaiman, M. N., Ibrahim, H., & Mustapha, N. (2009). A survey: clustering ensembles techniques. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 3(2), 365-374. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1329276>
- Ghosh, J., & Acharya, A. (2011). Cluster ensembles. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(4), 305-315. <https://doi.org/10.1002/widm.32>
- Golalipour, K., Akbari, E., Hamidi, S. S., Lee, M., & Enayatifar, R. (2021). From clustering to clustering ensemble selection: A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 104, 104388. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104388>
- Granat, R., Donnellan, A., Heflin, M., Lyzenga, G., Glasscoe, M., Parker, J., Pierce, M., Wang, J., Rundle, J., & Ludwig, L. G. (2021). Clustering analysis methods for GNSS observations: A data-driven approach to identifying California's major faults. *Earth and Space Science*, 8(11), e2021EA001680. <https://doi.org/10.1029/2021EA001680>
- Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: a review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 31(3), 264-323. <https://doi.org/10.1145/331499.331504>
- Karypis, G., & Kumar, V. (1998). A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 20(1), 359-392. <https://doi.org/10.1137/S106482759528799>
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (1990). *Finding groups in data: An introduction to cluster analysis*. Wiley: New York.
- Kılıç, B., & Özarpacı, S. (2022). Ensemble clustering in GPS velocities: A case study of Turkey. *Applied Sciences*, 12(24), 12636. <https://doi.org/10.3390/app122412636>
- Kleinberg, J. (2002). An impossibility theorem for clustering. In S. Becker, S. Thrun, & K. Obermayer (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (ss. 446-453.). MIT Press.
- Kurt, A. İ., Özbakir, A. D., Cingöz, A., Ergintav, S., Doğan, U., & Özarpacı, S. (2023). Contemporary velocity field for Turkey inferred from combination of a dense network of long term GNSS observations. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(SI-3), 275-293. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1844>
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In L.M. Le Cam, & J. Neyman (Eds.), *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (ss. 281-297). University of California Press.
- Mcclusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., ... Veis, G. (2000). Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3), 5695-5719. <https://doi.org/10.1029/1999JB900351>
- Meade, B. J., Hager, B. H., McClusky, S. C., Reilinger, R. E., Ergintav, S., Lenk, O., Barka, A., & Ozener, H. (2002). Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from block models of secular deformation constrained by Global Positioning System measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 208-215. <https://doi.org/10.1785/0120000837>
- Özarpacı, S., Kılıç, B., Bayrak, O. C., Özdemir, A., Yılmaz, Y., & Floyd, M. (2023). Comparative analysis of the optimum cluster number determination algorithms in clustering GPS velocities. *Geophysical Journal International*, 232(1), 70-80. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac326>
- Özdemir, S., & Karshoğlu, M. O. (2019). Soft clustering of GPS velocities from a homogeneous permanent network in Turkey. *Journal of Geodesy*, 93(8), 1171-1195. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01235-z>
- Pakhira, M. K. (2012). Finding number of clusters before finding clusters. *Procedia Technology*, 4, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.protey.2012.05.004>

- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., ... Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5). <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Rendón, E., Abundez, I., Arizmendi, A., & Quiroz, E. M. (2011). Internal versus external cluster validation indexes. *International Journal of Computers and Communications*, 5(1), 27-34.
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53-65.
- Savage, J. C., & Simpson, R. W. (2013a). Clustering of GPS velocities in the Mojave Block, southeastern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), 1747-1759. <https://doi.org/10.1029/2012JB009699>
- Savage, J. C., & Simpson, R. W. (2013b). Clustering of velocities in a GPS network spanning the Sierra Nevada Block, the northern Walker Lane Belt, and the central Nevada Seismic Belt, California-Nevada. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(9), 4937-4947. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50340>
- Savage, J. C., & Wells, R. E. (2015). Identifying block structure in the Pacific Northwest, USA. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(11), 7905-7916. <https://doi.org/10.1002/2015JB012277>
- Savage, J. C. (2018). Euler-vector clustering of GPS velocities defines microplate geometry in southwest Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2), 1954-1968. <https://doi.org/10.1002/2017JB014874>
- Simpson, R. W., Thatcher, W., & Savage, J. C. (2012). Using cluster analysis to organize and explore regional GPS velocities. *Geophysical Research Letters*, 39(18). <https://doi.org/10.1029/2012GL052755>
- Strehl, A., & Ghosh, J. (2000). Value-based customer grouping from large retail data sets. *Proceedings SPIE 4057, Data Mining and Knowledge Discovery: Theory, Tools, and Technology II* (pp. 33-42), Orlando, FL, United States.
- Strehl, A., & Ghosh, J. (2002). Cluster ensembles – A knowledge reuse framework for combining multiple partitions. *Journal of Machine Learning Research*, 3, 583-617. <https://doi.org/10.1162/153244303321897735>
- Takahashi, A., Hashimoto, M., Hu, J. C., Takeuchi, K., Tsai, M. C., & Fukahata, Y. (2019). Hierarchical cluster analysis of dense GPS data and examination of the nature of the clusters associated with regional tectonics in Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5), 5174-5191. <https://doi.org/10.1029/2018JB016995>
- Thatcher, W. (2009). How the continents deform: The evidence from tectonic geodesy. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 237-262. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100035>
- Tibshirani, R., Walther, G., & Hastie, T. (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 63(2), 411-423. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00293>
- Topchy, A., Jain, A. K., & Punch, W. (2005). Clustering ensembles: Models of consensus and weak partitions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(12), 1866-1881. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.237>
- Xu, D., & Tian, Y. (2015). A comprehensive survey of clustering algorithms. *Annals of Data Science*, 2, 165-193. <https://doi.org/10.1007/s40745-015-0040-1>
- Vega-Pons, S., & Ruiz-Shulcloper, J. (2011). A survey of clustering ensemble algorithms. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 25(03), 337-372. <https://doi.org/10.1142/S0218001411008683>
- Von Luxburg, U. (2007). A tutorial on spectral clustering. *Statistics and computing*, 17, 395-416. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0711.0189>
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236-244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Yan, D., Huang, L., & Jordan, M. I. (2009). Fast approximate spectral clustering. *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 907-916). Paris, France.

## Biyokütlenin heterojen katalizör varlığında katalitik hidrotermal sıvılaştırma yöntemi ile sıvılaştırılması ve elde edilen ürünlerin karakterizasyonu

*Liquefaction of biomass by catalytic hydrothermal liquefaction in the presence of heterogeneous catalyst and characterization of the obtained products*

Salih GENEL\*<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Kimya Bölümü, 65100, Van, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 08.04.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 12.06.2023

### Öz

Biyokütle ısı, biyolojik ve fiziksel birçok yöntemle daha değerli enerji formlarına dönüştürülebilmektedir. Biyokütlenin doğrudan yakılması sonucu enerji elde edilebildiği gibi çeşitli termokimyasal dönüşüm yöntemleri (Hidrotermal sıvılaştırma, piroliz ve gazlaştırma) ile biyokütleden katı, sıvı ve gaz yakıtlar elde edilebilmektedir. Hidrotermal sıvılaştırma biyokütlenin yüksek enerji içeriğine sahip sıvı ürünlere dönüştürülmesinde kullanılan termokimyasal proseslerden biridir. Hidrotermal sıvılaştırma işleminde çeşitli katalizörler (homojen ve heterojen) kullanılabilir. Heterojen katalizörlerin, geri kazanım ve düşük oksijen içeriğine sahip sıvı ürünlerin elde edilmesi gibi çeşitli avantajlara sahip olduğu ilgili literatürde ifade edilmiştir. Bu çalışmada, Glycyrrhiza glabra L. (Meyan) bitkisi sapı, Al ve Fe metal tozları katalizörleri varlığında ilk kez sıvılaştırılmıştır. Denemelerde 300, 325 ve 350 °C sıcaklıklar ile 30 dakika bekleme süresi parametreleri belirlenmiştir. Ürünlerin karakterizasyonu için GC-MS ve elementel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Hafif biyo-yag ve ağır biyo-yag için optimum sıcaklık 325 °C ve en yüksek enerji değeri Fe katalizörü varlığında 32.01 Mj/kg olarak elde edilmiştir. Sonuçlara göre Glycyrrhiza glabra L. bitkisinin sıvılaştırılmasında heterojen katalizörlerin etkili olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Biyokütle, Biyo-yakıt, Enerji, Glycyrrhiza glabra L., Hidrotermal sıvılaştırma

### Abstract

Biomass can be converted into more valuable forms of energy by many thermal, biological and physical methods. While energy can be obtained by direct combustion of biomass, solid, liquid and gaseous fuels can be obtained from biomass by various thermochemical conversion methods (Hydrothermal liquefaction, pyrolysis and gasification). Hydrothermal liquefaction is one of the thermochemical processes used to convert biomass into liquid products with high energy content. Various catalysts (homogeneous and heterogeneous) can be used in the hydrothermal liquefaction process. It has been stated in the relevant literature that heterogeneous catalysts have various advantages such as recovery and obtaining liquid products with low oxygen content. In this study, the stem of Glycyrrhiza glabra L. (Liquorice) plant is liquefied for the first time in the presence of Al and Fe metal powders catalyst. In the trials, 300, 325 and 350 °C temperature and 30 minutes waiting time parameters are determined. GC-MS and elemental analysis methods are used for the characterization of the products. For light bio-oil and heavy bio-oil, the optimum temperature was 325°C and the highest energy value was 32.01 Mj/kg in the presence of Fe catalyst. Heterogeneous catalyst is found to be effective in the liquefaction of Glycyrrhiza glabra L. plant.

**Keywords:** Biomass, Bio-fuel, Energy, Glycyrrhiza glabra L., Hydrothermal liquefaction

\* Salih GENEL; sgenel@yyu.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Sürdürülebilir kalkınma, insan ile doğa arasında denge kurarak doğal kaynakları tüketmeden, gelecek nesillerin ihtiyaçlarının karşılanmasına imkân verecek şekilde bugünün ve geleceğin yaşamını ve kalkınmasını programlama anlamını taşımaktadır. Bu bağlamda, Birleşmiş Milletler'in küresel kalkınma ağı oluşturmak için kurduğu bir program olan Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP), 2030 sonuna kadar ulaşılması amaçlanan hedefleri içeren 17 adet madde belirlemiştir. Bu maddelerden yedincisi olan temiz enerjinin teşvik edilmesi amacı doğrultusunda erişilebilir temiz enerji amacını ifade etmişlerdir. Erişilebilir temiz enerji amacı, enerjiye herkesin erişilebilmesini sağlamak için güneş, rüzgâr ve termal gibi temiz enerji kaynaklarına yönelimi gerekliliğini ifade etmektedir.

Enerji kaynakları sürdürülemez ve sürdürülebilir enerji kaynakları olarak ikiye ayrılmaktadır. Petrol, kömür ve doğalgaz fosil yani sürdürülemez (birincil) enerji kaynakları sınıfına girerken rüzgâr, hidroelektrik, güneş, jeotermal, hidrojen ve biyokütle enerjileri gibi kaynaklar sürdürülebilir enerji kaynakları olarak ifade edilmektedir (Klass, 1998).

Gelişmiş veya sanayileşmiş ülkelerin yüksek enerji tüketimi nedeniyle dünya çapında enerji ihtiyacı hızla artmaktadır. Bu Enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil yakıtlardan (petrol, kömür, doğalgaz) elde edilmektedir. Petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların tüketimindeki hızlı artış, küresel ısınma, asit yağmurları ve hava kirliliği gibi ciddi çevre sorunlarına yol açmaktadır (Huntley & Redalje, 2007; Klass, 1998).

Dünyanın artan enerji ihtiyacına bağlı olarak fosil yakıtların kullanımında istikrarlı bir artış görülmektedir. Fosil yakıtların kullanımının artması sonucunda sera etkisi, küresel ısınma, SO<sub>x</sub> ve NO<sub>x</sub> gazlarının artması gibi çevre sorunları ortaya çıkmıştır. Bu sorunları ortadan kaldırmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük bir kullanım potansiyeline sahip olan biyokütleden karbon nötr ve düşük emisyonlu yakıt elde edilmesine yönelik araştırmalar büyük ilgi görmüştür. Dünyanın yıllık biyokütle üretimi yaklaşık 100 milyar tondur. Bu yüksek oran dikkate alındığında biyokütle sadece yenilenebilir bir karbon kaynağı olarak kabul edilse bile ısı, elektrik, kimyasallar ve diğer ürünler için hammadde kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Long et al., 2013; Wang et al., 2017).

Biyokütle güneş enerjisini depolayan yaşayan organizma atıkları ve biyolojik materyal olarak tanımlanan ucuz, temiz, çevre dostu ve potansiyel enerji kaynağı olan maddelerdir (Kumar vd., 2018). Yeşil bitkilerin fotosentez aracılığı ile güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depolamasıyla oluşan enerji biyokütle enerjisi olarak ifade edilmektedir. Biyokütle kaynakları her yerde bulunabilmektedir. Biyokütle enerjisi, bitkisel kaynaklı atıklar, hayvansal kaynaklı atıklar ve endüstri kaynaklı atıklar olarak sınıflandırılmaktadır (Koçer & Ayhan, 2007).

Biyokütle karada ve denizde rahatlıkla elde edilebilmektedir. Bu nedenle, biyokütle enerjisi gelişimi, dünyadaki diğer sürdürülebilir enerjilerden daha popülerdir (Durak & Aysu, 2016).

Biyokütle, hücrelerin yapısal bileşenleri olan (selüloz, hemiselüloz ve lignin), ekstraktifler ve inorganik maddelerden oluşmaktadır. Genel olarak kuru biyokütle, %30-60 karbon, %30-40 oksijen, %5-6 hidrojen, <%1 nitrojen, klor ve inorganik bileşiklerden oluşmaktadır (Briens vd., 2008; Peterson vd., 2008). Biyokütlenin avantajı, yenilenebilir olması, düşük kükürt içeriği ve yok denilecek kadar CO<sub>2</sub> emisyonudur (Durak, 2019).

Biyokütle enerjisinden daha etkin ve verimli bir şekilde yararlanılabilmesi için biyokütle, biyokimyasal ve termokimyasal dönüşüm yöntemleri ile sıvı, katı ve gaz ürünlere dönüştürülmektedir. Biyokimyasal süreçler anaerobik sindirim, kompostlama ve fermantasyonu içerirken, termokimyasal süreçler yanma, karbonizasyon, gazlaştırma, sıvılaştırma, süperkritik oksidasyon ve pirolizi içermektedir. Biyokütlenin kritik altı koşullar altında su ile sıvılaştırıldığı işlemlere hidrotermal sıvılaştırma (HTL) denilmektedir. HTL prosesi, katalizörlü ve katalizörsüz sulu çözücü ortamında yüksek sıcaklıklarda (220–380°C) ve basınçlarda (5–25 Mpa) gerçekleşen, çok karmaşık reaksiyonları içeren bir dönüşüm prosesidir (Durak, 2018).

Hidrotermal sıvılaştırma, genellikle kritik altı su koşullarında, yüksek basınçta gerçekleştirilen ve sonucunda organik bir sıvı olan biyo-yağ elde edilmektedir. Bu süreç, fosil yakıtların jeolojik olarak oluşma şekline

benzemektedir. (Toor et al., 2011). Suyun benzersiz ve çevreci bir çözücü olması, işlemin ıslak biyokütlelere uygulanabilmesi, diğer termokimyasal dönüşüm işlemlerinden daha düşük sıcaklıklarda yapılması elde edilen ürün verimliliğinin daha yüksek olması hidrotermal sıvılaştırmanın tercih edilmesini teşvik etmektedir (Tekin et al., 2012).

Hidrotermal sıvılaştırma işleminde katalizörlerin kullanılması, ürün verimini ve kalitesini artırmada önemli ölçüde etkilemektedir. Katalizörler, hidrotermal proseste kömür ve katran oluşumunu baskılayarak oksijen içeriğini azaltır ve ürün verimini artırır. Biyokütlenin verimli ve etkili bir şekilde dönüştürülmesi için farklı türde katalizörler kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır (Cheng et al., 2020; Kumar et al., 2018).

Durak et al., (2022) çalışmalarında biyokütle katalitik hidrotermal proses ile sıvılaştırılma işlemi yapılmıştır. Biyokütle kaynağı olarak Ammi visnaga; Katalizör olarak Cu, W ve Fe metal tozları kullanılmıştır. Denemelerde 250, 275, 300 ve 325 °C sıcaklıklarda ve 0, 15, 30 ve 45 dakika parametreler belirlenmiştir. Karakterizasyon için GC-MS, TOC, XRD ve elementel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu hafif biyo-yağ ve ağır biyo-yağ için optimum sıcaklıklar sırasıyla 300 °C ve 325 °C idi. En yüksek ısı değeri Fe katalizörü varlığında 30.30 MJ/kg olarak elde edilmiştir.

Genel et al., (2023) çalışmalarında Ammi visnaga bitkisi Mo, Al ve Co metal tozu katalizör varlığında ve katalizörsüz olarak sıvılaştırılmıştır. Sıvılaştırma denemeleri 225, 250, 275 ve 300 °C reaksiyon sıcaklıklarında ve 0, 15, 30 ve 45 dakikalık reaksiyon sürelerinde gerçekleştirilmiştir. En yüksek sıvı ürün verimi 300 °C'de katalizörsüz deneyde %42.31, Mo katalizörü ile %39.42 olarak belirlenmiştir. Katı ve sıvı ürün karakterizasyonlarında GC-MS, XRD, TOC, SEM-EDX ve Elementel analiz yöntemleri kullanılmıştır. En yüksek enerji değerleri Co katalizörlü hafif yağ için 25.34 MJ/kg ve ağır yağ için 29.69 MJ/kg olarak belirlenmiştir.

Bir başka araştırmada kullanılan alkali ve asidik tip katalizörlerin genel olarak ürünlerin verimini ve kalitesini arttırdığı belirlenmiştir. Hidrotermal sıvılaştırmada kullanılan homojen tip katalizörlerin en önemli dezavantajı reaksiyon ortamında çözünerek sulu fazda kalmalarıdır. Katalizörlerin sulu fazda ve katı kalıntı üzerinde bulunması, geri kazanım ve yeniden kullanım problemlerine ve çevrede kimyasal birikime neden olmaktadır (Brunner, 2014).

Heterojen katalizörler, geri kazanım ve sulu fazdan ayrılma gibi özelliklerinden dolayı homojen katalizörlere göre daha önemli avantajlara sahiptir. Heterojen katalizörler üzerine yapılan yeni çalışmalarda metal, destekli metal yapılar, moleküler elekler ve metal oksit yapılar kullanılmaktadır (Durak & Genel, 2020; Gollakota et al., 2018; Li et al., 2016).

Önceki çalışmalar incelendiğinde metal katalizörlerin düşük oksijen içeriğine sahip sıvı ürünler elde etmede etkili oldukları görüldüğünden bu çalışmada katalizör olarak Fe ve Al metal tozları kullanılmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkısı Glycyrrhiza glabra L. bitkisinin metal katalizörleri varlığında sıvılaştırılmasıdır. Bu katalizörlerin en önemli avantajı suda çözünmemesi ve denemeler sonunda proses suyuna katılmamasıdır.

Biyokütle kaynağı olarak Glycyrrhiza glabra L.'nin seçilmesinin nedeni doğada kendiliğinden yetişmesi, doğal koşullara dayanıklı olması ve herhangi bir kullanım alanının olmamasıdır. Bu özelliklerden dolayı daha az maliyetli olmaktadır.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Materials and methods

Bu çalışmada biyokütle kaynağı olarak Türkiye'nin Hatay/Kumlu bölgesinden (coğrafi koordinatlar: 36°22'18" Kuzey, 36°27'19" Doğu) toplanmış olan Glycyrrhiza glabra L. bitkisi sapı kullanılmıştır.

Çalışmada biyokütle kaynağı olarak kullanılan Glycyrrhiza glabra L. bitkisi denemelerde kullanılmadan önce çeşitli ön işlemlerden geçirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Öncelikle küçük parçalara bölünerek gölgede yaklaşık 45 gün süreyle kurutulmuştur. Daha sonra kurutulan bu numuneler çelik bıçaklı bitki öğütücü değirmende öğütülerek 0.425 mm açıklığa sahip elekten geçirilerek eleme işlemi yapılmıştır. Denemelere başlamadan önce hammadde farklı analiz yöntemleri ile karakterize edilmiştir. İlk olarak bir Soxhlet özütleyicide 6 saat boyunca petrol eteri (40-60 °C) ile özü çıkarılmıştır. G. glabra'nın temel özelliklerini

belirlemek için Tappi test yöntemleri kullanılmıştır. Tappi yöntemleri kağıt ve kağıt hamuru ürünlerini ölçmek, değerlendirmek ve tanımlamak için standartlar ve teknik bilgi sunmaktadır. Tappi standartları ayrıca imalatta ve bilimsel araştırmalarda kullanılan ham maddeler için de geçerlidir. Lignin ve selüloz, sırasıyla Tappi T222 ve Tappi T202 yöntemleriyle belirlenmiştir. Holoselüloz içeriği, ligninin çözünmesini içeren, sodyum klorit yöntemi kullanılarak yapılmıştır. (Wise & Jahn, 1952). Kül ve nem içerikleri sırasıyla Tappi T211 ve Tappi T264'e göre belirlenmiştir. Daha yüksek ısıtma değeri (Isıl), nihai ürün analizinin sonuçları üzerinde Dulong formülü (Isıl değer (Mj/kg) = 33.83(C) + 144.3(H-O/8)) kullanılarak hesaplanmıştır (Zhao et al., 2021). Hammaddenin sıvılaştırma öncesi G.glabra'nın yakın ve nihai (elementel) analizleri yapılmıştır. Numunenin nihai analizini gerçekleştirmek için bir elemental analiz cihazı (LECO CHNS-932) kullanılmıştır. Durak, (2014) çalışmasında G. glabra biyokütlesine analiz yöntemleri uygulamıştır. Analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Biyokütleyle uygulanan analizler ve sonuçları  
*Table 1. Analyzes and results applied to biomass*

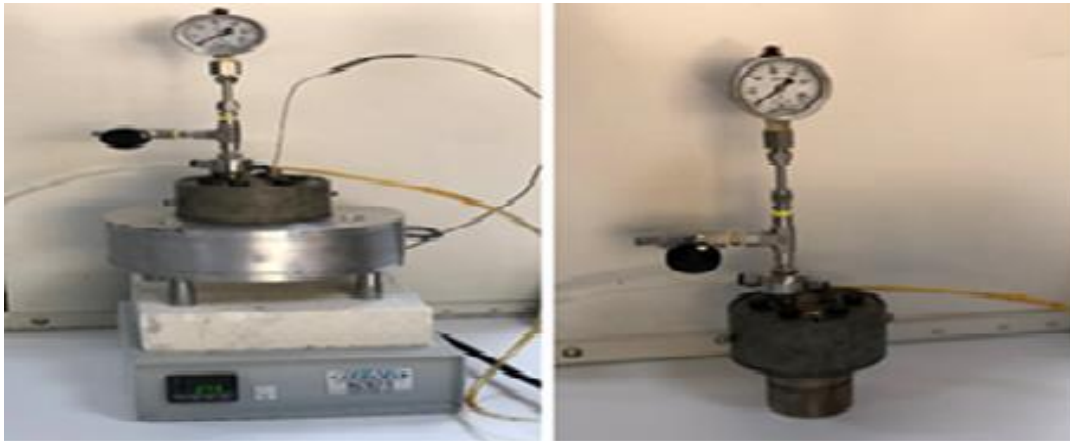
Bileşenler	Oranlar
Nem (%)	3.67
Analizler <sup>a</sup> (%)	
Kül	3.04
Lignin	26.68
Selüloz	38.49
Hemiselüloz	27.76
Ekstraktifler 40-60 °C petrol eteri)	0.36
Elementel analizler <sup>b</sup> (%)	
Karbon	45.13
Hidrojen	6.24
Azot	0.60
Oksijen <sup>c</sup>	48.02
H/C molar oran	1.64
O/C molar oran	0.79
Ampirik formül	CH <sub>1.64</sub> N <sub>0.011</sub> O <sub>0.79</sub>
Dulong'formülü	
Isıl değeri (Mj/kg)	15.61

<sup>a</sup> Kuru bazda ağırlık yüzdesi, <sup>b</sup> Kuru ve külsüz bazda ağırlık yüzdesi, <sup>c</sup> Farkına göre.

## 2.1. Deneysel prosedür

### 2.1.1. Experimental procedure

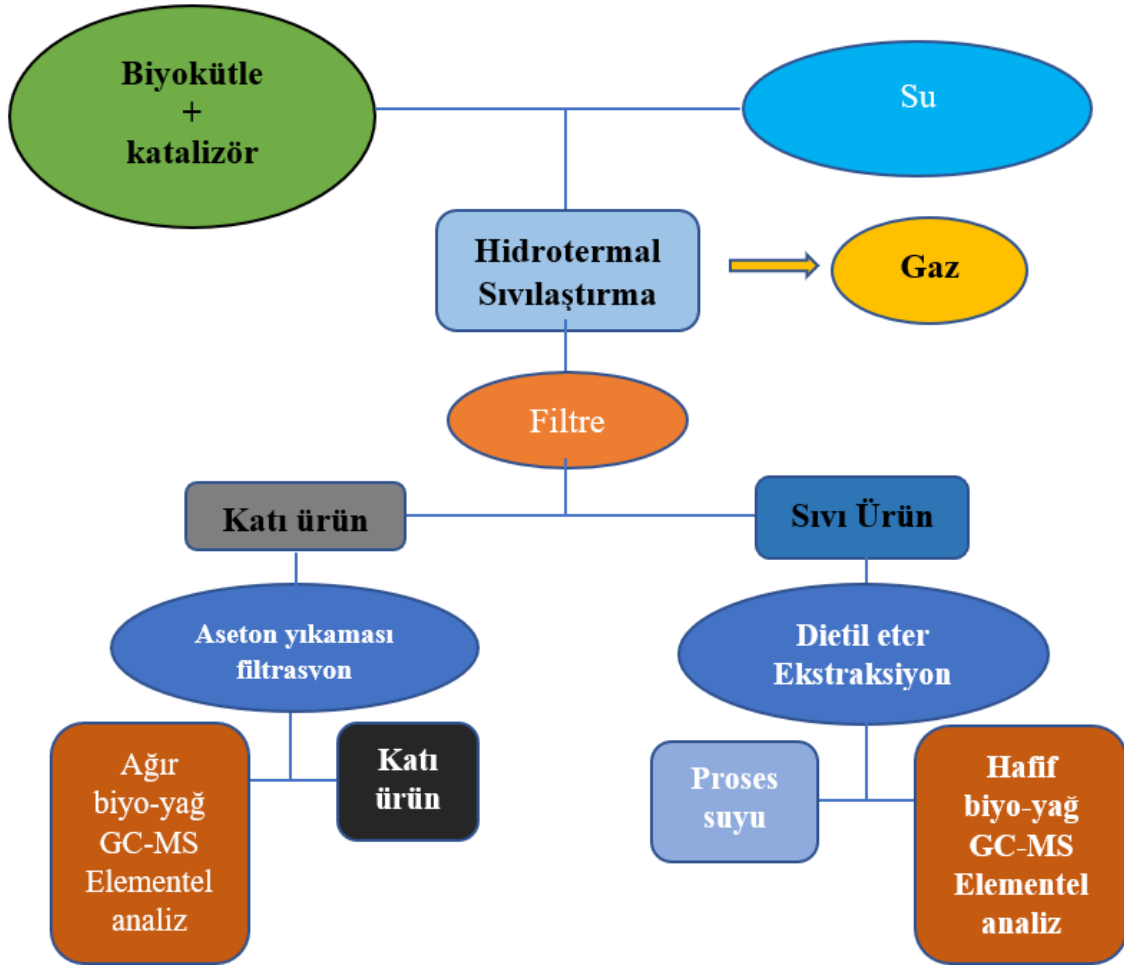
Tüm sıvılaştırma deneyleri, 316 paslanmaz 4140 alaşım reaktör sisteminde (100 ml hacimli) gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'deki reaktörün maksimum 360 °C sıcaklıkta ve 25 MPa basınçta çalışacak şekilde tasarlanmıştır.



**Şekil 1.** Hidrotermal sıvılaştırma reaktörü.  
*Figure 1. Hydrothermal liquefaction reactor*



Deneyleerde, 5 g Glycyrrhiza glabra L. unu, kullanılan biyokütle miktarının % 50'si kadar katalizör ve 60 ml distile su reaktöre konulmuştur. Daha sonra reaktör içerisindeki hava azot gazı ile süpürülmüştür. Deneyleer üç farklı sıcaklıkta (300, 325 ve 350 ° C), katalizörlü (Fe ve Al metal tozu) ve katalizörsüz olarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen sıcaklığa ulaştıktan sonra sistem oda sıcaklığına soğutulmuştur. Soğutulduktan sonra reaktör açılmış, yoğuşmayan gazlar ortamdan uzaklaştırılmış ve sonra reaktörün içi (dönüştürülmemiş ham madde ve sıvılar) ayırma için 400 mL'lik bir behere dökülmüştür. Ardından por4 kroze ile katı ve sıvı numuneler birbirinden ayrılmıştır. Sıvı numuneler ayırma hunisi ile dietil eter kullanılarak özütlenerek sıvı ürün elde edilmiştir. Elde edilen bu sıvı ürün hafif biyoyağ (HBY) olarak adlandırılmış, ardından katı numuneler asetonla özütlenerek buradan elde edilen sıvı ürün ise ağır biyoyağ (ABY) olarak isimlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma aşamaları ve elde edilen ürünlere uygulanan analiz yöntemleri Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Glycyrrhiza glabra'nın hidrotermal sıvılaştırma prosedürü.

Figure 2. Glabra Hydrothermal liquefaction procedure of Glycyrrhiza glabra

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Findings and discussion

#### 3.1. Sıcaklık ve katalizörün ürün verimine etkisi

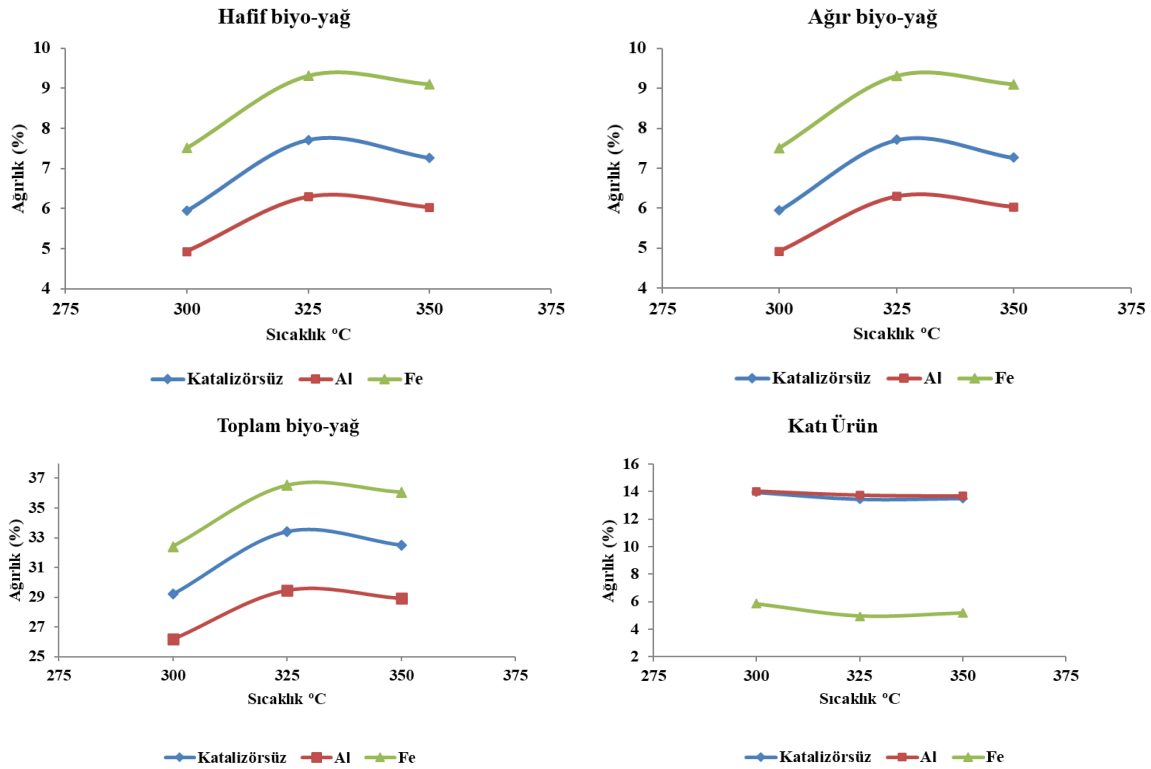
##### 3.1. Effect of temperature and catalyst on product yield

Deneyleer sonunda elde edilen ürünlerin % ağırlık oranları Tablo 2'de verilmiştir. Denemeler 3 tekrarlı olarak tekrarlanmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Ürünlerin oranlarına bakıldığında hem katalizörün hem de sıcaklığın ürünler üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca Tablo 2'de elde edilen değerlerin daha iyi anlaşılması ve yorumlanması için bu değerler Şekil 3'te çizilmiştir.

**Tablo 2.** Glycyrrhiza glabra'nın farklı sıcaklıklarda katalizörlü ve katalizörsüz hidrotermal sıvılaştırılmasıyla elde edilen ürünlerin dönüşümü ve dağılımı

**Table 2.** Conversion and distribution of products obtained by hydrothermal liquefaction of Glycyrrhiza glabra with and without catalyst at different temperatures.

Parametreler	HBY %	ABY %	Katı %	Toplam biyo-yag %
300 °C katalizörsüz	5.94	23.27	13.95	29.21
325 °C katalizörsüz	7.71	25.70	13.44	33.41
350 °C katalizörsüz	7.26	25.25	13.51	32.51
300 °C Al	4.92	21.26	14.02	26.18
325 °C Al	6.29	23.17	13.74	29.45
350 °C Al	6.02	22.89	13.68	28.92
300 °C Fe	7.51	24.89	5.86	32.40
325 °C Fe	9.31	27.21	4.94	36.52
350 °C Fe	9.10	26.95	5.17	36.05



**Şekil 3.** Glycyrrhiza glabra'nın hidrotermal sıvılaştırmanın ürün verimine sıcaklık ve katalizörlerin etkisi

**Figure 3.** The effect of temperature and catalysts on the yield of hydrothermal liquefaction of Glycyrrhiza glabra

Grafikler incelendiğinde, hidrotermal sıvılaştırma işlemi için sıcaklığın hem katalizörlü hem de katalizörsüz deneylerde etkili olduğu görülmüştür. Deneylerde hafif ve ağır yağ olarak adlandırılan iki farklı sıvı ürün ve geri kalan katı ürün elde edilmiştir.

En yüksek hafif ve ağır biyo-yag verimi 325 °C'de elde edilirken, artan sıcaklık değeri ile depolimerizasyonun devam etmesi ve gaz ürün dönüşümünün artması, 325°C'den sonra sıvı ürünlerdeki azalmanın nedeni olarak gösterilebilir.

Şekil 3 incelendiğinde katalizörlerin ürün miktarları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Katalizörlü ve katalizörsüz tüm denemelerde 325 °C'ye kadar hafif biyo-yağ veriminde artış olduğu ve 350 °C'ye doğru hafif biyo-yağ verimlerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumla ilgili olarak 325 °C'den sonra ikincil reaksiyonların baskın olduğu, sıvı oluşumunu baskılayarak gaz ve katı ürün oluşumunun desteklediği söylenebilir. En yüksek hafif biyo-yağ verimi 325 °C'de sırasıyla Fe katalizörü, katalizörsüz ve Al katalizörü için %9.31, %7.71 ve %6.29 olarak bulunmuştur.

Ağır biyo-yağ oluşumunda da benzer bir durum gözlemlenmiştir. En yüksek ağır biyo-yağ verimi 325 °C'de sırasıyla Fe katalizörü, katalizörsüz ve Al katalizörü için %27.21, %25.70 ve %23.17 olarak bulunmuştur. Hafif ve ağır biyo-yağ toplamından oluşan toplam biyo-yağın sıcaklık ile değişimi görülmektedir. Daha önceki grafiklerde sıvı ürünlerin sıcaklık ile etkileşimleri detaylı olarak anlatılmıştır. Hidrotermal dönüşüm toplam biyo-yağ dikkate alınarak değerlendirilirse en yüksek sıvı ürünler sıcaklık 325 °C'de Fe, katalizörsüz ve Al katalizörlü denemelerde sırasıyla %36.52, %33.41 ve %29.45 olarak elde edilmiştir.

Şekil 3'de katı ürün oluşumunun sıcaklıktan nasıl etkilendiği görülmektedir. Katı ürün oluşumunun sıcaklık ile azalması beklenen bir durumdur. Sıcaklık ile hammaddenin daha yüksek derecede parçalandığı bilinmektedir. Yalnız belirli bir sıcaklıktan sonra oluşan ürünlerdeki kararsız bileşikler tekrar bir araya gelerek katı ürün oluşumunu destekleyebilmektedirler. Grafik incelendiğinde buna benzer bir durum gözlenmektedir. Katı ürün oluşumunun en az olduğu deneme sıvı ürünlerin en yüksek verimde elde edildiği Fe katalizörlü denemelerdir. Tüm sıcaklıklar için en az katı oluşumu sırasıyla Fe, katalizörsüz ve Al katalizörleri için 325 °C'de sırasıyla %4.94, %13.44 ve %13.74 olarak elde edilmiştir.

### 3.2. Elde edilen ürünlerin karakterizasyonu

#### 3.2. Characterization of the obtained products

Hidrotermal sıvılaştırma işleminde biyokütle farklı reaksiyon mekanizmalarına göre ayrışır ve bunun sonucunda farklı ürünler oluşur. Biyokütle yapısındaki biyopolimerlerin suda çözünür oligomerlere hidrolizini takiben, molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağları glikoz, asetaldehit, asetik asit ve furfural gibi basit monomerlerin oluşumu ile sonuçlanmaktadır (Çolak et al., 2018; Durak & Genel, 2018; He et al., 2008).

#### 3.2.1. Elementel analiz

##### 3.2.1. Elemental analysis

Yapılan bu çalışmada sıvı ürünlerin ısı değerlerinin hesaplanmasında ilk olarak elementel analiz yöntemi kullanılmıştır. Tablo 3'de tüm sıcaklık denemelerinde elde edilen sıvı ürünlerin elementel analiz sonuçlarını ve hesaplanan ısı değerlerini gösterilmiştir. Elde edilen ürünlerde ağır biyo-yağın C içeriğinin hafif biyo-yağa göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ağır biyo-yağ C oranı 64.26 ile 71.65 arasında, ısı değerleri ise 27.43 ile 32.01 Mjkg<sup>-1</sup> arasında değişmiştir. Hafif biyo-yağ C oranı 59.09 ile 61.24 arasında ve ısı değeri 23,90 ile 24.61 Mjkg<sup>-1</sup> arasında değişmiştir. Hammaddenin C içeriği 45.13 ve ısı değeri 15.61 Mjkg<sup>-1</sup> idi. Elde edilen sıvı ürünlerin hem C oranı hem de ısı değerleri ham maddeden elde edilenlere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu da denemelerin amacına ulaştığını göstermiştir.

**Tablo 3.** 325°C'de biyo-yağların element analizinin sonuçları

**Table 3.** Results of elemental analysis of bio-oils at 325°C

325 °C	Katalizörsüz		Al		Fe	
	HBV	ABV	HBV	ABV	HBV	ABV
C	60.59	69.59	61.24	64.26	59.09	71.65
H	6.87	8.00	6.60	7.40	6.91	7.81
N	0.36	0.85	0.35	0.69	0.42	1.11
O	32.18	21.56	31.81	27.65	33.59	19.43
H/C molar oran	1.35	1.37	1.29	1.37	1.39	1.30
O/C molar oran	0.40	0.23	0.39	0.32	0.43	0.20
Üst ısı değeri MJ/kg	<b>24.61</b>	<b>31.20</b>	<b>24.51</b>	<b>27.43</b>	<b>23.90</b>	<b>32.01</b>

### 3.1.2. GC-MS Analiz

#### 3.1.2. GC-MS Analysis

325°C'de sıcaklıklarda katalizör ve katalizörsüz deneylerde elde edilen sıvı ürünlerin GC-MS analizi Tablo 4'de gösterilmiştir. Genel olarak sıvı ürünlerin monoaromatik, alifatik, poliaromatik ve oksijen bileşiklerinden oluştuğu söylenebilir. Elde edilen GC-MS sonuçları, bileşik türleri üzerindeki katalizör ve sıcaklık etkisini incelemek için Şekil 4'de çizilmiştir.

**Tablo 4.** 325 °C-30 dakika denemelerinde elde edilen biyo-yağlarda bulunan kimyasal bileşikler  
**Table 4.** Chemical compounds found in bio-oils obtained in 325 °C-30 min. Experiments

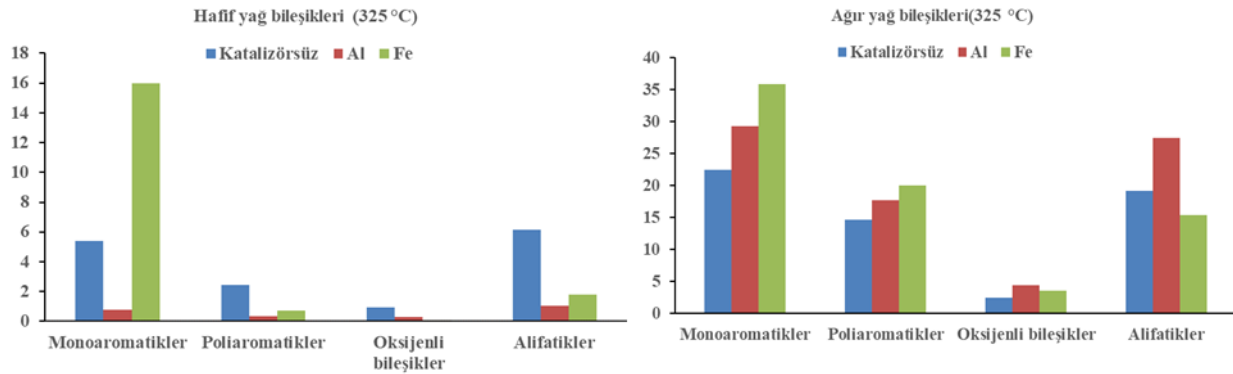
No	Birleşimin adı	Formülü	Katalizörsüz		Al		Fe	
			Hafif yağ	Ağır yağ	Hafif yağ	Ağır yağ	Hafif yağ	Ağır yağ
<b>Monoaromatikler</b>								
1	1,2,4,5-Tetrazine	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	0.58
2	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0.07	-	-	-	-	-
3	1,3-Diazine	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	-	-	0.05	-	-	0.60
4	Tisopurine	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> N <sub>4</sub> S	-	-	-	-	-	0.60
5	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-	-	0.03	-	-	0.60
6	1,4-Benzenediamine	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	-	-	0.06	-	-	-
7	5,6,7-trichloro-1,2,3-benzotriazin-4(3H)-ONE	C <sub>7</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O	0.51	-	-	-	-	-
8	Benzene, 1-(bromomethyl)-2-c hloro	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> BrCl	-	-	-	-	0.03	0.61
9	Benzene, 1,4-dimethoxy 4H-3-amino-1-benzothiopyran-4-one1,1-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-	0.55	-	0.56	-	-
10	dioxide	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub> S	0.35	-	-	-	-	-
11	Acetic acid, 2-methylphenyl ester	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	0.04	-
12	Dextroamphetamine	C <sub>9</sub> H <sub>13</sub> N	-	0.55	-	0.55	-	-
13	Butanal,(2,4-dinitrophenyl)hydrazone 3-Hydroxy-5-methoxyphenyl-N,N-dimethy	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	-	2.75	0.03	3.84	-	0.59
14	lcarbamate	C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	1.18
15	Benzene, tert-butyl- Methyl3-bromo-(4'-chlorophenyl)-2-cyano-2-	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	-	-	-	-	0.14	-
16	hydroxypropanoate	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> BrClO <sub>3</sub>	0.14	-	-	-	-	-
17	6-Chloro-2-methyl-1, 2-dihydroisoquinoline -3- carbaldehyde	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub> ClNO	-	-	0.11	-	-	-
18	Butyric acid, p-methoxyphenyl ester	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	0.59
19	2-(4'-Methylphenyl)-1,2,4-triazolo[1,5- a]pyridine	C <sub>13</sub> H <sub>11</sub> N <sub>3</sub>	-	3.25	-	4.45	-	-
20	Dimethyl5-fluoromethylcyclopenta[c]pyridine- 2,2-dicarboxylate	C <sub>13</sub> H <sub>14</sub> FNO <sub>4</sub>	-	1.95	-	2.75	-	-
21	Oxirane, [[4-(1,1-dimethylethy l)phenoxy]methyl]-	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	2.34	7.53	0.50	8.85	0.79	18.8 7
22	2-Methyl-5-carbomet hoxadamantan-2-eqol	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	4.17
23	Acetamide,2-chloro-N-(2,6-diethylphenyl)-N- (methoxymethyl)-	C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> ClNO <sub>2</sub>	0.07	0.55	-	0.56	-	-
24	4-Methyl-1H-pyrano[4,3-c]pyridine	C <sub>16</sub> H <sub>15</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.42	-	-	-	-	-
25	Ethanone,1,1'-[1,4-dihydro-4-(phenylmethyl)- 3,5-pyridinediyl]bis	C <sub>16</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>2</sub>	0.14	-	-	-	0.04	-
26	Ethanone,1,1'-[1,4-dihydro-4-(phenylmethyl)- 3,5-pyridinediyl]bis	C <sub>16</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>2</sub>	-	2.55	-	3.85	-	-
27	2-Oxo-2H-pyrrolo[2,1-a]isoquinoline-3,3- dicarboxylic acid diethyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>17</sub> NO <sub>5</sub>	0.50	-	-	-	-	-
28	N,N-Dimethylmesitylphenylacetamide	C <sub>19</sub> H <sub>23</sub> NO	0.28	-	-	-	0.07	-
29	Phenyl 2-Oxocyclododecanec arboxylate 2,3-dideoxy-4,5-o-bis(methoxymethyl)-3-(1,3- dioxo-2-azindan-2-	C <sub>19</sub> H <sub>26</sub> O <sub>3</sub>	-	1.75	-	2.22	-	-
30	yl)-1-lyxo-hexose,ethylene aceta Phenyl4-[bis(ethoxycarbonyl)but-3-ynyl]-2,3,4- trid	C <sub>20</sub> H <sub>27</sub> NO <sub>9</sub>	0.49	-	-	-	0.07	-
31	eoxy-à,L-glcero-pent2-enopyranosid Methyl3-(3,3,5,5-Tetramethy lcyclohex-1-enyl)-3-(o-acetamidophenyl)-2- propenoate	C <sub>21</sub> H <sub>26</sub> O <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	6.88
32		C <sub>22</sub> H <sub>29</sub> NO <sub>3</sub>	-	1.05	-	1.66	-	-
33	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diheptylester	C <sub>22</sub> H <sub>34</sub> O <sub>4</sub>	0.07	-	-	-	-	0.58
34	13-Tosyl-13-aza-16-h exadecanlactam	C <sub>22</sub> H <sub>36</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S	-	-	-	-	0.07	-

**Tablo 4.** Devamı  
**Table 4.** Continuing

No	Birleşimin adı	Formülü	Katalizörsüz		Al		Fe	
			Hafif yağ	Ağır yağ	Hafif yağ	Ağır yağ	Hafif yağ	Ağır yağ
<b>Poliaromatikler</b>								
35	2-Ethoxy-3-nitroimid azo[1,2-a]pyridine	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	0.86	-	1.11	-	-
36	Perdeutero Benzophenone	C <sub>13</sub> D <sub>10</sub> O	-	-	-	-	0.07	0.58
37	9H-Fluorene	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	0.93	4.25	0.14	4.95	0.48	9.39
38	4-Nitrophenylanthrani late	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	0.58
39	1-Benzyl-2-cyano-3-piperideine (minor epimer B)	C <sub>13</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	1.19
40	Benzamide,N-(3-nitrophenyl)-4-fluoro	C <sub>13</sub> H <sub>9</sub> FN <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	-	-	-	-	-
41	Ethanedione, diphenyl	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.07	0.55	-	1.09	-	0.59
42	Ethanedione, diphenyl	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	-	0.53	-	0.56	0.03	0.58
43	Mazindol	C <sub>16</sub> H <sub>13</sub> ClN <sub>2</sub> O	-	1.11	-	1.12	-	-
44	N-Benzyl-1-(3'-methoxy-5-hydroxyphenyl)propan-2-amine	C <sub>17</sub> H <sub>21</sub> NO <sub>2</sub>	0.07	-	-	-	-	-
45	(-)-azodi-(1-methyl-2-phenylethane)	C <sub>18</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub>	-	-	-	-	0.04	-
46	2-Phenoxy-4-(phenylsulfonyl)-5-(p-tolyl)furan	C <sub>23</sub> H <sub>18</sub> O <sub>4</sub> S	1.08	4.75	0.22	6.06	-	-
47	2-(4-Chlorophenyl)-2-(1-imidazolyl)-1,3-diphenylpropane	C <sub>24</sub> H <sub>21</sub> ClN <sub>2</sub>	0.14	-	-	-	0.07	-
48	Bisisoflavan	C <sub>30</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	1.21
49	Di[9,10-bis(,3-dithiol-2-ylideme)-9,10-dihydro-2-anthracenylmethyl]malonate	C <sub>45</sub> H <sub>28</sub> O <sub>4</sub> S <sub>8</sub>	-	-	-	-	-	0.59
50	3-(4-Chlorophenyl)-4,6-dimethoxy-2,7-di[3-(4-chlorophenyl)-4,6-dimethoxyindol-7-ylmethyl]indole	C <sub>50</sub> H <sub>42</sub> Cl <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	-	0.56	-	0.56	-	1.75
51	5,10,15-trisbenzoyloxy-2,3,7,8,12,13,17,18-octaethylporphyrin	C <sub>57</sub> H <sub>58</sub> N <sub>4</sub> O <sub>6</sub>	0.07	0.56	-	0.56	0.04	1.19
52	2,3,5,6,7,8,9-Heptaphenyl-1,4-di(p-tolyl)fluorenone	C <sub>69</sub> H <sub>50</sub>	0.03	-	-	-	-	-
53	9-Hydroxy-2,3,5,6,7,8-hexaphenyl-1,4-di(p-tolyl)fluorenone	C <sub>69</sub> H <sub>50</sub> O	-	1.45	-	1.68	-	2.42
<b>Oksijenli</b>								
54	Furan	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O	0.07	-	0.03	-	-	-
55	1,3-Propanediol, 2-(hydroxymethyl)-2- methyl-	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	-	0.56	-	1.10	-	-
56	2-Ethoxy-3-nitroimid azo[1,2-a]pyridine	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> N <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	2.39
57	5-methoxycarbonylethylthio-1,2,3-thiadiazole4-carboxylic acid	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> S <sub>2</sub>	0.14	1.35	-	2.24	0.04	-
58	Tricyclo[5.2.1.0(2,6)]decyl-8-acetamide	C <sub>12</sub> H <sub>19</sub> N	0.07	0.56	-	1.12	-	-
59	6-Carbamoyl-2-(diethylamino)-5methyl-4Hthieno[2,3-d][1,3]oxazin-4-on	C <sub>12</sub> H <sub>15</sub> N <sub>3</sub> O <sub>3</sub> S	0.35	-	-	-	-	-
60	Ethyl6-O-acetyl-2,3,4-trideoxy-4-piperidino-à-d-erythro-hex-2-enopyranoside	C <sub>15</sub> H <sub>25</sub> NO <sub>4</sub>	0.29	-	-	-	-	-
61	(+)-E-(1R*,2S*)-1-[1,2,8,8-Tetramethyl-1,2,3,4,5,6,7,8-octahydronaphthalen-2-yl)ethanone oxime	C <sub>16</sub> H <sub>27</sub> NO	-	-	-	-	-	0.58
62	Gibberellic acid	C <sub>19</sub> H <sub>22</sub> O <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	0.60
<b>Alifatikler</b>								
63	Thiourea	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> S	0.35	2.05	0.28	2.81	0.04	2.36
64	Thiocyanic acid, methyl ester	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NS	-	-	0.03	-	-	-
65	Ethanethioamide	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NS	0.21	-	0.03	-	0.08	-
66	Propanedinitrile	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	0.14	-	0.03	-	0.08	-
67	1-Propene, 3-chloro-	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> Cl	0.42	2.05	0.19	2.80	0.27	4.76
68	Acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-	-	0.14	-	0.07	-
69	Ethanamine, 2-methoxy	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> NO	-	-	-	0.56	-	-
70	2-Butenedinitrile, (E)-	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	0.07	-	-	0.55	-	-
71	Mustard Gas	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> Cl <sub>2</sub> S	-	-	-	-	-	0.60
72	2-Butanone	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	0.14	1.85	0.06	2.20	0.11	-
73	1,1-Dichloroeth Yl-O,O-Dimethyl Phosphonate	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> P	-	5.65	-	7.51	-	1.18
74	Ethanol, 2-methoxy-, acetate	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.07	-
75	1-Iodoisopropyl Acetate	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> IO <sub>2</sub>	0.84	0.56	-	1.12	0.26	-
76	3,4-Hexanedione	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.07	-	-	-	-	-
77	3-Pentanol, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	0.92	-	0.21	-	-	-
78	5-Oxohexanenitrile	C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> NO	2.00	4.25	0.03	5.49	0.73	3.53
79	Propanedioic acid, methyl-, diethyl ester	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	-	0.55	-	1.09	-	-
80	Octodrine	C <sub>8</sub> H <sub>19</sub> N	-	-	-	-	-	1.78

**Tablo 4.** Devamı  
**Table 4.** Continuing

No	Birleşimin adı	Formülü	Katalizörsüz		Al		Fe	
			Hafif yağ	Ağır yağ	Hafif yağ	Ağır yağ	Hafif yağ	Ağır yağ
81	4-Heptanol, 2,6-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	0.07	-	-	-	0.07	0.59
82	4-Heptanol, 2,6-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	-	-	-	0.55	-	-
83	Ranitidine	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> N <sub>4</sub> O <sub>3</sub> S	-	-	-	-	-	0.59
84	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	-	-	0.03	-	-	-
85	Hexadeca-1,2,14,15-tetraen-4,13-dione	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	0.36	-	-	-	-	-
86	1-(2'-Tetrahydropyran-2-yl)-8-tridecene	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0.36	-	-	-	-	-
87	Nonadecanoic acid	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	0.21	-	-	-	-	-
88	N-Benzyl-N-phenyl-N',N'-dioctadecyl-1,2-p-henylenedioxydiacetamide	C <sub>59</sub> H <sub>94</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	-	2.25	-	2.77	-	-



**Şekil 4.** 325 °C'de hafif ve ağır biyo-yağlardaki bileşiklerin karakterizasyonu.

**Figure 4.** Characterization of compounds in light and heavy bio-oils at 325°C

Tablo 4'de 325°C-30 dakika denemelerinde elde edilen sıvı ürünlerin GC-MS analiz sonuçlarına göre sıvı ürünlerde toplamda 88 farklı kimyasal bileşik tespit edilmiştir. Bu bileşikler farklı özellik ve yapıdadır. Elde edilen bileşiklerin yapıları hakkında daha iyi bir değerlendirme için bu bileşikler Şekil 4'de monoaromatik, poliaromatik, oksijenli, alifatik ve diğerleri olarak sınıflandırılmıştır.

Şekil 4'de görüldüğü üzere 325 °C-30 dk denemesinde elde edilen hafif biyo-yağda katalizörler farklı grup bileşiklerin oluşumunu desteklemiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek oranda monoaromatik bileşik Fe katalizörlü varlığındaki denemelerde ve katalizörsüz denemelerde elde edilmiştir. Bu denemelerde en yüksek poliaromatik bileşik katalizörsüz denemelerde tespit edilmiştir. Oksijenli bileşik grubuna bakıldığında ise artan sıcaklıkla Fe katalizörlü varlığında oksijenli bileşik oluşumu gözlemlenmemiştir. Yine alifatik bileşik grupları incelendiğinde sırasıyla en etkili katalizörsüz, Fe ve Al katalizörleri etkili olmuştur.

Şekil 4'de 325 °C sıcaklık ve 30 dakika reaksiyon süreli deneme sonunda elde edilen ağır biyo-yağ içerisindeki bileşikler gruplandırılmıştır. Hafif biyo-yağ ve ağır biyo-yağ içerisinde farklı oranda farklı grup bileşiklerin olması beklenen bir durumdur. Şekil 4 incelendiğinde bu durum daha açık bir şekilde görülmektedir. Ağır biyoyağ içerisinde monoaromatik ve poliaromatik bileşik oluşumu en yüksek oranda Fe, Al ve katalizörsüz denemelerde elde edilmiştir. Oksijenli bileşiklerin oluşumu artan sıcaklığın etkisi ile baskılandığı gözlemlenmiştir. Alifatik bileşikler incelendiğinde Al katalizörlü denemede en yüksek oranda ardından katalizörsüz ve Fe katalizörlü denemelerde elde edilmiştir.

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Results

Bu çalışmada, spesifik bir biyokütle (*G. Glabra L.*), kritik altı koşullarda, 300 ile 350 °C arasındaki sıcaklıklarda yüksek basınçlı reaktörde parçalanarak sıvı ve gazlı ürünlere dönüştürülmüştür. Sonuçlara göre en yüksek dönüşüm oranı %95.05 ile 325 °C'de ve en yüksek sıvı ürün verimi %36.52 ile Fe katalizörlü varlığında elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan, sıcaklığın hem dönüşümler hem de sıvı verimleri üzerinde

olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda *G. Glabra L.* sıvılaştırılması için optimum sıcaklık 325 °C olarak bulunmuştur.

Hidrotermal sıvılaştırılması sonucunda ortaya çıkan sıvı ürünlerin elementel analiz sonuçları incelendiğinde hidrotermal sıvılaştırma denemeleri sonunda elde edilen sıvı ürünlerin O/C oranları, hammaddenin O/C oranından daha düşüktür. Bu sonuç, hidrotermal sıvılaştırma işlemi sonunda ciddi miktarda oksijen ortamdan uzaklaştırıldığını göstermektedir. Katalizörsüz ve katalizörlü denemeler neticesinde elde edilen sıvı ürünlerin üst ısıl değerleri hammaddenin üst ısıl değerinden yüksek bulunmuştur.

Metal katalizörlerin düşük oksijen içeriğine sahip sıvı ürünler elde etmede etkili olduğu daha önceki bölümlerde ifade edilmişti. (Durak, 2020) tarafından da biyokütle olarak kullanılan *Glycyrrhiza glabra L.* bitkisi homojen katalizör varlığında sıvılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, (Durak, 2020) çalışması ile kıyaslandığında bu çalışmada elde edilen ısıl değerler daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda *Glycyrrhiza glabra L.* bitkisinin metal katalizör varlığında hidrotermal sıvılaştırma yöntemi ile sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır.

### **Yazar katkısı**

#### *Author contribution*

Salih GENEL: literatür taraması, metodoloji, deneysel çalışmalar, ilgili tabloların/şekillerin hazırlanması ve yorumlanması, bulgular ve sonuç kısmının şekillendirilmesi, makalenin düzenlenmesi ve revizyon süreçlerinin yürütülmesi.

### **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*

- Briens, C., Piskorz, J., & Berruti, F. (2008). Biomass Valorization for Fuel and Chemicals Production -- A Review: *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 6(1). <https://doi.org/doi:10.2202/1542-6580.1674>
- Brunner, G. (2014). *Hydrothermal and supercritical water processes*. Elsevier.
- Cheng, F., Tompsett, G. A., Murphy, C. M., Maag, A. R., Caraballo, N., Bailey, M., Hemingway, J. J., Romo, C. I., Paulsen, A. D., Yelvington, P. E., & Timko, M. T. (2020). Synergistic Effects of Inexpensive Mixed Metal Oxides for Catalytic Hydrothermal Liquefaction of Food Wastes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(17), 6877–6886. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c02059>
- Çolak, U., Durak, H., & Genel, S. (2018). Hydrothermal liquefaction of Syrian mesquite (*Prosopis farcta*): Effects of operating parameters on product yields and characterization by different analysis methods. *The Journal of Supercritical Fluids*, 140, 53–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.05.027>
- Durak, H. (2014). Bio-oil production from *Glycyrrhiza glabra* through supercritical fluid extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*, 95, 373–386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.08.009>
- Durak, H. (2018). *Trametes versicolor (L.) mushrooms liquefaction in supercritical solvents: Effects of operating conditions on product yields and chromatographic characterization*. *The Journal of Supercritical Fluids*, 131, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.09.013>



- Durak, H. (2019). Characterization of products obtained from hydrothermal liquefaction of biomass (*Anchusa azurea*) compared to other thermochemical conversion methods. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(2), 459–470. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00379-4>
- Durak, H. (2020). Hydrothermal liquefaction of *Glycyrrhiza glabra* L. (Liquorice): Effects of catalyst on variety compounds and chromatographic characterization. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(20), 2471–2484. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607947>
- Durak, H., & Aysu, T. (2016). Thermochemical liquefaction of algae for bio-oil production in supercritical acetone/ethanol/isopropanol. *The Journal of Supercritical Fluids*, 111, 179–198. <https://doi.org/10.1016/J.SUPFLU.2015.11.021>
- Durak, H., & Genel, S. (2020). Catalytic hydrothermal liquefaction of *Lactuca scariola* with a heterogeneous catalyst: The investigation of temperature, reaction time and synergistic effect of catalysts. *Bioresource Technology*, 309, 123375. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123375>
- Durak, H., & Genel, Y. (2018). Hydrothermal conversion of biomass (*Xanthium strumarium*) to energetic materials and comparison with other thermochemical methods. *The Journal of Supercritical Fluids*, 140, 290–301. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.07.005>
- Durak, H., Genel, S., Durak, E. D., Özçimen, D., & Koçer, A. T. (2022). Hydrothermal liquefaction process of *Ammi visnaga* and a new approach for recycling of the waste process water: cultivation of algae and fungi. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03221-6>
- Genel, S., Durak, H., Durak, E. D., Güneş, H., & Genel, Y. (2023). Hydrothermal liquefaction of biomass with molybdenum, aluminum, cobalt metal powder catalysts and evaluation of wastewater by fungus cultivation. *Renewable Energy*, 203, 20–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.030>
- Gollakota, A. R. K., Kishore, N., & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378–1392. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.178>
- He, W., Li, G., Kong, L., Wang, H., Huang, J., & Xu, J. (2008). Application of hydrothermal reaction in resource recovery of organic wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 691–699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.11.003>
- Huntley, M. E., & Redalje, D. G. (2007). CO<sub>2</sub> Mitigation and Renewable Oil from Photosynthetic Microbes: A New Appraisal. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(4), 573–608. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-7304-1>
- Klass, D. L. (1998). Chapter 2 - Biomass as an Energy Resource: Concept and Markets. In D. L. Klass (Ed.), *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals* (pp. 29–50). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012410950-6/50004-0>
- KOÇER, N., & Ayhan, Ü. (2007). Doğu anadolu bölgesinin biyokütle potansiyeli ve enerji üretimi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 175–181.
- Kumar, M., Olajire Oyedun, A., & Kumar, A. (2018). A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1742–1770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.270>
- Li, N., Wei, L., bibi, R., Chen, L., Liu, J., Zhang, L., Zheng, Y., & Zhou, J. (2016). Catalytic hydrogenation of alkali lignin into bio-oil using flower-like hierarchical MoS<sub>2</sub>-based composite catalysts. *Fuel*, 185, 532–540. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.08.001>
- Long, H., Li, X., Wang, H., & Jia, J. (2013). Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 344–352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.035>
- Peterson, A. A., Vogel, F., Lachance, R. P., Fröling, M., Antal Jr, M. J., & Tester, J. W. (2008). Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of sub-and supercritical water technologies. *Energy & Environmental Science*, 1(1), 32–65. <https://doi.org/10.1039/B810100K>
- Tekin, K., Karagöz, S., & Bektaş, S. (2012). Hydrothermal liquefaction of beech wood using a natural calcium borate mineral. *The Journal of Supercritical Fluids*, 72, 134–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.08.016>



- Toor, S. S., Rosendahl, L., & Rudolf, A. (2011). Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. *Energy*, 36(5), 2328–2342. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.03.013>
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.05.004>
- Wise, L. E., & Jahn, E. C. (1952). *Wood Chemistry* (Issue 1. c.). Books on Demand. <https://books.google.com.tr/books?id=bErVAAAAMAAJ>
- Zhao, B., Li, H., Wang, H., Hu, Y., Gao, J., Zhao, G., Ray, M. B., & Xu, C. C. (2021). Synergistic effects of metallic Fe and other homogeneous/heterogeneous catalysts in hydrothermal liquefaction of woody biomass. *Renewable Energy*, 176, 543–554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.115>

## Bazalt fiber kullanımının düşük plastisiteli kilin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi

*The effect of basalt fiber use on the unconfined compressive strength of low plasticity clay*

Zülfü GÜROCAK<sup>1</sup> , Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU<sup>\*1</sup> 

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 14.4.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 13.06.2023

### Öz

Düşük dayanıma sahip killerin dayanımlarını artırmak amacıyla yapılan ve stabilizasyon olarak adlandırılan güçlendirme işlemlerinde farklı katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemelerden en yaygın olarak kullanılanları ise fiberlerdir. Son yıllarda, maliyetlerinin düşük, dayanımlarının yüksek ve kolay ulaşılabilir olmalarından dolayı zeminlerin güçlendirilmesinde fiberlerin kullanılması, geleneksel kimyasal stabilizasyon yöntemlerine bir alternatif olarak araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Farklı türleri olan fiberlerden bazalt fiberlerin kullanımı ekonomik ve çevreci olmaları nedeniyle artmaktadır. Bu çalışmanın amacı, bazalt fiberin kaolin kilinin dayanımı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Farklı oranlarda (kuru ağırlıkça %0, 1, 2 ve 3) bazalt fiberin farklı su içeriklerindeki (%20, 25, 30 ve 35) zemine eklenmesiyle zeminin dayanımında meydana gelen değişimleri incelemek için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonrasında kile %25 oranında su ve %1 oranında bazalt fiber eklenmesi sonucu serbest basınç dayanımının maksimum olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre başarılı bir güçlendirmede fiber oranı ile birlikte su oranı da büyük bir etkiye sahiptir.

**Anahtar kelimeler:** Bazalt fiber, Dayanım, Güçlendirme, Kaolin kili

### Abstract

Different additives are used in reinforcement processes, called stabilization, which are made to increase the strength of low strength clays. Fibers are the most widely used of these materials. In recent years, the use of fibers in the reinforcement of soils has attracted the attention of researchers as an alternative to traditional chemical stabilization methods, due to their low cost, high strength and easy accessibility. The use of basalt fibers, which are different types of fibers, is increasing due to their economic and environmental friendliness. The aim of this study is to investigate the effect of basalt fiber on the strength of kaolin clay. In order to examine the changes in the strength of the soil by adding basalt fiber in different proportions (0, 1, 2 and 3 % by dry weight) to the soil with different water contents (20, 25, 30 and 35%), unconfined compressive tests were carried out. After the experimental studies, it was determined that the unconfined compressive strength was maximum as a result of the addition of 25% water and 1% basalt fiber to the clay. According to the results of the study, the fiber ratio and the water ratio have a great effect on a successful reinforcement.

**Keywords:** Basalt fiber, Strength, Reinforcement, Kaolin clay

\*Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU; yaslan@firat.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Günümüzde hızlı teknolojik ilerleme ve gereksinimlerin değişimine bağlı olarak yeni mühendislik malzemeleri de farklı kullanım alanlarında hızlı bir şekilde yerini almaktadır. Bu gereksinimin nedeni ise günümüz modern teknolojilerinin geleneksel metal, seramik ve polimer malzemeler tarafından karşılanamayan, farklı özelliklere sahip olan malzeme ihtiyacıdır. Bu ihtiyaç, kullanımda olan klasik ürünlere göre daha üstün mühendislik özelliklere ve yüksek performansa sahip yeni teknolojik ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Fiberler, [Ekinciöglü \(2003\)](#) tarafından doğal olarak bulunabilen ya da insanlar tarafından üretilen, bir boyutu diğer boyutundan çok büyük olan, aynı malzemenin daha büyük şekline göre daha yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Son dönemlerde birçok farklı alanda kullanım yerine sahip olan fiberlerin doğal ve yapay olmak üzere iki türü bulunmaktadır. Doğada hazır halde bulunan doğal fiberler, bitkisel, hayvansal ve madensel olmak üzere üç türdür. Doğal fiber gruplarına göre maliyetleri yüksek olsa da, dayanımlarının yüksek, hafif, esnek olmaları ve çevresel etkilere karşı dirençli olmaları nedeniyle günümüzde en yaygın kullanıma sahip olan fiber grubu ise yapay fiberlerdir ve katkı maddeleri eklenerek insanoğlu tarafından üretilirler ([Aral, 2006](#)). Bu gruba dahil olan en önemli fiberler cam fiberler, polimer fiberler ve günümüzde kullanım alanı yaygınlaşan bazalt fiberlerdir.

Artan çevresel kaygılar ve maliyetler, daha çevreci, ekonomik, hammadde ulaşılabilirliği kolay ve üstün özelliklere sahip yeni ürünlerin elde edilmesini gerekli kılmıştır. Bu ürünlerden birisi olan fiberler, geçmişten günümüze değin hem türleri, hem de kullanım alanları değişen, gelişen ve kullanım alanları genişleyerek devam eden ürünlerdir. Çok geniş bir kullanım alanına sahip olan fiberlerin jeoteknik uygulamalardaki kullanımını ise insanlık tarihi kadar eskidir. Geçmiş dönemlerde doğadan alınan bitkisel ve hayvansal lifler kerpiç veya tuğla gibi yapı malzemelerinin dayanımını artırmak için kullanılmıştır. Daha sonra gelişen teknoloji ile doğal liflerin yerine cam, karbon, sentetik polimer fiber türleri veya plastik atıklar tercih edilmeye başlanmış, bu tür fiberlerin zeminlerin güçlendirilmesinde kullanımı konusunda yapılan çalışmalar da ([Consoli vd., 2002](#); [Yetimoglu & Salbaş, 2003](#); [Tang vd., 2007](#); [Abdi vd., 2008](#); [Ahmad vd., 2010](#); [Diambra vd., 2010](#); [Zaimoglu, 2010](#); [Estabragh vd., 2011](#); [Kinjal vd., 2012](#); [Pradhan vd., 2012](#); [Edinçliler & Çağatay, 2013](#); [Botero vd., 2015](#); [Roustaei vd., 2015](#); [Behbahani vd., 2016](#); [Eskişar vd., 2016](#); [Orakoglu & Liu, 2017](#); [Amini & Noorzad, 2018](#); [Cui vd., 2018](#); [Al-Bared vd., 2019](#); [Lee vd., 2019](#); [Fındıkçı, 2020](#); [Bao vd., 2021](#); [Valipour vd., 2021](#); [Wang vd., 2021](#)) hız kazanmıştır.

Malzeme mühendisleri tarafından kullanıma sunulan fiber türlerinden birisi de bazalt kayasından üretilen bazalt fiberlerdir. Bazalt, insanlık tarihi boyunca kullanılmış olan ve kullanılmaya devam eden önemli bir doğal yapı malzemesidir. Bazalt türü kaya günümüzde özellikle inşaat sektöründe birçok alanda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Özellikle volkanik alanlarda oldukça yaygın bir şekilde yüzeyleme veren ve kolay erişimi ile birlikte dayanımlı olması nedeniyle tercih edilen bazalt, günümüzde teknolojik gelişmelere bağlı olarak kullanıma sunulan ve kullanımı gün geçtikçe artan bazalt fiberin de hammaddesidir. Ucuz olması, bol miktarda bulunması, çekme dayanımının ve kimyasal direncinin yüksek olması, mantar ve mikroorganizma etkisine karşı dirençli ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması, hammaddesi olan bazalt kayasının çok geniş alanlarda yüzeyleme veriyor olması ve üretiminde herhangi bir katkı maddesine gereksinim duyulmaması gibi özellikleri nedeniyle bazalt fibere olan ilgi giderek artmaktadır.

Bazalt fiber konusunda yapılan çalışmalara bakıldığında, bu çalışmaların birçoğunun bazalt fiber ile zemin güçlendirme ve optimum bazalt fiber boyu-katkı oranı konusunda olduğunu görmek mümkündür. Nitekim [Gao vd., \(2015\)](#), kilde zemin dayanımının en yüksek olduğu bazalt fiber oranının %0.25 ve fiber boyunun ise 12 mm olduğunu, [Ndepete & Sert \(2016\)](#), siltli zeminde 24 mm uzunluğunda ve %1.5 oranında fiber katkısıyla dayanımda en yüksek değerlerin tespit edildiğini, [Özdemir vd., \(2016\)](#), kaolin kilinde %1 bazalt fiber ve %9 kireç katkısının kullanıldığı örnekte 28 günlük kür uygulamasından sonra katkısız örneğe göre dayanımın 5.5 kat arttığını ifade etmektedirler. [Yixian vd., \(2016\)](#), şişen zeminin %6 kireç içeriği ve %0.3 fiber içeriği ile katkısız zemine göre 5.7 kat daha fazla dayanım gösterdiğini, [Gisymol & Ramya \(2017\)](#) ise organik zeminde, zemin dayanımındaki en büyük artış oranının 10 mm boyundaki fiberin %0.05 oranında katılmasıyla ve 28 günlük kürden sonra meydana geldiğini belirlemişlerdir. [Boz vd. \(2018\)](#), zeminde en büyük dayanım artışının 90 günlük kürden sonra %9 kireç içerikli 19 mm uzunluğunda %0.75 bazalt fiber kullanılarak elde edildiğini, [Kenan & Özocak \(2018\)](#) ise siltli bir zeminde %1.5 fiber katkısının en uygun oran olduğunu belirtmektedir. [Ma vd., \(2018\)](#), zeminde %10 uçucu kül, %8 kum ve % 0.4 bazalt fiber içerikli seçilmiş karışımlarda maksimum serbest basınç dayanımı ve optimum dayanım büyüme hızının elde edildiğini ifade ederken, [Pandit](#)

vd., (2018), bazalt fiberin %4 oranında kullanılmasıyla maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin arttığını, optimum su içeriği değerinin ise azaldığını belirtmektedir. Cao vd., (2019) zeminin serbest basınç dayanımı değerinin çimento-uçucu kül katkısıyla %0.6 oranında bazalt fiber ilavesiyle en yüksek değere ulaştığını belirlemiştir. Ocakbaşı (2019) ise %2 oranında ve 24 mm boyunda bazalt fiber katkısıyla hazırlanan örneklerde en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiğini ifade etmektedir. Sungur vd., (2021), killi bir zeminde bazalt fiber boyunun 15 mm'ye kadar artmasıyla kayma dayanımının arttığını, ancak daha büyük fiber uzunluklarında kayma dayanımının azaldığını belirtmektedir.

Fiber kullanımının çok eski olmasına karşın, yapay fiber kullanımı oldukça yenidir ve özellikle betonda katkı malzemesi olarak kullanılarak betonun bazı özellikleri iyileştirilmektedir. Ancak zemin stabilizasyonunda fiber kullanımı daha güncel bir uygulama olup, bu konudaki çalışmalar da gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmanın amacı düşük plastisiteli kaolin kiline uzunluğu 24 mm olan bazalt fiberin farklı oranlarda eklenmesiyle zeminin dayanımında meydana gelen değişimleri ve maksimum dayanımı sağlayan optimum fiber oranı ve su miktarını belirlemektir. Böylelikle zemin güçlendirmede bazalt fiberin kullanımı ve önemi vurgulanarak veri tabanının gelişmesine katkı sağlanacaktır.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

#### 2.1. Kaolin kili

##### 2.1. Kaolin clay

Kaolin; başta granit ve diğer magmatik/volkanik kayaların yerinde bozunmaları sonucu oluşan ve ana minerali kaolinit olan bir kil grubudur. M.Ö. 3000 yıllarında Kau-Ling" isimli bir Çinli tarafından ilk defa Çin'in Jiangxi bölgesinde bulunmuş ve adı kayaç ismi olarak verilmiştir. Çoğunlukla literatürde, kaolin ve kil aynı anlamı verecek şekilde kullanılmaktadır. Kaolin, tane boyutu çok küçük ( $2\mu\text{m}$ ), yumuşak, beyaz renkli ve plastik bir kil türüdür. Kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral kaolinit ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) olup; alüminyum hidrosilikat bileşimli bir kil mineralidir Kaolinin sertliği 1.5-2 aralığında değişim göstermekte ve yoğunluğu  $2.62 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kalsine edilmiş kaolinin sertliği 6-8 arasında, kırılma indisi 1.62 ve yoğunluğu ise  $2.63 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kaolinitin ideal kimyasal bileşimini % 46.5  $\text{SiO}_2$ , % 39.5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve % 14.0  $\text{H}_2\text{O}$  oluşturmaktadır. Kaolin  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de higroskopik suyunu kaybetmekte,  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ise mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ) ve silise ( $\text{SiO}_2$ ) dönüşmektedir (MTA, 2023).

Deneysel çalışmalarda, Balıkesir-Sındırgı (Türkiye) kil ocağında üretilen katkısız kaolin kili kullanılmıştır (Şekil 1). Çalışmada kullanılan kile ait kimyasal analiz sonuçları kilin alındığı firmadan temin edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur.



**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan kaolin kili  
**Figure 1.** The kaolin clay used in the study

**Tablo 1.** Kaolin kilinin kimyasal özellikleri  
**Table 1.** Chemical properties of kaolin clay

Anaoksit	%
SiO <sub>2</sub>	69.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12-17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50
CaO	0.10
Na <sub>2</sub> O	0.20
K <sub>2</sub> O	≤13.17
TiO <sub>2</sub>	Eser
SO <sub>3</sub>	≤7.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01
BaO	Eser

## 2.2. Bazalt fiber

### 2.2. Basalt fiber

Bazalttan fiber elde etme fikrini ilk defa ortaya atan ve 1923'te ABD patentini alan kişi Fransız Paul Dhé'dir (Saravanan, 2006). İlk bazalt fiber fabrikası ise 1985 yılında Kiev yakınlarında üretime başlamıştır (Jamshaida & Mishraa, 2015). Bazalt fiber, koyu renkli, ince taneli, volkanik bir kayaç olan ve bazalt adı verilen doğal malzemeden elde edilmektedir. Dünya çapında yaygın bir şekilde bulunan sert ve yoğun bir kaya olan bazalt magmatik kökenlidir ve termo-plastik malzemeler gibi ısıtıldığında ergimektedir (Jamshaida & Mishraa, 2015).

Bazalt fiber, üretim mantığı birbirine benzer olan Junkers, santrifüj-çoklu rulo (Centrifugal-multiroll) ve eğirme (spinner) yöntemleri ile üretilmektedir. Junkers yönteminde kırıcıdan geçirilen bazalt kayacı yıkanır ve eritme potalarında yüksek sıcaklıkta ergitilir. 1450 °C'lik sıcaklığa ulaşan bazalt kaya eriyiği üç santrifüj başlıklı, bir hızlandırıcı ve iki fibrilize (fibrillizing) edici silindirden oluşan yatay şaftlı fiber eğirme makinesine iletilir. Burada kafalara yapışan eriyik, merkezkaç kuvveti nedeniyle uçar ve üfleme sonucunda viskoz sıvıdan uzunluğu 60-100 mm ve çapı 6-10 µm olan lifler oluşmaktadır (Czigany, 2007). Diğer bir yöntem olan Santrifüj-çoklu rulo (Centrifugal-multiroll) yönteminde ise Junkers yöntemine benzer şekilde eritilen bazalt kayacı dönen çarkların üzerine dökülür. Dönme hareketi nedeniyle yana doğru fırlatılarak bir sonraki çarkın yüzeyine dikey olarak akar. Stratejik olarak yerleştirilmiş diğer çarklar, tipik olarak yaklaşık 10 mikron çapında lifler üretilir (Basaltex, 2015).

Çalışmada kullanılan bazalt fiber, Spinteks Tekstil İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş'den temin edilmiş olup, 24 mm uzunluğundadır.

## 2.3. Deneysel çalışmalar

### 2.3. Experimental studies

Bu çalışma kapsamındaki laboratuvar çalışmalarında, örneklerin hazırlanmasından sonra, likit limit (LL), plastik limit (PL), standart proktor ve serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır.

### 2.3.1. Örnek hazırlama

#### 2.3.1. Sample preparation

Bu tür çalışmalarda deney sonuçlarının sağlıklı olabilmesi, kil ile fiberin homojen bir karışım oluşturacak şekilde karıştırılarak örneklerin hazırlanmasına bağlıdır. Zemin-fiber karışımının homojen bir şekilde oluşturulabilmesi için en önemli parametrelerden bir tanesi de karıştırma yöntemidir. Mikser, mekanik, tamburlu karıştırıcı ve el ile karıştırma yöntemleri literatürde kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışmada mikser yöntemi tercih edilmiştir. Örnek hazırlama safhasında kaolin kili ilk olarak 24 saat 105 °C'de etüvde kurutulduktan sonra önceden belirlenmiş miktarda kil, kuru halde iken kompresörle ayrıştırılmış olan bazalt fiber (Şekil 2) katkısıyla mikser kullanılarak karıştırılmıştır (Şekil 3).



**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan ayrıştırılmamış (a) ve ayrıştırılmış (b) bazalt fiberler  
**Figure 2.** Unseparated (a) and separated (b) basalt fibers used in the study



**Şekil 3.** Kil ve bazalt fiber karışımlarının hazırlanması  
**Figure 3.** Preparation of clay and basalt fiber mixtures

Zemin ve bazalt fiberin tam ve homojen olarak karışmasını sağlamak için karıştırma işleminin süresi 10 dakika olarak seçilmiştir. Katkılı örnekler kuru örnek ağırlığının %20, 25, 30 ve 35'i olacak şekilde farklı su oranlarında ve %1, 2 ve 3 oranlarında bazalt fiber katkı oranlarına göre hazırlanmıştır. Bu tip çalışmalarda fiberin zemine karıştırılmasından sonra bu karışıma belirlenmiş olan oranda su eklenmektedir (Gao vd., 2015; Soğancı, 2015; Motiram vd., 2018; Tran vd., 2018; Liu vd., 2020). Bu çalışmada da kuru haldeki kile önceden belirlenen oranda bazalt fiber eklenerek karıştırılmış, mikserin karıştırma haznesine konulan bazalt fiber katkı örneğe distile su eşit olarak püskürtülmüş ve mikser ile karıştırılmıştır. Zaman zaman el ile de karıştırma yapılarak fiberlerin zemin içerisinde homojen dağılması ve fiber topraklanmasının mümkün oldukça minimum seviyede tutulmasına özen gösterilmiştir. Hazırlanan karışımlara ait su ve bazalt fiber oranları Tablo 2’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan katkısız kaolin kili “K” ve bazalt fiber ise “BF” olarak gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Deneysel çalışmalarda kullanılan karışımlara ait su ve bazalt fiber oranları  
**Table 2.** Water and basalt fiber ratios of the mixtures used in experimental studies

Su oranı (%)	Örnek
20	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF
25	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF
30	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF
35	K
	K + %1 BF
	K + %2 BF
	K + %3 BF

K: Katkısız Kil, BF: Bazalt Fiber

### 2.3.2. Likit ve plastik limit deneyleri

#### 2.3.2. Liquid and plastic limit tests

Laboratuvar çalışmalarının bu aşamasında, hazırlanmış olan katkısız kaolin kilinin LL ve PL değerlerini belirlemek için [ASTM D4318-17e1 \(2017\)](#) standardına göre 10 adet deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Yapılan deneylerden elde edilen değerler kullanılarak katkısız kaolin kilinin plastisite indisi (PI) hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre katkısız kilin ortalama LL değeri %45, PL değeri %24 ve PI değeri ise %21 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan kil Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (UCSC) göre düşük plastisiteli (CL) kil sınıfındadır (Tablo 3).



**Şekil 4.** Likit (a) ve plastik (b) limit deneyleri

**Figure 4.** Liquid (a) and plastic (b) limit tests

**Tablo 3.** Kaolin kilinin likit ve plastik limit deney sonuçları

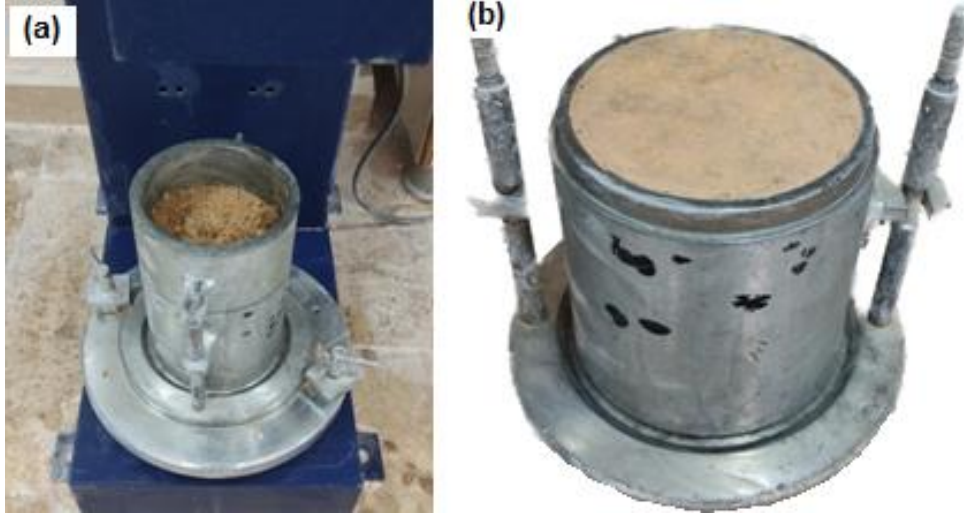
**Table 3.** The test results of liquid and plastic limit of kaolin clay

Özellik	Likit limit (%)	Plastik limit (%)	Plastisite indisi (%)	Zemin sınıfı (USCS)
Kaolin kili	45	24	21	CL

### 2.3.3. Kompaksiyon deneyleri

#### 2.3.3. Compaction tests

DeneySEL çalışmaların bu aşamasında kile %20, 25, 30 ve 35 oranlarında su ve her bir su oranı için ayrı ayrı kuru ağırlıkça %0, 1, 2 ve 3 bazalt fiber eklenerek hazırlanmış 16 adet bazalt fiber katkılı örnekte [ASTM D698-12e2 \(2012\)](#) standardına göre toplam 32 adet standard proktor deneyi yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Standard proktor deneyinin yapılışı (a), deney sonucu sıkıştırılmış örnek (b)

Figure 5. Performing the standard proctor test (a), compressed sample as a result of the test (b)

Bu deney, 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp içerisine sıkıştırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Her bir su ve bazalt fiber oranı için yapılan proktor deneylerinden elde edilen sıkıştırılmış örneklerden serbest basınç deneyi için silindirik örnekler alınmıştır.

### 2.3.4. Serbest basınç deneyleri

#### 2.3.4. Unconfined compressive tests

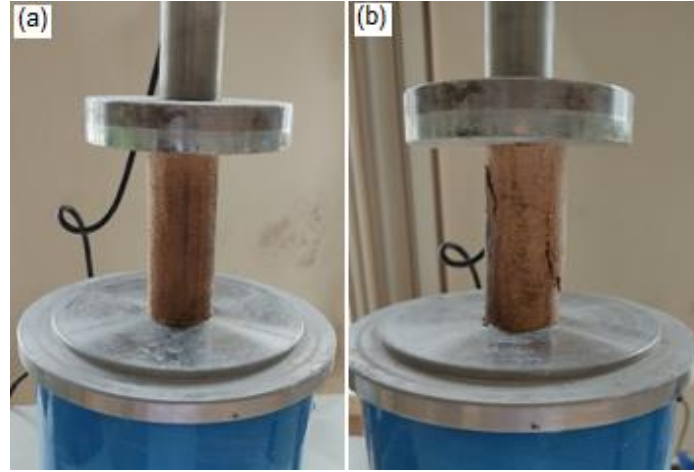
Farklı su içeriğine sahip katkısız kil ile yine farklı su ve bazalt fiber oranlarında hazırlanan katkılı karışımlar proktor deneyi ile sıkıştırılmıştır. Bu örneklerden, serbest basınç deneylerinde kullanılmak üzere 76 mm boyunda, 38 mm çapında toplam 64 adet silindirik örnek alınmıştır. Bu örneklerde [ASTM D2166M-16 \(2016\)](#) standardına göre serbest basınç deneyleri yapılmış ve örneklerin serbest basınç dayanımları ( $q_u$ ) belirlenmiştir (Şekil 6 ve 7).



Şekil 6. Serbest basınç deneyi için hazırlanmış bazalt fiber katkılı silindirik örnekler

Figure 6. Reinforced with basalt fiber cylindrical samples prepared for unconfined compressive test





**Şekil 7.** Serbest basınç deneyi öncesi örnek (a) ve deney sonrası yenilmiş örnek (b)  
**Figure 7.** Sample before unconfined compressive test (a) and after test (b)

Serbest basınç deneyleri sonuçlarına göre farklı su içeriklerinde katkısız kilin dayanım değerinin 47.09-294.08 kPa arasında, bazalt fiber katkılı örneklerde ise 47.95-807.4 kPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Tablo 4).

**Tablo 4.** Güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş örneklerin ortalama  $q_u$  değerleri  
**Table 4.** Average  $q_u$  values of unreinforced and reinforced samples

Su oranı (%)	Örnek	$q_u$ (kPa)
20	K	102.4
	K + %1 BF	523.83
	<b>K + %2 BF</b>	<b>685.31</b>
	K + %3 BF	445.06
25	K	294.08
	<b>K + %1 BF</b>	<b>807.4</b>
	K + %2 BF	720.76
	K + %3 BF	705.00
30	K	96.07
	K + %1 BF	580.53
	<b>K + %2 BF</b>	<b>630.23</b>
	K + %3 BF	557.22
35	K	47.09
	K + %1 BF	51.89
	<b>K + %2 BF</b>	<b>64.85</b>
	K + %3 BF	47.95

K: Katkısız Kil, BF: Bazalt Fiber

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

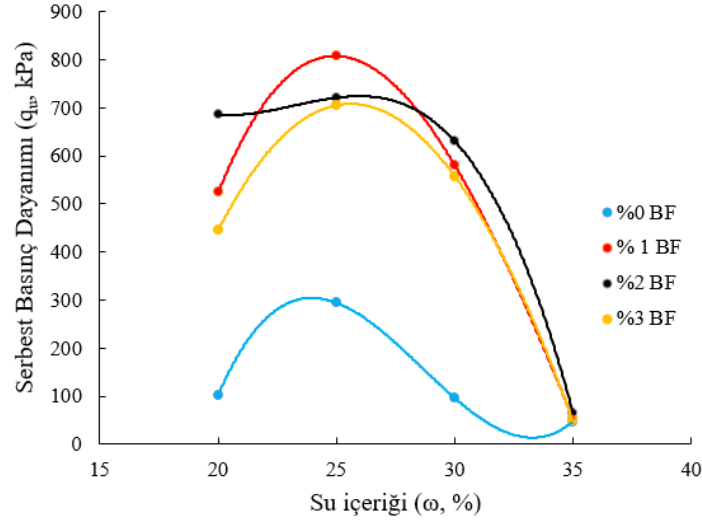
Bazalt fiber katkısı ile güçlendirilen killi zeminlerde dayanımdaki değişimler ile ilgili olarak yapılmış birçok çalışma mevcuttur (Gao vd., 2015; Özdemir vd., 2016; Boz vd., 2018; Cao vd., 2019; Ocakbaşı, 2019). Bu çalışmalara ait sonuçlar, killi zeminlerin serbest basınç dayanımındaki artışta su ve fiber oranı ile fiber boyunun etkili olduğunu göstermektedir. Farklı mühendislik özelliklerine sahip killerde maksimum dayanım artışının ortaya çıktığı su, fiber oranı ve boyunun da değiştiği görülmektedir.

Bu çalışmada düşük plastisiteye sahip kaolin kilinin optimum su ve bazalt fiber oranı gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 4'te, örneklerin  $q_u$  değerlerindeki değişimlere ait grafik ise Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 4'e göre, %20, 25, 30 ve 35 su oranına sahip katkısız kilin  $q_u$  değerleri sırasıyla 102.4, 294.08, 96.07 ve 47.09 kPa olarak belirlenmiştir. Katkısız kilde en yüksek  $q_u$  değeri %25 su oranına sahip örnekte ortaya

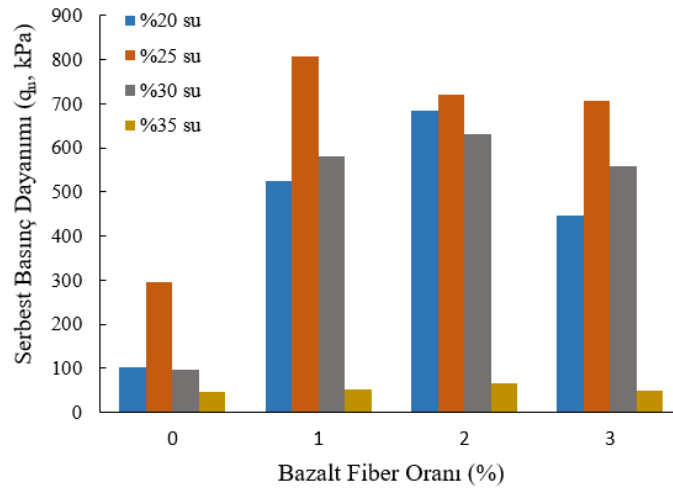
çıkıştır. %1 BF ile güçlendirilmiş örneklerin su oranındaki artışa bağlı olarak belirlenen  $q_u$  değerleri ise sırasıyla 523.83, 807.4, 580.53 ve 51.89 kPa'dır (Tablo 4). En yüksek  $q_u$  değeri %25 su oranına sahip olan örnekte tespit edilmiştir. %2 BF katkılı örneklerin  $q_u$  değerleri ise sırasıyla 685.31, 720.76, 630.23 ve 64.85 kPa'dır ve en yüksek  $q_u$  değeri %25 su oranına sahip örnekte belirlenmiştir. Bazalt fiber katkı oranının %3 olduğu örneklerde ise en yüksek  $q_u$  değeri su oranının %25 olduğu örnekte 705.00 kPa olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlar kaolin kiline eklenen bazalt fiberin tüm su oranlarında  $q_u$  değerlerinde artışa neden olduğunu göstermektedir. Bu artışların belirlenmesinde katkısız kilin  $q_u$  değerleri referans olarak alınmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, örneklerdeki su oranı arttıkça hem katkısız kilde hem de bazalt fiberin farklı oranlarda eklenmesiyle hazırlanmış bütün örneklerde  $q_u$  değerlerinin artışı %25 su oranına kadar devam etmiş, su oranının artmasıyla  $q_u$  değerleri azalmaya başlamıştır. Su oranının %35 olması durumunda ise hemen hemen bütün bazalt fiber katkılı örneklerin  $q_u$  değerleri katkısız kilin  $q_u$  değerine yaklaşmıştır (Şekil 8).



**Şekil 8.** Örneklerde  $q_u$  değerlerinin bazalt fiber ve su oranına bağlı olarak değişimi  
**Figure 8.** Change of  $q_u$  values in samples depending on basalt fiber and water ratio

Kile eklenen bazalt fiber oranı arttıkça tüm su oranlarında belli bir değere kadar  $q_u$  değerleri artış göstermiş, daha sonra ise azalmıştır. Şekil 9'da verilen grafik, %25 su oranında ve %1 BF katkılı örnekte  $q_u$  değerinin 807.4 kPa ile maksimuma ulaştığını göstermektedir.



**Şekil 9.** Farklı su oranlarında  $q_u$ -bazalt fiber oranı değişim grafiği  
**Figure 9.**  $q_u$ -basalt fiber ratio change graph at different water ratios

Tang vd., (2007) killi bir zemine fiber eklenmesi ile fiber ve zemin parçacıklarının birbirleriyle etkileşime girdiğini ve birbirlerini sınırladığını belirtmektedir. Araştırmacıya göre zemindeki tek bir küçük fiber, zemin parçacıkları tarafından sarılmakta, zemin ve fiber parçacıkları birbiriyle temas ederek ara yüz kuvveti oluşturmaktadır. Bazalt fiber içeriği çok az olduğunda, fiber aralığı geniş olmakta, fiber-zemin kolonları arasındaki kesişim zorlaşmakta ve etkili bir fiber-zemin ağı oluşmamaktadır. Zemin dış kuvvete maruz kaldığında ise gerilme esas olarak saçılmış fiber-zemin kolonları ve zemin parçacıklarının kendi aralarındaki kuvvetler tarafından aktarılmakta ve taşınmaktadır. Fiber içeriği kademeli olarak arttığında, fiber aralığı azalmakta, bu da bitişik fiber-zemin kolonlarının etkili bir fiber-zemin ağı oluşturmak için kolayca kesişmesini sağlamaktadır. Böylece zemin dış kuvvete maruz kaldığında, kuvvet esas olarak fiber-zemin ağı ve zemin parçacıkları arasındaki kuvvetler tarafından taşınmaktadır. Gao vd., (2015) ise zemin içerisindeki fiber oranının fazla olması durumunda, fiberler arasında elektrostatik etkileşimin meydana geldiğini, fiberlerin kümeler halinde toplanarak zemin içerisinde eşit bir dağılımın olmadığını, bunun sonucu olarak da dayanımda azalmaların oluştuğunu belirtmektedir. Ayrıca su oranının artması sonucunda fiber ile zemin arasında meydana gelen etkileşim ve oluşan ara yüz kuvvetleri azalmakta ve sonuç olarak  $q_u$  değerleri azalmaktadır.

Bu çalışmada da bazalt fiber ile güçlendirilmiş örneklerin  $q_u$  değerlerinin bazalt fiber katkı ve su oranının artmasına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Nitekim deneysel çalışmalar sırasında bazalt fiber oranının artmasıyla yer yer bazalt fiber topaklanmalarının meydana geldiği ve bunun sonucunda rastgele dağıtılan bazalt fiberin kil ile homojen olarak karışmakta zorlandığı gözlemlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla son yıllarda fiberler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazalt fiberler cam ve polimer fiberlere göre doğal olarak bulunması, daha çevreci, dayanımının yüksek, maliyetinin düşük, daha sürdürülebilir, yalıtım özelliğinin iyi olması gibi özelliklerinden dolayı bazalt fibere olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Bazalt fiberin zemin iyileştirmesinde ve zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri ile ilgili çalışmalar henüz geliştirilme aşamasındadır ve çalışmalar devam etmektedir. Dolayısıyla bu konuda yapılacak deneysel çalışmalar, zemin güçlendirmede bazalt fiber kullanımı konusunda veri tabanı oluşturması açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bazalt fiber katkılı kaolin kilinde su ve bazalt fiber oranının  $q_u$  değerlerine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Katkısız kaolin kilinin LL değeri %45, PL değeri %24 ve PI değeri %21 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan kil Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli (CL) kil sınıfındadır.
2. Katkısız kil örneklerinde maksimum  $q_u$  değeri 294.08 kPa ile %25 su oranına sahip örnekte belirlenmiştir.
3. Katkısız ve güçlendirilmiş örneklerde  $q_u$  değerleri su oranının %25'e ulaşmasıyla maksimum değerlere ulaşmış, su oranının %30 olduğu örneklerde azalmaya başlamış ve su oranının %35 olması durumunda katkısız kilin  $q_u$  değerine düşmüştür. Su oranının artmasıyla birlikte fiber ve zemin arasında oluşan ara yüz kuvvetlerindeki azalmalara bağlı olarak zeminin dayanımı da azalmaktadır.
4. Bazalt fiber katkı oranına bağlı olarak  $q_u$  değerlerinde gözlenen değişimler su oranındaki ile benzerdir. En yüksek  $q_u$  değeri bazalt fiber oranının %1 olduğu örnekte ortaya çıkmıştır. Katkı oranının artışı ile birlikte  $q_u$  değerlerinde azalmalar oluşmuştur. Bazalt fiber oranının artması ile zemin içerisinde fiberler arasında meydana gelen elektromanyetik etkileşim ile fiberlerin belli bölgelerde bir araya gelmesi ve topaklanması dayanımın azalmasında rol oynamaktadır.
5. 24 mm boyundaki bazalt fiberin kullanıldığı bu çalışma, bazalt fiber katkısı ile güçlendirilmiş düşük plastisiteli killi zeminlerde optimum bazalt fiber oranının %1, su oranının ise %25 olduğunu göstermiştir. Bu oranlar kullanılarak güçlendirilmiş örneklerde en yüksek  $q_u$  değeri 807.40 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer katkısız kile ait  $q_u$  değeri ile karşılaştırıldığında, dayanımda meydana gelen artış oranının %175 olduğu görülmektedir.
6. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, bazalt fiber ile güçlendirilmiş düşük plastisiteli killerde maksimum dayanım artışını sağlayabilmek için bazalt fiber oranı ile birlikte su oranının da oldukça etkili olduğunu,

optimum oranların kullanılması halinde zemin dayanımının önemli sayılabilecek oranlarda artırılabilirliğini göstermektedir.

7. Yapılan deneysel çalışmalar, fiber kullanılarak yapılan güçlendirmelerde, başarılı bir sonucun elde edilebilmesi için, güçlendirilen killi zemin için optimum su oranı, fiber oranı ile birlikte, zemine eklenen fiberin homojen bir şekilde zemin içerisine dağıtılarak karıştırılmasının önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur.

### **Teşekkür / Katkı belirtme**

#### *Acknowledgement*

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.22.32 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

### **Yazar katkısı**

#### *Author contribution*

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

### **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*

- Abdi, M. R., Parsapajouh, A., & Arjomand, M. A. (2008). Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays. *International Journal of Civil Engineering*, 6(4), 284-292.
- Ahmad, F., Bateni, F., & Azmi, M. (2010). Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles & Geomembranes*, 28(1), 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.017>
- Al-Bared, M. A. M., Harahap, I. S. H., Marto, A., Abad, S. V. A. N. K., & Ali, M. O. A. (2019). Undrained shear strength and microstructural characterization of treated soft soil with recycled materials. *Geomechanics and Engineering*, 18(4), 427-437. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.18.4.427>
- Amini, P. F., & Noorzad, R. (2018). Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.026>
- Aral, M. (2006). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı-bir optimum tasarım* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- ASTM D4318-17e1, (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698-12e2, (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166M-16, (2016). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- Bao, X., Huang, Y., Jin, Z., Xiao, X., Tang, W., Cui, H., & Chen, X. (2021). Experimental investigation on mechanical properties of clay soil reinforced with carbon fiber. *Construction and Building Materials*, 280, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122517>
- Basaltex (2015). The thread of stone. Retrieved from <http://www.basaltex.com>
- Behbahani, B. A., Sedaghatnezhad, H., & Changizi, F. (2016). Engineering properties of soils reinforced by recycled polyester fiber. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 13(2), 01-07.
- Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., & Ovando-Shelley, E. (2015). Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 363-369. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.003>
- Boz, A., Sezer, A., Özdemir, T., Hızal, G. E., & Azdeniz Dolmacı, O. (2018). Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(122), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3458-x>
- Cao, Z., Ma, O., & Wang, H. (2019). Effect of basalt fiber addition on static-dynamic mechanical behaviors and microstructure of stabilized soil compositing cement and fly ash. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, 1-20. <https://doi.org/10.1155/2019/8214534>
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D. M., & Pasa, G. S. (2002). Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(6), 462-472. [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:6\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462))
- Cui, H., Jin, Z., Bao, X., Tang, W., & Dong, B. (2018). Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms. *Construction and Building Materials*, 189, 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- Czigany, T. (2007). Discontinuous basalt fiber-reinforced hybrid composites. *EXPRESS Polymer Letters*, 1, 59-60.
- Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M., & Russell, A. R. (2010). Fibre reinforced sands: experiments and modeling. *Geotextiles & Geomembranes*, 28(3), 238-250. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.010>
- Edinçliler, A., & Cagatay, A. (2013). Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions. *Geosynthetics International*, 20(1), 39-46. <https://doi.org/10.1680/gein.12.00038>
- Ekinciöğlü, Ö. (2003). *Karma lif içeren çimento esash kompozitlerin mekanik davranışı: Bir optimum tasarım* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Eskişar, T., Karakan, E., & Altun, S. (2016). Effects of fibre reinforcement on liquefaction behaviour of poorly graded sands. *Procedia Engineering*, 161, 538-542. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.688>
- Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., & Javadi, A. A. (2011). Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 899-908. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9427-8>
- Fındıkçı, B. (2020). *Bentonit kilinin cam fiber ile iyileştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Gao, L., Hu, G., Xu, N., Fu, J., Xiang, C., & Yang, C. (2015). Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2015/561293>
- Gisymol, P. G., & Ramya, K. (2017). A study on the effect of basalt fiber in organic soil. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 14(4), 13-17.
- Grim, R.E. (1968). *Clay mineralogy*. McGraw-Hill, New York.
- Jamshaid, H., & Mishra, R. (2015). A green material from rock: basalt fiber-a review. *The Journal of The Textile Institute*, 107(7), 923-937. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>
- Kenan, A., & Özocak, A. (2018). Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerin kayma direncine etkisi. *2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*.

- Kinjal, S., Desai, A. K., & Solanki, C. H. (2012). Experimental study on the Atterberg limits of expansive soil reinforced with polyester triangular fibers. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(4), 636-639.
- Lee, S., Im, J., Cho, G. C., & Chang, I. (2019). Laboratory triaxial test behavior of xanthan gum biopolymer treated sands. *Geomechanics and Engineering*, 17(5), 445-452. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.445>
- Liu, C., Lv, Y., Yu, X., & Wu, X. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiberreinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.03.004>
- Ma, Q. Y., Cao, Z. M., & Yuan, P. (2018). Experimental research on microstructure and physical-mechanical properties of expansive soil stabilized with fly ash, sand, and basalt fiber. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2018, 1-13, <https://doi.org/10.1155/2018/9125127>
- Motiram, P. V., Rohit, C., Tushar, K., Ayushi, C., Bhushan, G., & Deepali, C. (2018). Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil. *International Journal for Research in Engineering Application Management (IJREAM)*, 850-853.
- MTA-Maden Tetkik Arama. (2023, Haziran, 5). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/kaolen.pdf>
- Ndepete, C. P., & Sert, S. (2016). Use of basalt fibers for soil improvement. *Acta Physica Polonica*, 130(1), 355-356.
- Ocakbaşı, P. (2019). *Bazalt fiber katkısının killi zeminlerin drenajsız kayma direncine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Orakoglu, M. E., & Liu, J. (2017). Effect of freeze-thaw cycles on triaxial strength properties of fiber-reinforced clayey soil. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2128-2140. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0960-8>
- Özdemir, T., Polat, G. E., Azdeniz, O., Boz, A., & Sezer, A. (2016). Bazalt fiber ve kireç ile güçlendirilmiş kil zeminin dayanım özellikleri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, 1025-1034.
- Pandit, V. M., Rohit, C., Tushar, K., Ayushi, C., Bhushan, G., & Deepali, C. (2018). Study of basalt fiber on compaction characteristics of black cotton soil. *6th International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET)*, 850-853.
- Pradhan, P. K., Kar, R. K., & Naik, A. (2012). Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 15-25. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9445-6>
- Roustaei, M., Eslami, A. & Ghazavi, M. (2015). Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.011>
- Saravanan, D. (2006). Spinning the rocks-basalt fibers. *Journal of the Institute of Engineers (India). Textile Engineering Division*, 86, 39-45.
- Seyhan, İ. (1971). Volkanik kaolin oluşumu ve andezit problemi. *Maden Tetkik Arama Enstitüsü*, 123-134, Ankara.
- Soğancı, A. S. (2015). The effect of polypropylene fiber in the stabilization of expansive soils. *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 9(8), 994-997.
- Sungur, A., Yazıcı, M. F., & Keskin, S. N. (2021). Bazalt lifi ile güçlendirilmiş killi zeminin mühendislik özellikleri üzerine deneysel araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı*, 28, 895-899. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011881>
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>
- Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. *Transportation Geotechnics*, 16, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.003>

- Valipour, M., Shourijeh, P. T., & Mohammadina, A. (2021). Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. *Transportation Geotechnics*, 27, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>
- Wang, S., Xue, Q., Ma, W., Zhao, K., & Wu, Z. (2021). Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced and geopolymer-stabilized clay soil. *Construction and Building Materials* 272(2021), 121914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121914>
- Yetimoglu, T., & Salbas, O. (2003). A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2), 103-110. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00003-7)
- Yixian, W., Panpan, G., Shengbiao, S., Haiping, Y., & Binxiang, Y. (2016). Study on strength influence mechanism of fiber-reinforced expansive soil using jute. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 1079-1088. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0028-4>
- Zaimoglu, A. S. (2010). Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 60(1), 63-65. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.07.001>

## Isı ve elektrik enerjisi üretimi için doğal gazı yeşil bir çözüm: Güneş enerjisi uygulamalarıyla bir örnek olay incelemesi

*A green solution to natural gas for heat and electric power generation: A case study with solar energy applications*

Mert ÖKTEN \*<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 45100, Manisa

• Geliş tarihi / Received: 10.01.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 13.06.2023

### Öz

Enerji, ekonomik, endüstriyel ve toplumsal kalkınma için hayati öneme sahiptir. Enerji tüketimindeki artış istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Sera gazı emisyonlarına, hava, su ve toprak kirliliğine neden olan fosil kökenli yakıtların yerini sürdürülebilir ve çevre dostu yenilenebilir enerji kaynakları almaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini oluşturan güneş enerjisi, hem elektrik enerjisi üretiminde hem de termal enerji üretiminde kullanılabilir. Bu çalışmada güneş enerjisi uygulamaları ile Ankara ili iklim şartlarında, iki kişilik bir evin elektrik ve ısınma ihtiyacının karşılanması incelenmiş, çevresel analizi yapılmıştır. Çalışmada fotovoltaiik paneller, vakum tüplü U-borulu güneş kolektörü ve fotovoltaiik termal panellerin ayrı ayrı ve birlikte kullanımı ile elde edilecek enerji miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca fotovoltaiik termal panellerde çalışma akışkanı olarak su ile birlikte  $Al_2O_3+CuO$  hibrit nanoakışkanı da kullanılarak, nanoakışkan kullanımının termal enerji transferine etkisi de araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, sadece fotovoltaiik panel kullanımı ile enerji ihtiyacının karşılanması için 11 adet 325 W gücünde panele, sadece fotovoltaiik termal panel kullanımı ile karşılanması durumunda ise 7 adet 300 W elektrik, 600 W termal güce sahip panel gerektirdiği hesaplanmıştır. Ayrıca fotovoltaiik termal sistemde  $Al_2O_3-CuO$  hibrit nanoakışkanının saf su yerine kullanılması ile verimde %19.41 oranında artış sağladığı görülmüştür. Enerji ihtiyacını karşılamak için güneş enerjisi kullanımının dünyada artan doğal gaz sorununa hem yerli enerji kaynağı kullanılarak ekonomiye hem de sera gazı emisyonlarını azaltarak çevresel çözüm olacağı önerilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Doğal gaz, Güneş enerjisi, PV, PV/T, Vakum tüplü U borulu güneş kolektörü, Yenilenebilir enerji.

### Abstract

Energy is crucial for economic, industrial, and social development. The increase in energy consumption is steadily rising. Fossil fuels, which cause greenhouse gas emissions, air, water, and soil pollution, are being replaced by sustainable and environmentally friendly renewable energy sources. Solar energy, which is the basis of renewable energy sources, can be used in both electricity and thermal energy production. In this study, the use of solar energy applications for meeting the electricity and heating needs of a two-person household under Ankara's climate conditions was examined, and an environmental analysis was conducted. The amount of energy that will be obtained by using photovoltaic panels, vacuum tube U-pipe solar collectors, and photovoltaic thermal panels separately and together was calculated. In addition, the effect of using  $Al_2O_3+CuO$  hybrid nanofluid in photovoltaic thermal panels as a working fluid on thermal energy transfer was investigated. As a result of the study, it was calculated that 11 panels with a power of 325 W would be required for meeting the energy demand with only photovoltaic panel use, and 7 panels with 300 W electricity and 600 W thermal power would be required for meeting the energy demand with only photovoltaic thermal panel use. Moreover, it was observed that using  $Al_2O_3-CuO$  hybrid nanofluid in photovoltaic thermal systems instead of pure water increased efficiency by 19.41%. It is recommended that the use of solar energy to meet energy needs will be both an economic solution by using a domestic energy source and an environmental solution by reducing greenhouse gas emissions, addressing the increasing natural gas problem in the world.

**Keywords:** Natural gas, Solar energy, PV, PV/T, Vacuum tube U-pipe solar collector, Renewable energy.

\* Mert ÖKTEN; mert.okten@cbu.edu.tr

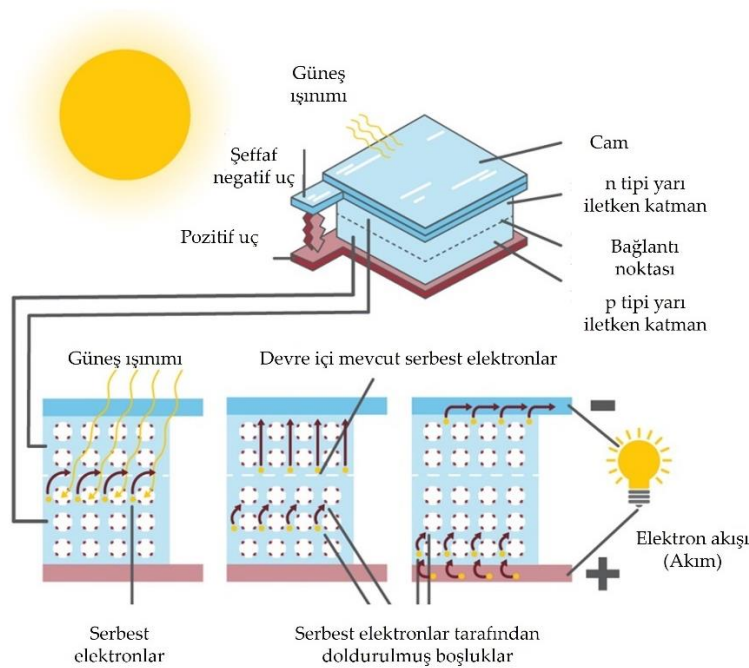


## 1. Giriş

### 1. Introduction

Enerji, iktisadi gelişmenin en önemli unsurudur. Dünyada istikrarlı bir şekilde artmakta olan enerji tüketimi ağırlıklı olarak doğal gaz, kömür, petrol gibi fosil kökenli yakıtlarla giderilmektedir. Fosil kökenli yakıtların rezerv kısıtlılığı ile çevreye ve atmosfere olan zararları göz önüne alındığında alternatif, sürdürülebilir, yeşil bir yol bulunması elzem olmuştur. Yenilenebilir enerji denilen bu kaynaklar güneş, rüzgar, hidrolik, biyokütle gibi çevreyi kirletmeyen, sera gazı emisyonuna sebebiyet vermeyen yeşil yakıtlardır. Ayrıca karbon ayak izinin minimize edilmesinde büyük rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ve karasal yaşamın temelini oluşturan elektromanyetik enerji (güneş radyasyonu), güneşteki hidrojen elementinin füzyon tepkimesi ile helyuma dönüşmesi sırasında açığa çıkmaktadır. Güneş enerjisinden güneş ısısını veya güneş ışığını yakalayıp yararlanılmaktadır (Bellos vd., 2015; Tuncer vd., 2023; Khanlari vd., 2023.).

Güneş enerjisinden fotovoltaik (PV) hücreler vasıtasıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir (Şekil 1) (EIA, 2022).



Şekil 1. Fotovoltaik (PV) hücre (EIA, 2022)

Figure 1. Photovoltaic (PV) cell (EIA, 2022)

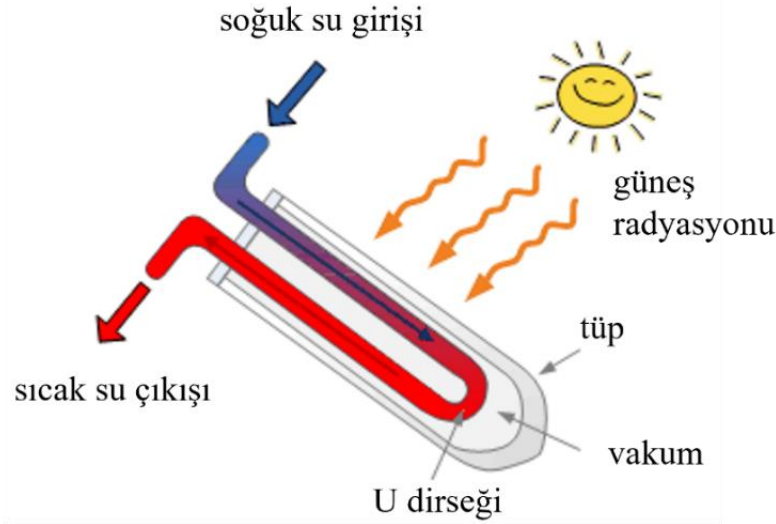
PV hücrelerin birleşiminden oluşan PV paneller, monokristal ( $\eta$ =%13-16), polikristal ( $\eta$ =%11-16), ince film ( $\eta$ =%7-11) ve esnek ( $\eta$ =%4-8) olmak dört çeşittir (Solimpeks, 2022).

Sıfır karbon emisyonlu binalar konsepti doğrultusunda PV paneller ile elektrik ihtiyacının karşılanmasına yönelik araştırmalar son yıllarda artmıştır. Albadry vd. (2017) Mısır'da, Tavares vd. (2022) Portekiz'de, Krarti (2021) ABD'de, Mohammed vd. (2022) Suudi Arabistan'da, Sim & Suh (2021) G.Kore'de, Bhuvad & Udayraj (2022) Hindistan'da ve Türkiye'de Bakır (2022) ve Er (2023) PV paneller kullanarak binalarda enerji tasarrufu sağlamaya çalışmışlardır. Tarragona vd. (2022) yaptığı çalışmada PV panel kullanımının Helsinki, Strasburg ve Atina'da elektrik şebekesi tüketiminde sırasıyla %34, %54 ve %90'a varan düşümlere katkıda bulunduğu görülmüştür. Ayrıca 30 kWp'lik bir çatı üstü fotovoltaik güneş enerji santralinin modellendiği çalışmada da geri ödeme süresinin 6 yıl olarak bulunmuştur (Ateş, 2023).

Güneş enerjisi uygulamalarından biri de güneş kolektörleridir. Genellikle kullanım suyu ısıtmak için kullanılan bu cihazlar güneş radyasyonunu toplar veya yoğunlaştırır (Boyle, 2004). Düz plakalı ( $\mathcal{N}$  = 30 – 80 °C), vakum tüplü ( $\mathcal{N}$  = 50 – 200 °C), bileşik parabolik yoğunlaştırıcı (CPC) ( $\mathcal{N}$  = 60 – 240°C), parabolik oluklu toplayıcılar (PTC) ( $\mathcal{N}$  = 60 – 300 °C), doğrusal Fresnel reflektör (LFR) ( $\mathcal{N}$  = 60 – 250 °C), parabolik çanak

( $\lambda = 100 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ve güneş kulesi ( $\lambda = 150 - 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) olmak üzere yedi tip güneş kolektörü mevcuttur (Wang vd., 2016).

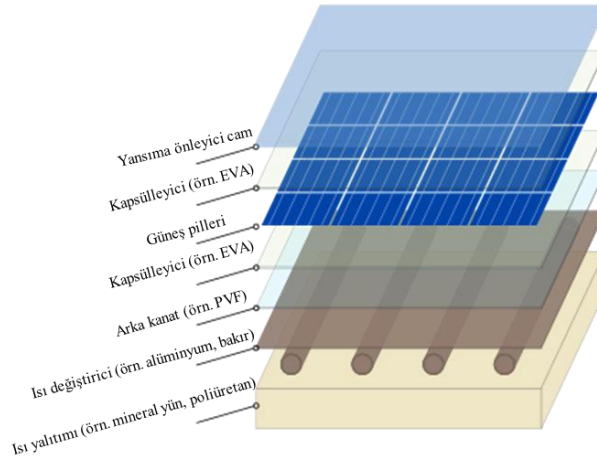
Popüler güneş kolektörü tiplerinden biri U tipi vakum tüplü güneş kolektörüdür (Şekil 2) (Alternative Energy Tutorials, 2022). Bu kolektörde dış cam tüpün dış yüzeyine gelen güneş radyasyonu, iç cam tüpün dış yüzeyine aktarılır ve daha sonra kanatçık malzemesi tarafından emilerek U şeklindeki bakır borunun içindeki çalışma sıvısına aktarılır.



**Şekil 2.** Vakum tüplü U borulu güneş kolektörü (Alternative Energy Tutorials, 2022)  
**Figure 2.** U-pipe solar collector with vacuum tube (Alternative Energy Tutorials, 2022)

Güneş simülatöründe vakum tüplü U-borulu güneş kolektörü test edildiği bir çalışmada absorber alanına göre verimin %38-56 arası değiştiği, akışkan debisindeki artışın verimi artırdığı görülmüştür (Özsoy & Galip, 2018). U borulu güneş kolektörlerinde performans iyileştirmesine yönelik yapılan çalışmalarda faz değiştiren malzemeler (Lim & Sobhansarbandi, 2022; Li vd., 2022) ve nanoakışkanlar (Kim vd., 2017; Kaya vd., 2020) da kullanılmaktadır.

Fotovoltaik modüller ile güneş kolektörlerinin bir sistemde birleşmesiyle meydana gelen fotovoltaik termal (PV/T) güneş kolektörleri, hem ısı hem de elektrik üretimi eldesinde kullanılan hibrit güneş enerjisi uygulamasıdır (Şekil 3) (Ramos vd., 2019). Fotovoltaik pillerin  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  olan çalışma sıcaklıklarının üstünde oluşan sıcaklık değerlerinde, sistem soğutularak elektrik enerjisi verimi artırılırken, ortaya çıkan atık ısıdan da faydalanılmaktadır.



**Şekil 3.** Fotovoltaik termal (PV/T) güneş kolektörü (Ramos vd., 2019)  
**Figure 3.** Photovoltaic thermal (PV/T) solar collector (Ramos vd., 2019)

[Strebkov & Filippchenkova \(2021\)](#) ANSYS Fluent yazılım paketini kullanarak PV/T modülünün bir CFD modeli geliştirdikleri çalışmada, hesaplanan değerlerin analitik ve deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırılabilir olduğu sonucuna ulaşmışlardır. [Özakın & Kaya \(2019\)](#) hava akışkanlı PV/T sisteminin iyileştirilmesi için kanatçık ilavesi kullanmışlar ve %55-70 oranında ısı verim artışı elde etmişlerdir. Madrid’de yapılan bir çalışmada, PV/T panelin kullanılması yalnızca bir PV hücre performansına göre daha verimli olduğu belirtilmiş ve özellikle kullanım suyu için çıkış suyu sıcaklığı aşırı yüksek olmadığında kullanımı önerilmiştir ([Morena vd., 2017](#)). Kanada’da müstakil evlerde alan ve kullanım sıcak suyu ısıtması için yapılan çalışmada PV tabanlı sistemler ile güneş kolektörü tabanlı sistemler karşılaştırılmış, PV tabanlı sistemin uygulanmasının, düşük maliyet, yüksek çıkış gücü, esneklik ve kolay kurulum dikkate alındığında oldukça uygun olacağı sonucuna ulaşmışlardır ([Rahaman & Iqbal, 2019](#)). St. Petersburg şehrinde bir binanın tatlı su, elektrik ve ısıtma ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla PV/T ve PTC güneş enerjisi sistemi önerilmiş, bu senaryonun çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilir olduğunu belirtmişlerdir ([Deymi-Dashtebayaz vd., 2022](#)). PV panellerin elektrik üretimini artırmak için yapılan çalışmada, fotovoltaiik hücre üretiminde kullanılan diyotlara Mn nano parçacık katkısının diyotların ışığa duyarlılığını geliştirdiği sonucuna ulaşmışlardır ([Demirbilek vd., 2023](#)). PV panellerin soğutma işlemlerinde [Şen & Çeliktaş \(2022\)](#) faz değiştiren malzeme, [Ökten \(2022\)](#) faz değiştiren malzeme ve nanoparçacıkları beraber kullanmış ve çalışmalarında verim artırıcı sonuçlar elde etmişlerdir. Manyetik nanoakışkanlar kullanılarak, PV sisteminin soğutulması ve PV/T sisteminin termal ısı transferinin artırılması ile çift yönlü performans artışı sağlanmıştır ([Swese & Hançerlioğulları, 2022](#)). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO su nanoakışkanı ile çalışan bir PV/T panelde %91’lik bir genel tepe termal verim elde edilmiş, bu verim su ile karşılaştırıldığında toplayıcının performansında %34’lük bir artışa denk gelmiştir ([Wole-Osho vd., 2020](#)).

Bu çalışmada, Ankara ili meteorolojik şartlarında iki kişilik bir dairenin, elektrik ve ısı enerjisi ihtiyacını doğal gaz alternatif olarak güneş enerjisi uygulamaları ile (PV panel + vakum tüplü U-borulu güneş kolektörü ile PV/T panel) karşılanması incelenecektir. Çalışmada kullanılan sıvı akışkanlı PV/T panellerde akışkan olarak su ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO hibrit nanoakışkanı da kullanılarak, termal enerji transferinde artış sağlanması beklenilmektedir. Dünyada artan doğal gaz sorununa yerli ve yenilenebilir enerji kaynağı kullanılarak enerji ve çevre sorunlarının çözümüne katkı sağlanması hedeflenmektedir.

## 2. Gereç ve yöntem

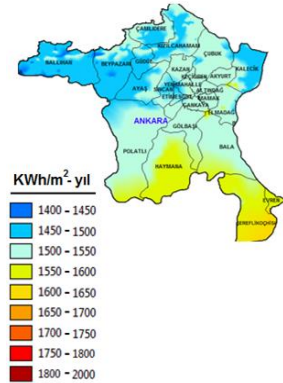
### 2. Equipment and method

Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli açısından Avrupa ülkelerine göre oldukça elverişlidir ([Bahar & Ökten, 2021](#)). Coğrafi konumu 39.91° kuzey enlemi, 32.92° doğu boylamı olan Ankara’nın, yıllık ortalama güneşlenme süresi 2,506 saat, yıllık ortalama güneş radyasyonu miktarı ise 1,389 Wh/m<sup>2</sup>’dir ([Ökten, 2021](#)). Tablo 1’de Ankara ili için meteorolojik veriler belirtilmiştir ([MGM, 2022](#) ; [ETKB, 2022](#)).

**Tablo 1.** Ankara ili meteorolojik verileri

**Table 1.** Ankara province meteorological data

Ay	Sıcaklık (°C)	Güneşlenme süresi (h)	Radyasyon miktarı (kWh/m <sup>2</sup> )
Ocak	0.20	2.60	1.69
Şubat	1.70	3.80	2.47
Mart	5.70	5.10	3.75
Nisan	11.20	6.50	4.74
Mayıs	16.10	8.40	6.01
Haziran	20.00	10.00	6.35
Temmuz	23.40	11.20	6.32
Ağustos	23.40	10.60	5.71
Eylül	18.90	9.10	4.70
Ekim	13.20	6.70	3.26
Kasım	7.30	4.60	1.97
Aralık	2.50	2.50	1.47



1 ve 2 arasında kararlı durum sürecinden geçen kapalı sistemler için termodinamiğin 1.yasası (enerjinin korunumu) matematiksel olarak denklem 1 ifade edilir ([Moran & Shapiro, 2006](#)).

$$\int_1^2 \delta Q - \int_1^2 \delta W = E_2 - E_1 \quad (1)$$

Güneş kolektörlerinde uniform toplayıcı plaka sıcaklığı için, akışkan tarafından emilen faydalı ısı oranı denklem 2’de gösterildiği şekildedir (Hottel & Woertz, 1942; Jafarkazemi & Ahmadifard, 2013).

$$\dot{Q}_f = \dot{m}c_p(T_c - T_g) \quad (2)$$

Uniform olmayan toplayıcı plaka sıcaklığı yerine genellikle ısı giderme faktörü (denklem 3) kullanılır.

$$\dot{Q}_f = F_R A_k [(\tau\alpha)_{ef} G - U_k (T_g - T_o)] \quad (3)$$

Hem konveksiyon hem de radyasyon yoluyla kolektörden atmosfere ısı transferi kayıplarını hesaba katılmasında ısı kayıp katsayısı ( $U_k$ ) (denklem 4) kullanılır.

$$\dot{Q}_K = U_K A_k (T_k - T_o) \quad (4)$$

Isı giderme faktörü ( $F_R$ ) denklem 5’teki gibi tanımlanır ve burada  $F'$  kolektör verimlilik faktörüdür.

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{U_K A_k} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-F' U_K A_k}{\dot{m}c_p}\right) \right] \quad (5)$$

Denklem 6’da termal güneş kolektörünün enerji verimliliği gösterilmiştir.

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_K}{G A_k} \quad (6)$$

Fotovoltaik panellerde genel ısı kaybı katsayısı, hem konveksiyon hem de radyasyondan kaynaklanan kayıpları içerir (denklem 7-10) (Sarhaddi vd., 2010; Kalogirou vd., 2016).

$$U_K = h_{kv} + h_{rad} \quad (7)$$

$$h_{kv} = 2,8 + 3v_R \quad (8)$$

$$h_{rad} = \varepsilon_{hücre} \sigma (T_{atm} + T_{hücre})(T_{atm}^2 + T_{hücre}^2) \quad (9)$$

$$T_{atm} = 0,0552 T_o^{3/2} \quad (10)$$

PV hücrelerinin enerji verimliliği için maksimum değer denklem 11’de verilmiştir.

$$\eta_{PV} = \frac{V_{oc} I_{sc}}{G A_{hücre}} \quad (11)$$

Fotovoltaik termal paneller, hem güneş kolektörlerinin hem de fotovoltaik panellerin kombinasyonu ile çalışmaktadır (denklem 12-14) (Lupu vd., 2019).

$$\dot{Q}_f = \dot{m}c_p(T_c - T_g) = F_R A_{PV/T} [(\tau\alpha)_{ef} G - U_k (T_g - T_o)] \quad (12)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{U_K A_{PV/T}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-F' U_K A_{PV/T}}{\dot{m}c_p}\right) \right] \quad (13)$$

$$\eta_{PV/T, tr} = \frac{\dot{Q}_K}{G A_{PV/T}} = F_R [(\tau\alpha)_{ef} - \frac{U_k (T_g - T_o)}{G}] \quad (14)$$

PV/T paneli için termal verimlilik, elektrik verimliliği ile birleştirilir (denklem 15,16). Burada su sirkülasyon pompası tarafından tüketilen elektrik gücünün analizde dikkate alınması gerekir.

$$\dot{E}_p = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho\eta_p} \quad (15)$$

$$\eta_{PVT,el} = \frac{V_{mp}I_{mp} - \dot{E}_p}{G A_{PV/T}} \quad (16)$$

Bu çalışmada PV/T panellerde akışkan olarak suyun dışında  $Al_2O_3$ -CuO hibrit nanoakışkanı da kullanılacaktır. Hazırlanan nanoakışkanın partikül hacim konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak termofiziksel özellikleri hesaplanmalıdır. Bu bağlamda, nanoakışkanın yoğunluğu denklem 17'den, özgül ısı değeri denklem 18'den, ısıl iletkenlik katsayısı denklem 19'dan ve dinamik viskozite değeri denklem 20'den hesaplanmaktadır (Gürbüz vd., 2021). Bu denklemlerde “n” alt indisi nanoakışkanı, “p” alt indisi nano partikülü, “ts” alt indisi ise temel sıvı akışkanı temsil etmektedir.

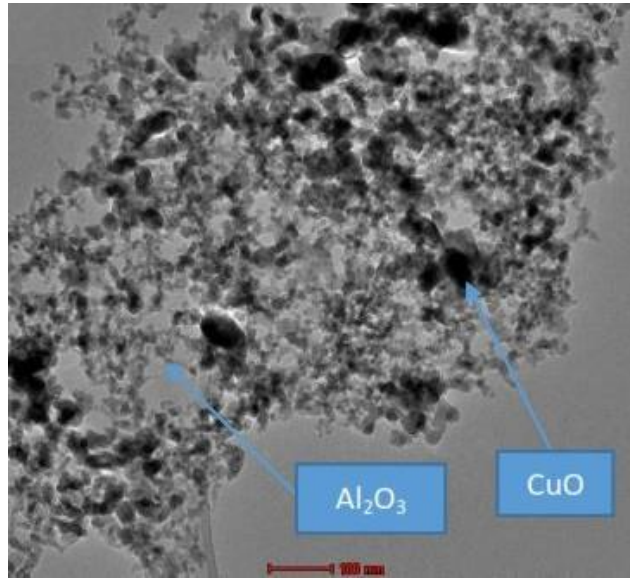
$$\rho_n = \phi\rho_p - (1 - \phi)\rho_{ts} \quad (17)$$

$$c_{p,n} = \phi c_{p,p} - (1 - \phi)c_{p,ts} \quad (18)$$

$$k_n = k_{ts} \frac{k_p + 2k_{ts} + 2\phi(k_p - k_{ts})}{k_p + 2k_{ts} - 2\phi(k_p - k_{ts})} \quad (19)$$

$$\mu_n = \mu_{ts}(1 + 2.5\phi) \quad (20)$$

Şekil 4'te  $Al_2O_3$ -CuO hibrit nanoakışkanının geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.  $Al_2O_3$ -CuO TEM görüntüsü (50:50)

Figure 4.  $Al_2O_3$ -CuO TEM image (50:50)

### 3. Bulgular

#### 3. Results

Ankara ilinde bulunan ve ısınma ile sıcak su ihtiyacını doğal gaz ile karşılayan evin 15 Kasım- 15 Nisan arasını kapsayan 5 aylık dönemde ortalama  $15 \text{ m}^3$ , kalan 7 aylık dönemde de ortalama  $5 \text{ m}^3$  doğal gaz kullanımı olmakla beraber toplamda  $110 \text{ m}^3$  doğalgaz kullanımı gerçekleşmiştir. Bu kullanım yıllık  $1,170.4 \text{ kWh}$  tüketime eşdeğerdir (Ökten, 2021). Ayrıca günlük ortalama  $1.93 \text{ kWh}$  elektrik enerjisi tüketimi olan bu evin doğal gaz kullanımıyla beraber yıllık elektrik tüketimi  $1,874.85 \text{ kWh}$ 'dir.

Bu çalışmada elektrik ve doğal gaz kullanımının güneş enerjisi uygulamalarından olan fotovoltaik (PV) paneller + güneş kolektörleri ve fotovoltaik termal (PV/T) paneller ile ayrı ayrı karşılanması incelenmektedir.

### 3.1. Fotovoltaik (PV) paneller + Güneş kolektörleri

#### 3.1. Photovoltaic panels + Solar collectors

Fotovoltaik panel ihtiyacı hesaplanırken denklem 21'den günlük gerekli olan enerji miktarı, güneşli gün sayısı ve sistem verimine göre kurulması gereken güç değeri bulunur. Sistem verimi fotovoltaik panel, akü ve inverter verimlerine bağlıdır (denklem 22) (Alkan vd., 2014).

$$\text{Gereken enerji miktarı} \left( \frac{kWh}{gün} \right) = \text{Kurulu güç (kW)} \times \text{Güneşlenme süresi} \left( \frac{h}{gün} \right) \times \eta_{sis} \quad (21)$$

$$\eta_{sis} = \eta_{PV} \times \eta_{akü} \times \eta_{inv} \quad (22)$$

Kullanılacak panel sayısı denklem 23 ile bulunur.

$$\text{Panel sayısı} = \frac{\text{Kurulu güç}}{\text{Panel gücü}} \quad (23)$$

Günlük 5.14 kWh gerekli enerji miktarı, 2.5 saat güneşlenme süresi (Aralık ayı) ve %58 sistem verimi değerlerine göre yapılan hesaplama sonucunda 3,545 kW kurulu güç gerektiği saptanmıştır. Bu değer 325 W gücünde 11 adet fotovoltaik paneller sağlanabilmektedir. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde bulunan temel elemanlar fotovoltaik panel, şarj kontrol cihazı, inverterdir. Şebekeye bağlı sistemlerde akü grubuna gerek yoktur. İnverter, yükün çekilebileceği maksimum gücü kaldırabilir düzeyde olmalıdır ve bir ev için hesaplanırken buzdolabı, aydınlatma, televizyon ve bilgisayar gibi cihazların aynı anda çalıştığı andaki toplam yük değerini karşılamalıdır.

Ortalama piyasa değeri 3,850 ₺ olan 325 W gücünde fotovoltaik panel, şarj kontrol cihazı, inverter ve sistem kurulum elemanları ile birlikte toplam fotovoltaik panel sistemi maliyeti 62,810 ₺'dir (morfikirler.com, 2022). 2022 yılı EPDK konutlarda elektrik birim tarifesi 1.7346 ₺/kWh'dir (EPDK, 2022). Yıllık elektrik tüketimi 1,874.85 kWh olan dairenin elektrik tüketim maliyeti 3,251.11 ₺'dir. Enflasyon oranı 0.84 (TCMB, 2022) ve faiz oranı 0.14'tür (Gu vd., 2018). 25 yıllık ekonomik ömür süresi olan fotovoltaik panel sisteminde amortisman süresi ise yaklaşık olarak 20 yıldır. Enflasyon ve döviz kurundaki dalgalanma, geri ödeme süresinin uzamasına sebebiyet vermektedir.

Güneş kolektöründen elde edilen enerji miktarı ANSYS Fluent Solar Calculator modülü ile hesaplanmıştır (Ansys, 2016). Solar Calculator modülünde hesaplama iki yöntemle olmaktadır. Bu yöntemlerden Uygun Hava Koşulları Yöntemi (Fair Weather Conditions Method) denklem 24'te, Teorik Maksimum Yöntemi (Theoretical Maximum Method) ise denklem 25-27'de gösterilmiştir.

$$Edn = \frac{A}{B} \frac{1}{e^{\sin \beta}} \quad (24)$$

$$Edn = S_{etrn} \times S_{unprime} \quad (25)$$

$$Ed = C \times Edn \times \frac{(1 + \cos \epsilon)}{2} \quad (26)$$

$$Er = Edn \times (C + \sin \beta) \times \vartheta_g \times \frac{(1 + \cos \epsilon)}{2} \quad (27)$$

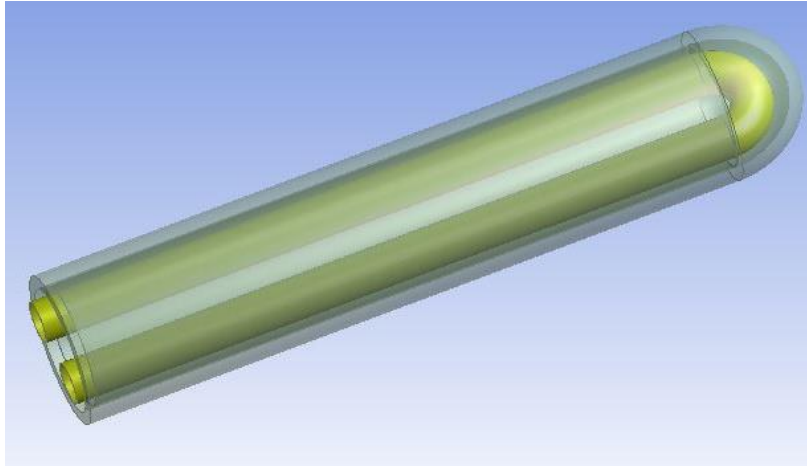
Bu eşitliklerde,  $Edn$ ; doğrudan normal ışınım miktarını,  $Ed$ ; dağınık güneş ışınım miktarını,  $Er$ ; topraktan yansıyan güneş ışınım miktarını,  $A, B$ ; görünür güneş ışınımını,  $\beta$ ; güneş yükseklik açısını,  $S_{etrn}$ ; atmosferin üstüne gelen doğrudan normal ışınım miktarını,  $S_{unprime}$ ; düzeltme faktörünü,  $C$ ; sabit katsayı değerini,  $\epsilon$ ; eğim açısını ve  $\vartheta_g$ ; zemin yansıtma değerini belirtmektedir.

Tablo 2'de U-borulu vakum tüplü güneş kolektörünün özellikleri (Kıran Naik & Muthukumar, 2019; O'Neil & Sobhansarbandi, 2022) ve Aralık ayı için çevre ve çalışma akışkanı sıcaklık değerleri verilmiştir.

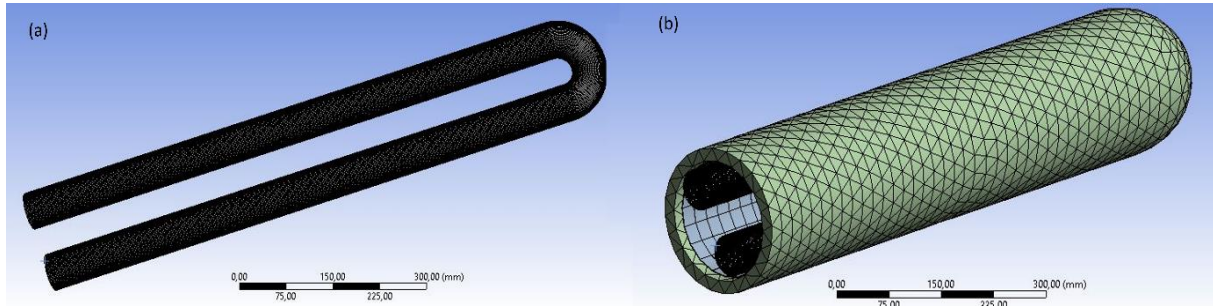
**Tablo 2.** U-borulu vakum tüplü güneş kolektörünün özellikleri  
**Table 2.** Properties of U-pipe vacuum tube solar collector

Parametre	Değer
U borusu malzeme	Bakır
U borusu yarıçap (m)	0.027
U borusu kalınlık (m)	0.001
Termal iletkenlik katsayısı U borusu ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	368
Kanat tipi	Alüminyum
Kanat yarıçap (m)	0.08
Kanat kalınlık (m)	0.001
Termal iletkenlik katsayısı kanat ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	202
Cam boru yarıçap (m)	0.1
Cam boru kalınlık (m)	0.017
Termal iletkenlik katsayısı cam boru ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	0.7
Geçirgenlik katsayısı ( $\tau$ )	0.907
Yutuculuk katsayısı ( $\alpha$ )	0.93
Emicilik katsayısı ( $\epsilon$ )	0.8
Çevre sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )	5
Çalışma akışkanı	Su
Çalışma akışkanı giriş sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )	15
Çalışma akışkanı çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )	36
Çalışma akışkanı kütleli debisi ( $kg \cdot s^{-1}$ )	0.03
Reynolds sayısı	< 4,000

Şekil 5'te vakum tüplü U-borusunun teknik çizimi, Şekil 6'da da ağ örgüsü yapısı verilmiştir.



**Şekil 5.** Vakum tüplü U-borusu teknik çizimi  
**Figure 5.** Vacuum tube U-pipe technical drawing



**Şekil 6.** Ağ örgüsü yapısı. (a) U-borusu ve (b) Vakum tüplü U-borusu  
**Figure 6.** Mesh structure. (a) U-pipe and (b) Vacuum tube U-pipe

Şekil 6’da verilen ağ örgüsü yapısında 220,262 bağlantı noktası ve 114,993 ağ örgüsü elemanı bulunmaktadır. ANSYS Fluent Solar Calculator modülü ile yapılan hesap sonucunda 21 Aralık saat 13:00’da doğrudan gelen güneş ışınım miktarı  $890.65 \text{ W/m}^2$  olarak bulunmuştur.  $0.0823 \text{ m}^2$  absorbe alanına sahip olan U-borusunda kullanılabilir enerji miktarı  $73.3 \text{ W}$ , yıllık elde edilebilecek enerji miktarı da yaklaşık olarak  $27 \text{ kW}$  değerindedir.

Vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün PV panellerle birlikte kullanılmasında, gerekli PV panel sayısı 7’ye düşmektedir. Piyasa değeri ortalama  $8,000 \text{ ₺}$  olan güneş kolektörü, sistemde kullanıldığı zaman sadece PV panellerin kullanıldığı sisteme göre yaklaşık  $5,000 \text{ ₺}$  tasarruf sağlanmaktadır. Bu değerlere göre de sistem amortisman süresi yaklaşık 2 yıl azalarak 18 yıla düşmektedir.

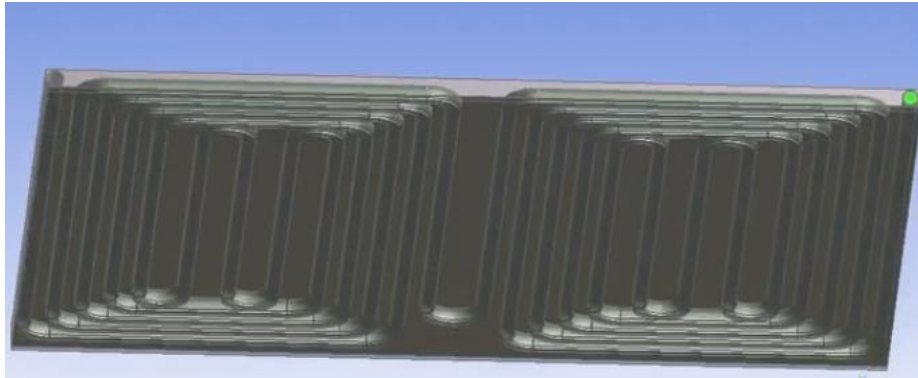
### 3.2. Fotovoltaik termal (PV/T) paneller

#### 3.2. Photovoltaic thermal (PV/T) panels

Ortalama piyasa değeri  $6,500 \text{ ₺}$  olan  $300 \text{ W}$  elektriksel,  $600 \text{ W}$  termal güce sahip bir su akışkanlı fotovoltaik termal panelden, günlük  $5.14 \text{ kWh}$  enerji miktarı gerekli olan eve 7 adet gerekmektedir. Sistemin amortisman süresi yaklaşık olarak 15 yıldır.

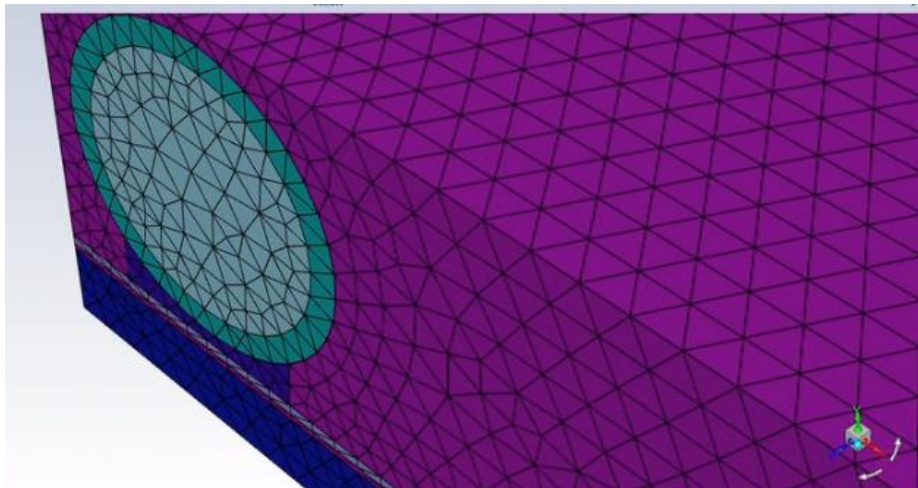
Fotovoltaik termal (PV/T) panellerde, çalışma akışkanı olarak  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$  hibrit nanoakışkanının kullanımı ANSYS Fluent yazılımı ile modellenmiştir. Sistemde kullanılan malzemeler ve termofiziksel özellikleri (Teo vd., 2012; Mercan & Yurddaş, 2019; Podder vd., 2022) ile Aralık ayı çevre ve çalışma akışkanı sıcaklık değerleri Tablo 3’te gösterilmiştir

Şekil 7’de fotovoltaik termal panelin teknik çizimi, Şekil 8’de ise ağ örgüsü yapısı verilmiştir.



Şekil 7. Fotovoltaik termal (PV/T) panel teknik çizimi

Figure 7. Photovoltaic thermal (PV/T) panel technical drawing



Şekil 8. Ağ örgüsü yapısı

Figure 8. Mesh structure



**Tablo 3.** PV/T sistem malzemeleri ve termofiziksel özellikleri  
**Table 3.** PV/T system materials and thermophysical properties

Parametre	Değer
Fotovoltaik termal panel alan (m <sup>2</sup> )	1.68
Fotovoltaik termal panel elektriksel güç (W)	300
Fotovoltaik termal panel termal güç (W)	600
Isı giderme faktörü	0.85
Cam kalınlık (m)	0.003
Termal iletkenlik katsayısı cam (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	0.7
Cam yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	2,800
Cam özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	750
EVA kalınlık (m)	0.0003
Termal iletkenlik katsayısı EVA (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	0.35
EVA yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	960
EVA özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	2,090
PV kalınlık (m)	0.013
Termal iletkenlik katsayısı PV (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	148
PV yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	2,330
PV özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	677
PVF kalınlık (m)	0.0004
Termal iletkenlik katsayısı PVF (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	0.2
PVF yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	1,200
PVF özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	1,250
Alüminyum (Al) kapak kalınlık (m)	0.003
Termal iletkenlik katsayısı Al (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	202
Al yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	2,712
Al özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	903
Bakır boru çap (m)	0.012
Termal iletkenlik katsayısı bakır (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	368
Bakır yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	8,978
Bakır özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	385
Termal iletkenlik katsayısı su (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	0.605
Su yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	997.78
Su özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	4,076.4
Termal iletkenlik katsayısı Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	3,970
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	765
Termal iletkenlik katsayısı CuO (W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	76.5
CuO yoğunluk (kg*m <sup>-3</sup> )	6,320
CuO özgül ısı kapasitesi (J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup> )	531.8
Çevre sıcaklığı (°C)	5
Çalışma akışkanı	Su, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CuO hibrit nanoakışkanı
Çalışma akışkanı giriş sıcaklığı (°C)	15
Çalışma akışkanı giriş sıcaklığı (°C)	40
Çalışma akışkanı kütledebisi (kg*s <sup>-1</sup> )	0.03
Reynolds sayısı	< 4,000

Şekil 8'de verilen ağ örgüsü yapısında 4,268,957 ağ örgüsü elemanı bulunmaktadır. Modelleme sonucunda, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO hibrit nanoakışkanının saf su yerine kullanılması ile verimde %19.41'lik bir iyileşme görülmüştür. Bu durumda sistemin gerekli enerji miktarının karşılanmasında 5 adet Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO hibrit nanoakışkanlı fotovoltaik termal panel kullanılması yeterli olacaktır. Sistem maliyetinde yaklaşık olarak 12,000 ₺ tasarruf sağlanacağı görülürken, sistemin amortisman süresi de yaklaşık 3 yıl azalarak 12 yıl olacağı hesaplanmıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerince 1 MWh elektrik üretimi başına 0.44 ton CO<sub>2</sub> sera gazı emisyonu açığa çıkmaktadır. Elektrik üretimi doğal gazlı santrallerden karşılandığında bu değer 0.376 ton CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmaktadır (ETKB, 2023). Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) tarafından önerilen işletim marjı emisyonu metodu kullanılarak, karbon salınım miktarı denklem 28 ile hesaplanmıştır (Carbontrexchange, 2023).

$$EF_{grid,0Msimple,y} = \frac{\sum_{i,y} FC_{i,y} \times NCV_{i,y} \times EF_{CO_2,i,y}}{EG_y} \quad (28)$$

Yıllık elektrik tüketimi 1,874.85 kWh olan bu dairenin elektrik ihtiyacının doğal gazlı santrallerden sağladığı düşünüldüğünde açığa çıkan yıllık CO<sub>2</sub> sera gazı miktarı 0.71 tondur.

#### 4. Tartışma ve sonuçlar

##### 4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada, Ankara ili meteorolojik şartlarında iki kişilik bir dairenin, elektrik ve ısı enerjisi ihtiyacını doğal gaza alternatif olarak güneş enerjisi uygulamaları ile (PV panel + vakum tüplü U-borulu güneş kolektörü ile PV/T panel) karşılanması incelenmiş, ekonomik ve çevresel analizi yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler şöyle özetlenebilir:

- Y Referans dairenin günlük ortalama enerji tüketimi 5.14 kWh'dir.
- Y Gerekli enerji ihtiyacının sadece PV paneller ile karşılanması durumunda 11 adet 325 W gücünde PV panel gereksinimi vardır.
- Y Sadece PV paneller ile karşılanmasında 62,870 ₺ sistem kurulum maliyeti oluşmuştur. Sistemin amortisman süresi 20 yıl olarak bulunmuştur.
- Y Gerekli enerji ihtiyacı PV paneller + vakum tüplü U-borulu güneş kolektörüyle karşılanması durumunda, sadece PV paneller ile karşılanması durumuna göre yaklaşık 5,000 ₺ tasarruf sağlanmıştır. Sistemin amortisman süresi 2 yıl azalacağı hesaplanmıştır.
- Y Gerekli enerji ihtiyacının sadece su akışkanlı PV/T paneller ile karşılanması durumunda 7 adet 300 W elektrik, 600 W termal gücünde PV/T panel gereksinimi vardır.
- Y PV/T sistemde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO hibrit nanoakışkanının saf su yerine kullanılması ile verimde %19.41'lik bir iyileşme oluşur.
- Y Gerekli enerji ihtiyacının sadece Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO hibrit nanoakışkanlı PV/T paneller ile karşılanması durumunda yaklaşık 12,000 ₺ tasarruf sağlanmıştır. Sistemin amortisman süresi 3 yıl azalacağı hesaplanmıştır.
- Y PV panel, PV panel + vakum tüplü U-borulu güneş kolektörü, su akışkanlı PV/T panel ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO hibrit nanoakışkanlı PV/T panel sistemlerinin kendi aralarında kıyaslanması sonucunda en verimli olanın Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO hibrit nanoakışkanlı PV/T panel sistemi olacağı görülmüştür.
- Y Sıvı akışkanlı PV/T panellerde çalışma akışkanı olarak nanoakışkan kullanımının transfer edilen termal enerji miktarında artış meydana getirdiği görülmüştür.
- Y Elektrik üretiminin güneş enerjisi destekli sistemler ile karşılanması durumunda yıllık 0.71 ton CO<sub>2</sub> sera gazı miktarının çevreye salınımı durmuş olacağı hesaplanmıştır.
- Y Bu çalışma sayısal bir çalışma olduğundan, çalışmanın deneysel çalışmalar ile desteklenmesi önerilmektedir.

**Semboller****Symbols**

$A_{hücre}$	PV hücre alanı	$m^2$
$A_k$	Kolektör alanı	$m^2$
$A_{PV/T}$	PV/T panel alanı	$m^2$
$c_p$	Özgül ısı kapasitesi	$kJ/kg^{*}^{\circ}C$
$EF_{grid,0Msimple,y}$	y yılındaki basit işletim marjının CO <sub>2</sub> emisyon faktörü	$tCO_2/GWh$
$EF_{CO_2,i,y}$	y yılında i yakıt cinsi için CO <sub>2</sub> emisyon faktörü	$tCO_2/GJ$
$EG_y$	y yılındaki sisteme hizmet veren tüm enerji kaynaklarının üretilen ve şebekeye ulaştırılan net elektrik	$W$
$FC_{i,y}$	y yılında sistemde tüketilen fosil yakıt cinsi i miktarı	
$G$	Güneş radyasyonu	$W/m^2$
$h_{kv}$	Konveksiyonla ısı kaybı katsayısı	$W/m^2^{*}^{\circ}C$
$h_{rad}$	Radyasyonla ısı kaybı katsayısı	$W/m^2^{*}^{\circ}C$
$I_{mp}$	Maksimum güç akımı	$A$
$I_{sc}$	Kısa devre akımı	$A$
$k$	Isı iletim katsayısı	$W/m^{*}^{\circ}C$
$\dot{m}$	Kütlesel debi	$kg/s$
$NCV_{i,y}$	y yılında fosil yakıt türü i'nin net ısıl değeri	
$\dot{Q}_f$	Faydalı ısı miktarı	$kW$
$\dot{Q}_K$	Kolektörden kaybolan ısı miktarı	$kW$
$T_{atm}$	Atmosfer (gökyüzü) sıcaklığı	$^{\circ}C$
$T_{hücre}$	PV hücre sıcaklığı	$^{\circ}C$
$T_k$	Kolektör sıcaklığı	$^{\circ}C$
$T_o$	Ortam sıcaklığı	$^{\circ}C$
$T_g$	Giriş sıcaklığı	$^{\circ}C$
$T_{ç}$	Çıkış sıcaklığı	$^{\circ}C$
$v_R$	Rüzgar hızı	$m/s$
$V_{mp}$	Maksimum güç voltajı	$V$
$V_{oc}$	Açık devre voltajı	$V$
$\Delta P$	Basınç düşüşü	$Pa$
$\epsilon_{hücre}$	PV panel yayıcılık katsayısı	
$\sigma$	Stefan-Boltzmann sabiti	$W/m^2^{*}K^4$
$\rho$	Yoğunluk	$kg/m^3$
$\mu$	Dinamik viskozite	$Pa*s$
$(\tau\alpha)_{ef}$	Etkin geçirgenlik soğurma katsayısı	
$\aleph$	Gösterge sıcaklığı	$^{\circ}C$
$\emptyset$	Parçacık hacim konsantrasyonu	$\%$
$\eta_K$	Kolektör enerji verimi	$\%$
$\eta_{PV}$	PV verim	$\%$
$\eta_{PV/T, tr}$	PV/T termal verim	$\%$
$\eta_{PVT, el}$	PV/T elektriksel verim	$\%$
$\eta_P$	Pompa verimi	$\%$

**Yazar katkısı****Author contribution**

Yayının tüm süreçleri yazar tarafından %100 gerçekleştirilmiştir.

**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*

- Albadry, S., Tarabieh, K., & Sewilam, H. (2017). Achieving net zero-energy buildings through retrofitting existing residential buildings using PV panels. *Energy Procedia*, 115, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.018>
- Alkan, S., Öztürk, A., Zavrak, S., Tosun, S., & Avcı, E. (2014). Bir evin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayacak fotovoltaiik sistemin kurulumu. *ELECO 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu* (pp. 78-82), Bursa: ELECO.
- ANSYS, Inc. (2016) *ANSYS Fluent User's Guide*, Release 17.2.
- Alternative Energy Tutorials: Evacuated Tube Collector (2022, November 21). <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html>
- Ateş, A.M. (2023). 3-Years energetic and economic analysis of a 30kWp rooftop PV power plant. *Engineer and Machinery*, 64(710), 175-194. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1072368>
- Bahar, E.M., & Ökten, M. (2021). Türkiye'nin bölümlerinin PVSYST programı ile analizi. *Yeni Türkiye Dergisi*, 118, 362-372.
- Bakır, H. (2022). Thermal image analysis for fault detection of PV systems in Ankara/Turkey. *European Journal of Science and Technology*, Special Issue 36, 41-44. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1098973>
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Prassas, A., & Antonopoulos, K.A. (2015). Modelling of a solar assisted floor heating system with TRNSYS. *Global Conference on Global Warming (GCGW 2015)*, Athens.
- Bhuvad, S.S., & Udayraj. (2022). Investigation of annual performance of a building shaded by rooftop PV panels in different climate zones of India. *Renewable Energy*, 189, 1337-1357. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.004>
- Boyle, G. (2004). *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Carbontradexchange. (2023, January 12). <http://www.carbontradexchange.com/knowledgecentre/case-studies.html>
- Demirbilek, N., Kaya, M., & Yakuphanoglu, F. (2023). Investigation of structural and optical properties of pure ZnO and co-doped ZnO:Al:Mnx (x=1%, 2%, 3%, 5% at.) semiconductor thin films and electrical properties of produced diodes. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 163 – 174. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1001776>
- Deymi-Dashtebayaz, M., Nikitin, A., Norani, M., Nikitina, V., Hekmatshoar, M., & Shein, V. (2022). Comparison of two hybrid renewable energy systems for a residential building based on sustainability assessment and emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134592. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134592>
- Energy Information Administration (EIA)- Photovoltaics and electricity (2022, November 20). <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı- Güneş enerjisi potansiyeli atlası (2022, November 22). <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/6.aspx>
- Enerji Piyasası Denetleme Kurulu (EPDK)- Elektrik birim fiyatı (2022, November 22). [www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-1/tarifeler](http://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-1/tarifeler)
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı- Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri (2023, January 1). <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri>
- Er, Z. (2023). Solar radiation forecasts and a tiny house PV off-grid system. *European Journal of Science and Technology*, 47, 7-12. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1234216>
- Gu, Y., Zhang, X., Myhren, J.A., Han, M., Chen, X., & Yuan, Y. (2018). Techno-economic analysis of a solar photovoltaic/thermal concentrator for building application in Sweden using Monte Carlo method. *Energy Conversion and Management*, 165, 8-24. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.043>

- Gürbüz, E. Y., Variyenli, H., Sözen, A., Khanlari, A., & Ökten, M. (2021). Experimental and numerical analysis on using CuO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water hybrid nanofluid in a U-type tubular heat exchanger. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 31(1), 519-540. <https://doi.org/10.1108/HFF-04-2020-0195>
- Hottel, H.C., & Woertz, B.B., (1942). Performance of flat-plate solar -heat collectors. *Trans ASME*, 64(91).
- Jafarkazemi, F., & Ahmadifard, E. (2013). Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 56, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.031>
- Kalogirou, S.A., Karellas, S., Braimakis, K., Stanciu, C., & Badescu, V. (2016). Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. *Progressive Energy Combustion Science*, 56, 106-137. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2016.05.002>
- Kaya, H., Alkasem, M., & Arslan, K. (2020). Effect of nanoparticle shape of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pure Water nanofluid on evacuated U-Tube solar collector efficiency, *Renewable Energy*, 162, 267-284. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.039>
- Khanlari, A., Tuncer, A.D., Afshari, F., & Sözen, G. (2023). Utilization of recyclable aluminum cans as fins in a vertical solar air heating system: An experimental and numerical study. *Journal of Building Engineering*, 63(A), 105446. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105446>
- Kiran Naik, B., & Muthukumar, P. (2019). Performance assessment of evacuated U-tube solar collector: A numerical study. *Sādhanā*, 44(23), <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0974-z>
- Kim, H., Kim, J., & Cho, H. (2017). Experimental study on performance improvement of U-tube solar collector depending on nanoparticle size and concentration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *Energy*, 118, 1304-1312. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.009>
- Krarti, M. (2021). Impact of PV integrated rotating overhangs for US residential buildings. *Renewable Energy*, 174, 835-849. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.113>
- Li, Y., Liang, X., Song, W., Li, T., Wang, D., & Liu, Y. (2022). Optimization and thermal performance of U-type evacuated tube solar collector filled with phase change material. *Energy Reports*, 8, 6126-6138. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.054>
- Lim, C.S.L., & Sobhansarbandi, S. (2022). CFD modeling of an evacuated U-tube solar collector integrated with a novel heat transfer fluid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(A), 102051. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102051>
- Lupu, A.G., Homutescu, V.M., Balanescu, D.T., & Popescu, A. (2018). Efficiency of solar collectors – a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 444, 082015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/444/8/082015>
- Mercan, M., & Yurddaş, A. (2019). Numerical analysis of evacuated tube solar collectors using nanofluids. *Solar Energy*, 191, 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.074>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2022, November 22). <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=ANKARA>
- Mohammed, A., Ghaithan, A., Al-Hanbali, A., Attia, A.M., Saleh, H., & Alsawafy, O. (2022). Performance evaluation and feasibility analysis of 10 kWp PV system for residential buildings in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101920. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101920>
- Moran, M.J., & Shapiro, H.N. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (5th. Ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons
- Morena, D., Fernandez, M., & Esquivias, P.M. (2017). A comparison of closed-form and finite-element solutions for heat transfer in a nearly horizontal, unglazed flat plate PVT water collector: Performance assessment. *Solar Energy*, 141, 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.015>
- Mor Fikirler- Çatılara güneş paneli kurma maliyeti (2022, Kasım 22). <https://morfikirler.com/catilara-gunes-paneli-kurmak-maliyeti/>

- O'Neil, J.E.T., & Sobhansarbandi, S. (2022). Thermal performance investigation of energy storage based U-pipe evacuated tube solar collector: An experimental study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102146. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102146>
- Ökten, K. (2022). PV panel ile bütünleştirilmiş FDM-Nanopartikül karışımının 1-D matematiksel model kullanılarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi PART C: Tasarım ve Teknoloji*, 10(3), 532-546. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1068074>
- Ökten, M. (2021). An investigation on provincial production & consumption of electric energy: A case analysis for Ankara. *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 4(1), 59-68. <https://doi.org/10.34088/kojose.800608>
- Özakın, A.N., & Kaya, F. (2019). Effect on the exergy of the PVT system of fins added to an air-cooled channel: A study on temperature and air velocity with ANSYS Fluent. *Solar Energy*, 184, 561-569. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.100>
- Özsoy, A., & Galip, M. (2018). Vakum tüplü U-borulu güneş kolektörünün güneş simülatöründeki test sonuçlarının analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 229-236. <https://doi.org/10.2339/politeknik.385469>
- Podder, B., Das, S., & Biswas, A. (2022). Numerical analysis of a small sized water based solar photovoltaic-thermal collector. *International Journal of Green Energy*. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.2023881>
- Rahaman, M.H., & Iqbal, M.T. (2019). A comparison of solar photovoltaic and solar thermal collector for residential water heating and space heating system. *Preprints*, <https://doi.org/10.20944/preprints201910.0003.v1>
- Ramos, C.A.F., Alcaso, A.N., & Cardoso, A.J.M. (2019). Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 354, 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/354/1/012048>
- Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., & Behzadmehr, A. (2010). Exergetic performance evaluation of a solar photovoltaic (PV) array. *Australian Journal Basic & Applied Science*, 4, 502-519. <https://doi.org/10.1155/2009/313561>
- Sim, M., & Suh, D. (2021). A heuristic solution and multi-objective optimization model for life-cycle cost analysis of solar PV/GSHP system: A case study of campus residential building in Korea. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101490. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101490>
- Solimpeks- Güneş panelleri çeşitleri (2022, November 11). <http://solimpeksgunespaneli.com/gunespaneli-fotovoltaike-cesitleri-nelerdir/>
- Strebkov, D.S., & Filippchenkova, N.S. (2021). Results of CFD-simulation of a solar photovoltaic-thermal module. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 659, 012113. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012113>
- Swese, E.O.E., & Haçerlioğulları A. (2022). Investigation of performance on photovoltaic/thermal (PV/T) system using magnetic nanofluids. *Politeknik Dergisi*, 25(1), 411-416. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1076781>
- Şen, E., & Çeliktaş, M.S. (2022). A review of PV cooling and thermal energy storage in PV/T systems based phase change materials. *Beykent University Journal of Science and Engineering*, 15(1), 55-76. <https://doi.org/10.20854/bujse.1071145>
- Tarragona, J., Pisello, A.L., Fernandez, C., Cabeza, L.F., Paya, J., Marchante-Avellaneda, J., & de Garcia, A. (2022). Analysis of thermal energy storage tanks and PV panels combinations in different buildings controlled through model predictive control. *Energy*, 239, 122201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122201>
- Tavares, I., Manfredini, R., Almeida, J., Soares, J., Ramos, S., Foroozandeh, Z., & Vale, Z. (2022). Comparison of PV power generation forecasting in a residential building using ANN and DNN. *IFAC-PapersOnLine*, 55(9), 291-296. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.051>
- Teo, H.G., Lee, P.S., & Hawlader, M.N.A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90, 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017>
- Tuncer, A.D., Khanlari, A., Afshari, F., Sözen, A., Çiftçi, E., Kusun, B., & Şahinkesen, İ. (2023). Experimental and numerical analysis of a grooved hybrid photovoltaic-thermal solar drying system. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119288. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119288>

- 
- Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası- Enflasyon hesaplayıcı (2022, Kasım 22).  
<https://herkesicin.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/ekonomi/hie/icerik/enflasyon+hesaplayici>
- Wang, R.Z., Xu, Z.Y., & Ge, T.S. (2016). Introduction to solar heating and cooling systems. *Advances in Solar Heating and Cooling*, 3-12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100301-5.00001-1>
- Wole-Osho, I., Adun, H., Adedeji, M., Okonkwo, E.C., Kavaz, D., & Dağbaşı, M. (2020). Effect of hybrid nanofluids mixture ratio on the performance of a photovoltaic thermal collector. *International Journey of Energy Research*, 1-18, <https://doi.org/10.1002/er.5619>.

## Edge ai technology in the defense industry via reinforcement learning in simulation environments

*Simülasyon ortamlarında pekiştirmeli öğrenme yoluyla savunma sanayinde uç yapay zeka teknolojisi*

Arif Furkan MENDİ \*<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> Havelsan, 6510, Ankara

<sup>2</sup>Ostim Technical University, Computer Engineering Department, 06374, Ankara

• Received: 15.03.2023

• Accepted: 19.06.2023

### Abstract

Edge artificial intelligence (Edge AI) technology helps to avoid vulnerabilities while benefiting from the advantages of cloud technologies, which are widely used today, especially with artificial intelligence and big data. In the case of transferring systems to the cloud, and needs such as protection of sensitive information and high bandwidth emerges in cloud approaches. Edge AI, which provides solutions to issues such as the security of sensitive data and reducing system traffic, while meeting the needs in this field, can offer a new perspective, especially to projects in the military field, when used with digital twin and autonomous system technologies. In this study, we evaluated the “Forces in virtual environment machine learning (FIVE-ML)” simulation system technically in which we use edge AI technology, analyzed the results obtained with the use of this technology. It has been determined that the current work is at the 2nd level in Edge AI levelling system, also there is a 54% performance (in terms of time with accuracy) increase with edge AI. Besides, the accuracy of hitting the target in simulation system is also increased, with the rate of 34%.

**Keywords:** Aerospace simulation, Artificial intelligence, Digital twin, Edge ai, Edge computing

### Öz

Edge AI teknolojisi, günümüzde özellikle yapay zekâ ve büyük veri ile yaygın olarak kullanılan bulut teknolojilerinin avantajlarından yararlanırken güvenlik açıklarının önlenmesine de yardımcı olmaktadır. Sistemlerin buluta taşınması durumunda, hassas bilgilerin korunması ve yüksek bant genişliği gibi ihtiyaçlar ortaya çıkmaktadır. Bu alandaki ihtiyaçları karşılarken hassas verilerin güvenliği ve sistem trafiğinin azaltılması gibi konulara çözüm sunan Edge AI, dijital ikiz ve otonom sistem ile birlikte kullanıldığında özellikle askeri alandaki projelere yeni bir bakış açısı sunabilmektedir. Bu çalışmada edge AI teknolojisini simülasyon sistemlerinde kullanımı teknik olarak ele aldık. Bu teknolojinin kullanımı ile elde edilen sonuçları analiz ettik. Edge AI seviyelendirme sisteminde mevcut çalışmanın 2. seviyede olduğu tespit edilmiş, Edge AI kullanımı sayesinde %54 performans artışı elde edilmiştir. Ayrıca simülasyon sisteminde hedefi vurma isabet oranı da %34 oranında artırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Havacılık simülasyonu, Yapay zekâ, Dijital ikiz, Uç yapay zeka, Uç hesaplama

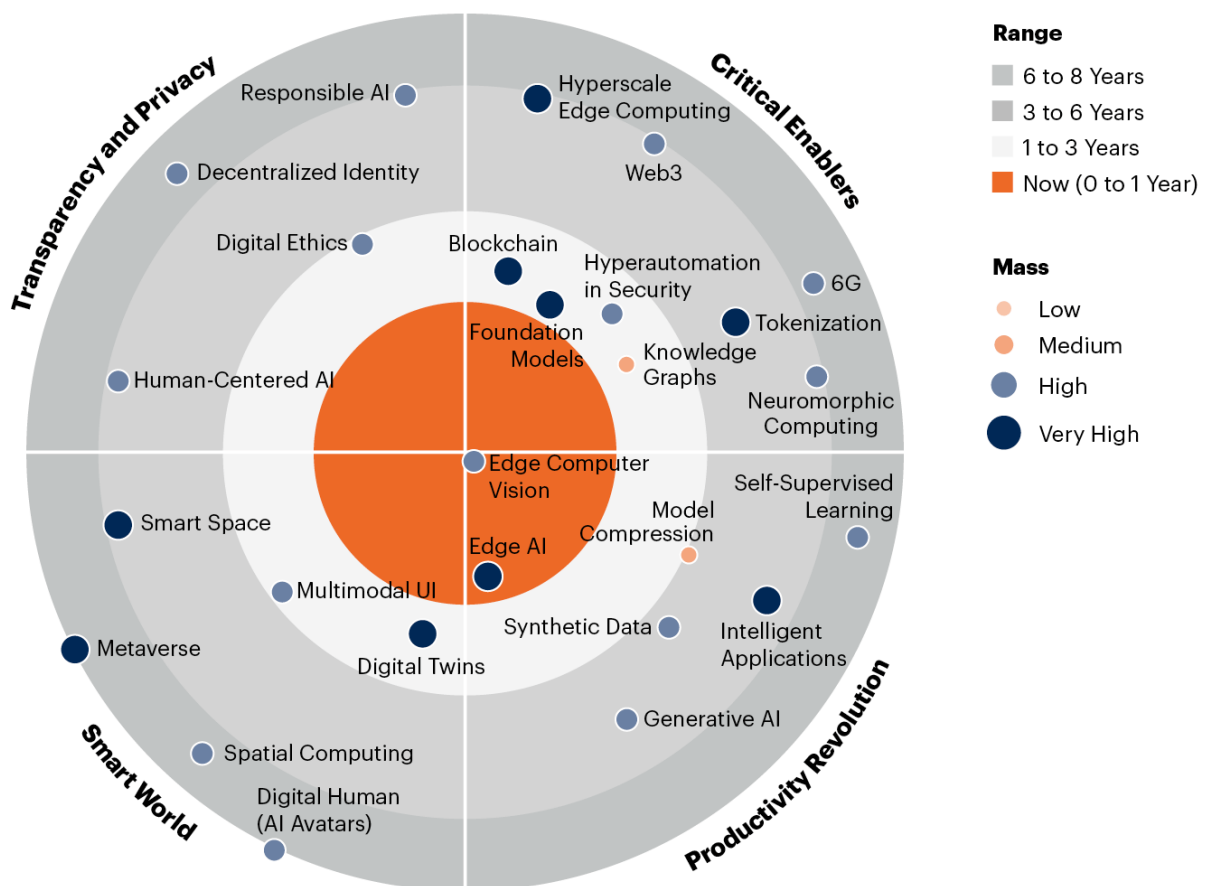
\* Arif Furkan MENDİ; afmendi@havelsan.com.tr,



## 1. Introduction

With the use of new trends of industry 4.0, digital twins, autonomous systems, smart IoT devices, developing artificial intelligence approaches; the management, use, and processing of large amounts of data in real-time or in scalable times are carried out using big data, distributed systems, and cloud computing technologies (Ahmed et al., 2017). Although the management, maintenance, and consistency of data and systems become easier with the use of cloud computing and cloud services in many areas, the increase in transaction density and the storage of critical information in the cloud poses a dangerous situation in various areas. There is an important problem such as ensuring the high level of confidentiality of military systems and system information. Even when institutions create their own cloud systems, it is not simple to maintain security, confidentiality, and data consistency stored in the cloud, and the use of such distributed and cloud systems is preferred in military areas either in mandatory situations or whenever possible because it creates an extra workload for institutions and countries (Anciaux et al., 2019; Dursun & Çuhasdar, 2018). There is a tendency not to be preferred. However, both edge computing and edge AI technologies are emerging technologies that take the use of cloud technologies to a different dimension, especially in terms of time and. Considering the digital twin, autonomous systems, and smart IoT devices that are widely used today and will see more widespread use in the future, their use is expected to increase with edge technologies as the cloud inference paradigm becomes less appropriate as the demand for real-time predictions rise.

According to Gartner, evolving hardware, innovative software techniques, and evolving micro-AI technologies are accelerating the adoption of edge AI that performs more and more transactions from the cloud to the edge, being at the center of the "2023 Emerging Tech Impact Radar: Artificial Intelligence" the most effective in the past few years (Figure 1). It has been emphasized that it is and will be one of the artificial intelligence technologies (T. Nguyen, 2023).



**Figure 1.** Gartner 2023 Artificial intelligence emerging technologies impact radar (T. Nguyen, 2023)

According to the Global edge AI Software Market Growth research, it is stated that the market of edge AI software is anticipated to increase from \$346.5 million alone to around \$1.1 billion by 2024, and that the edge AI hardware and the consulting market will also expand at the similar rate (360 Research Reports, 2019). In addition, Grand View Research, predicts that the entire global market of edge computing will expand each year and reach a value of \$43.4 billion by 2027 (Grand View Research, 2021). As can be seen from the evaluations and the increasing number of applications, edge AI is taking firm steps forward to be among the common new generation technologies.

HAVELSAN, which is a global leading system integrator firm with advanced technology-based software-intensive original solutions and products in the domains of defense, security, and informatics, produces high-quality D level simulators at world standards, produces high quality flight simulators and training complements for both civil and military aviation, decision support and systems for war games in many fields. With the Forces in Virtual Environment (FIVE), one of the simulators developed by HAVELSAN, the behaviors of virtual platforms for land, air, and sea, which can perform defense and offensive objectives needed for tactical training of simulators of combat platforms, could be modelled and so the required tactical scenarios for simulators can be provided. The FIVE-ML structure has been revealed as a result of the studies on making this autonomous rule-based software built on artificial intelligence learning. Developed to make improvements in the rule-based structure and alleviate some workloads in the system, this system has been developed to work closely with field experts, improve standard and predictable performance, etc. offers advantages with its innovative artificial intelligence infrastructure. In this study, the use of reinforcement learning was preferred, which helps to train multiple actors with a reward-punishment system. Reinforcement learning examines behaviors that create the highest worth of long-term return from the environment (N. D. Nguyen et al., 2017). One of the parts of such an innovative project is the implementation of the edge AI approach. Thanks to the edge AI approach applied, it is aimed to make significant progress by facilitating the management of data.

In this study, after discussing the concepts of edge and edge AI, we will examine the advantages of technology and then the use cases, especially FIVE-ML simulation system developed by HAVELSAN. After that, we will discuss the possible opportunities that can be used in the defense industry and the use of digital twin and edge AI technologies together. We will also present the works planned to be done in the near future and our predictions.

The novelty and contributions of this proposed study are:

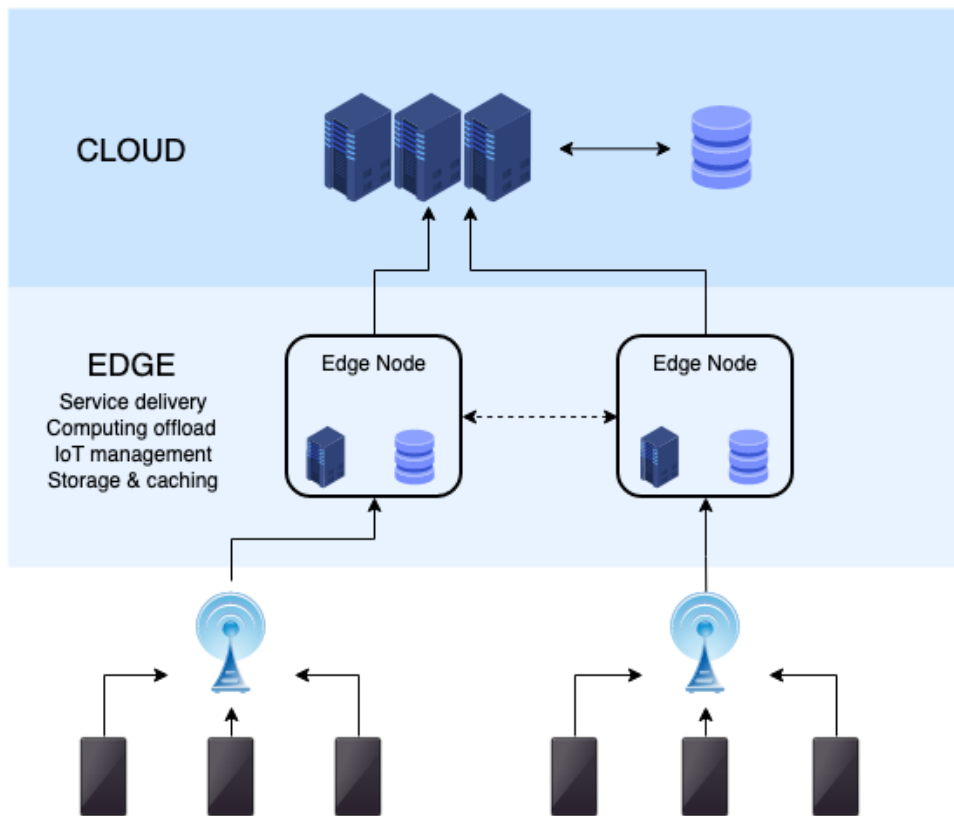
- Edge AI technology has been shown to be usable in military projects, taking it from basic to level 2 (in edge co-inference).
- 54% performance increase with the use of edge AI technology.
- The accuracy of hitting the target in simulation system is also increased, with the rate of 34%.
- Edge AI technology and reinforcement learning technique give beneficial results together.

## 2. Definitions and conceptual basics

In this section, the brief definitions of the technologies that are the basis of the study and that are planned to be used together will be explained.

### 2.1. Edge computing

In order to decrease the response times and preserve bandwidth, edge computing is defined as a distributed computer paradigm that moves computing and data storage closer to the location where they are needed. Although it may seem contradictory when compared to the cloud systems that are widely used today, the advantages of edge computing could be gathered by using edge and cloud computing together. In edge computing, systems run on local devices, meaning the entire system is not on the cloud (Figure 2). These edge devices can be servers as well as IoT devices. It is seen that especially sensor technologies take place more frequently in our agenda with the developments in robotic technology (Wang et al., 2018). These edge devices transfer data to the cloud to make some special calculations in the cloud when necessary. In other words, some, if not all, of the data and processing load is moved to the cloud.



**Figure 2.** Edge computing infrastructure (Watkinson et al., 2021)

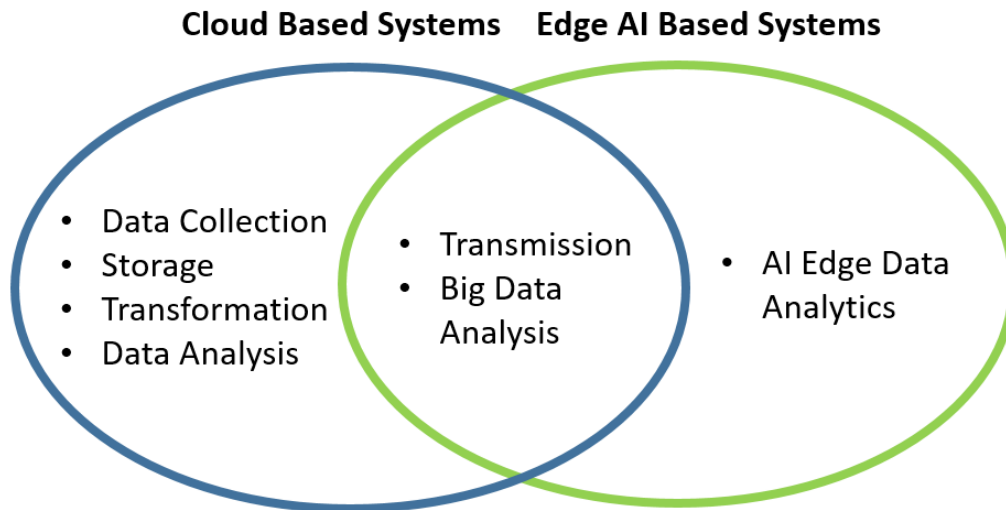
## 2.2. Artificial intelligence (AI)

Artificial intelligence mentions to the simulation of human intelligence in devices that have been designed to think and act like humans. The notion can also be used to refer to any machine that demonstrates aspects of the human mind, including learning and problem solving.

## 2.3. Edge artificial intelligence (edge AI)

Data is one of the most important elements for artificial intelligence and big data analysis. In the literature, we see that there are various concepts such as the management of data within channels (Navrat et al., 2004) (Lechtenböcker & Vossen, 2003). With the right data management and the use of emerging technologies successful results are expected to be achieved (Hung et al., 2019). The accuracy and security of the data are key to making the analyzes and simulations accurate and healthy (Van Den Bussche et al., 2005; Senderovich et al., 2019; Karaarslan, 2019).

One of the most remarkable emerging fields in artificial intelligence is called edge AI. In particular, it aims to allow AI processes to run by removing concerns about privacy or slowdown due to data transmission. Edge AI offers an AI approach that allows smart devices to quickly react to inputs that do not have access to the cloud. Most next-generation AI processes are performed in the cloud as they require large amounts of computing power. But there is the problem that these processes are sensitive to downtime. Edge AI systems can process data locally before sending it when an internet connection is established since the systems are running on an edge computing device. This decreases the data processing time. For example, with the use of edge AI, deep learning algorithms can run on the actual device, on the edge where it is located, in case of disconnection from the internet or cloud. Additionally, by limiting data transfer to only the most vital information, the volume of data held in the cloud can be reduced and communication interruptions minimized. Steps followed in a traditional cloud-based data collection and analysis system and edge AI-based systems are expressed in Figure 3. Using edge AI, data analysis can be accelerated as the edge nodes are closer to the data source, reducing backhaul data bandwidth requirements by up to 400x and lowering latency (Nvidia, 2021).



**Figure 3.** Cloud-based systems and edge ai-based systems comparison

At the bottom of the “Levels of Edge Intelligence” pyramid, we see that there is "cloud intelligence". Here, the infrastructure for training and interface is created. At level-1, the "cloud-edge co-inference" level comes. At this level, only the basic interfaces are covered at the edge. After level-2, we see that the rate of transactions made at the edge is increasing. When we come to level 6, all the operations are performed on the end device (Figure 7).

#### 2.4. Digital twin

The technology called digital twin has a promising future in many disciplines and continues to carry out many studies and research activities, is expressed as a digitally modelled copy of an object/system that exists physically in the earth (Bernard Marr, 2017). With the use of technologies such as sensors and IoT, data/information flow from physical assets to digital assets is provided. In this way, the processes operated on the physical assets are monitored remotely, while at the same time, future predictions can be made with the artificial intelligence infrastructure used.

### 3. Advantages of the edge ai technology

Edge AI technology offers many advantages in controlling data and optimizing systems. Some prominent advantages are listed below.

- Ability to produce real-time analytics and analyze streaming data
- Security
- Bandwidth savings
- Enables automation
- Reduces costs

Below parts, this advantages will be discussed in detailed way.

#### 3.1. Ability to produce real-time analytics and analyze streaming data

In a fraction of a second, analysis can be finalized. For instance, in the case of self-driving cars, even a one-second delay in brake applying can result in a fatal collision.

#### 3.2. Security

Edge usually runs on a private network, which makes it harder to steal information. Fewer cloud-based data means fewer attack opportunities online, helping to improve security. Also, crashing a network of multiple devices is more difficult than crashing a single central cloud system. In general, it can be said that everything

with a security element should be done using the edge approach. In addition, not being able to access the existing data system in any way without access to the internet connection can also create a security weakness. For example, in autonomous vehicles, it is not desirable to take risks when making a decision when the internet connection is weak, so it is an important technology to be used especially for autonomous vehicles.

### **3.3. Bandwidth savings**

Edge technology could help in saving bandwidth, reducing the requirement for data transfer. Therefore, the devices become more energy-efficient as a result.

### **3.4. Enables automation**

In a self-driving car, for example, there are countless different types of sensors that continuously measure the speed of rotation of the tire and the vehicle position. Based on the gathered information from the sensors, the driving computer can automatically decide how to steer, brake and use the throttle.

### **3.5. Reduces costs**

Large-scale data processing and analysis in the cloud is considered as expensive. When analysing fixed data streams or large amounts of historical data, a lot of capacity has to be purchased from a cloud service, likewise GPU computing, whether a truly quick response is necessary. Sometimes this becomes so expensive that it disrupts business state calculations and can break the system. Although edge AI requires native computing power and good hardware, it still often offers the most cost-effective solution. When examined technically, the decrease in required bandwidth also results in a decrease in the costs of contracted internet service which contributes to cost savings (Paajanen, 2020).

## **4. Edge ai use cases**

Although edge AI is a new field according to many technologies, there are studies in various fields because it appeals to many fields. Many topics cover use cases for edge AI where processing data can be established more efficiently on a local device than via the cloud. Yet, a few examples of typical use cases for edge AI are autonomous vehicles and drones, facial recognition systems, and digital assistants.

Autonomous vehicles are one of the most suitable use cases for edge AI privacy (Yilmaz, 2022). Autonomous vehicles must constantly scan the surrounding environment and assess the situation, adjusting to its trajectory based on nearby events. Processing data in real-time is essential for these situations, and as a result, embedded edge AI systems are responsible for data storage, processing, and analysis. Edge AI systems are essential to bringing tier 3 and 4 (fully autonomous) vehicles to market.

Since autonomous drones are not controlled by human operators; for autonomous vehicles, the requirements are remarkably similar. A drone's loss of control or malfunction during flight could result in a crash and the destruction of lives and property. Drones, on the other hand, can fly very far because they cannot be controlled from within the range of an internet access point, so they must be capable of edge AI. It is predicted that edge AI technology will be essential for providing services such as Amazon Prime Air that aim to deliver packages by drone.

The use of edge AI in facial recognition systems is another instance. Computer vision algorithms are used in facial recognition systems to examine data that are gathered by the camera. Apps for facial recognition that are used for purposes like security must function consistently even when they are not connected to the cloud.

Another typical application for edge AI is digital assistants (Arisoy et al., 2016). Smartphones and other digital devices should be able to use digital assistants like Google Assistant, Alexa, and Siri even when they are not online. When data is processed locally, there is no need to transfer it to the cloud, reducing traffic and preserving privacy.

The number of connected devices collecting data is constantly increasing in modern life. This requires more storage and computational capacity to be brought to the edge and more use of artificial intelligence. Eurotech

combines embedded and edge computers, computing power, and IoT components to enable edge AI. By bringing this high-performance computing capability to the edge, Eurotech enables AI applications directly on field devices. They can autonomously process data and perform machine learning (ML) in the field and apply deep learning models and algorithms for advanced autonomous applications such as autonomous driving. Machine learning is a trustworthy method of looking through a large dataset for undiscovered patterns (Koohestani et al., 2019).

In addition to these, expectations from devices on Edge are increasing. The amount and quality of data are increasing exponentially, and for some applications the need to process them autonomously becomes imperative. An example of an edge AI application is the autonomous driving task, which relies on terabytes of data from HD cameras, Radar, Lidar, and other high-speed sensors that need to be processed in short periods. The capability of deep learning algorithms to perform edge training and inference directly on the vehicle is a must-have for such applications in automotive and industrial environments (Eurotech, 2021).

Today, most of the autonomous vehicles, which have become very common especially in the defense industry, need to process exceeding 50 GB of data per minute in real-time to evaluate driving decisions, and it is usually not enough to transfer all of this data to another server due to its bandwidth capacity. This is particularly a problem in herd intelligence systems. In addition, it creates a technical bottleneck problem in the management of a large number of autonomous vehicles, where the decision mechanism is made from a single-center, or in the creation of digital twins of these vehicles. For this reason, the use of edge AI technology is very appropriate in systems that both allow the use of the cloud structure by reducing the burdens and need to increase the processing capacity at the edges. Looking at ML-based autonomous system applications made from edges, Liang et al. have used reinforcement learning to learn the vehicle networks dynamics to manage network resources.

An internet of vehicles (IoV) system called DeepCrash uses deep learning to detect and report collision events so that urgent notifications could be sent. It indicates a 96% accuracy rate for collision detection and an emergency notification delay of almost 7 seconds (Chang et al., 2019).

Considering a Tesla for its relationship to the cloud as a simple edge computing use case, situational awareness is all that many of the car's sensors and cameras are capable if they can react in near real-time to what they see (other vehicles, trees, traffic). There is no time, delay, or bandwidth to transfer data back to a main public cloud data center. The cloud should be moved aside instead. Therefore, Tesla is not only the latest model of vehicle but also an edge computing node. Tesla's use of this edge AI technology to create and deploy the edge node is just the beginning and more extensive work is expected (Orrin & Chehreh, 2020).

Real-time decision making is necessary for edge AI applications and industrial automation. Hence, in order to be able to respond to urgent problems right away, data analytics must be established on the edge. With the "Everyware Software Framework (ESF)", Eurotech makes edge analytics and data management in field-deployed IoT gateways and computers easier. With the help of the IoT edge architecture, assets may be digitally twinned and managed for sophisticated analytics and data management in a user-friendly and straightforward environment (Tao et al., 2018).

Both hardware and software environments are offered by MediaTek to optimize edge AI performance. Special APU (AI Processing Unit) is created to be more power efficient. With the APU, energy usage can be reduced by up to 95% compared to CPU operation. Second, the task scheduling between CPU, GPU and APU is managed by the heterogeneous runtime in the NeuroPilot software development kit (SDK). It also supports current cutting-edge AI frameworks including NeuroPilot, NNabla and MXNet. Also it supports important design tools like Tensorflow, Caffe that are trained using like these frameworks. Toolchains with model translators in NeuroPilot, programmers can initiate AI implementation on devices (Figure 4). Finally, it offers SDK and libraries to quickly connect PC-based prototyping to edge AI high performance (Lee et al., 2018).

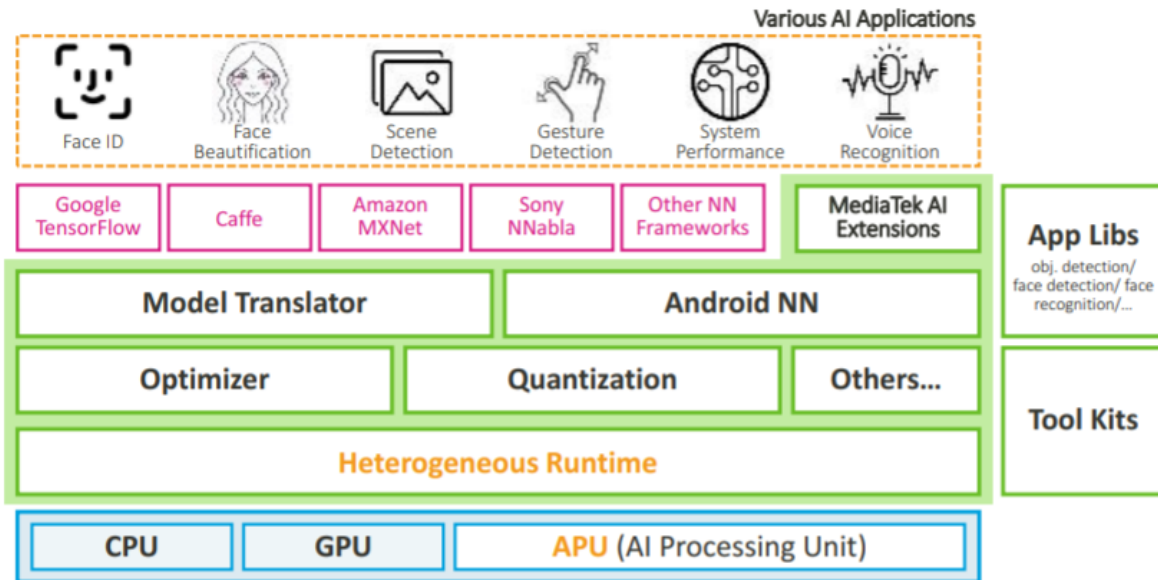


Figure 4. MediaTek neuropilot framework (Lee et al., 2018)

Xilinx has done extensive work over the past 3 years to create a complete end-to-end flow that permits software, hardware developers, and data scientists to utilize the current machine learning ecosystem. According to this approach, they have designed tools, including Caffe and TensorFlow, that enable customers to directly parse the trained weights and model graphs saved from well-known machine learning frameworks. Developed pruning, quantification tools, compiler, run-time, and productive programmable Internet Protocol (IP) that allow networks to be deployed on a variety of platforms, however at the edge, or well-known cloud and server architectures (Figure 5).

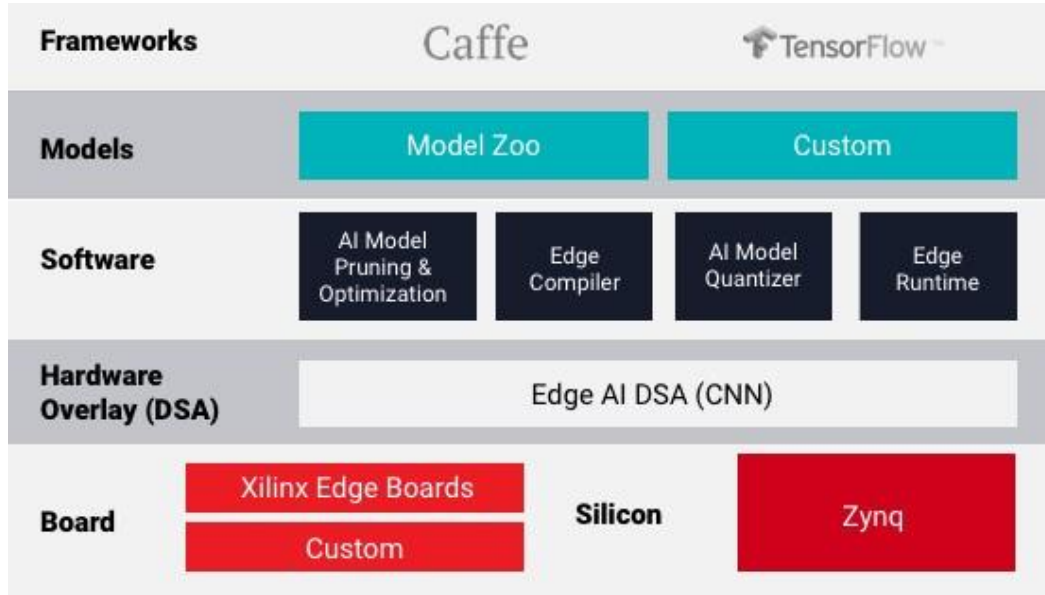


Figure 5. Xilinx edge ai framework structure (Xilinx, 2021)

### 5. Edge ai in the defense industry

It is expected that the use of edge AI technology in the defense industry will become widespread, especially with the security advantages it provides and increasing system efficiency. As an exemplary edge AI application area in the aviation field, in swarm intelligence systems, it may be possible for each player to make their own decisions regarding their flight planning, but also to give the maneuvers to be made according to the strategies they will follow as a swarm. This could be ensured by the machine learning mechanism on the cloud, and in this case edge, AI will be an intermediate step that can be used to switch to.

We realized one of the best examples of the use of edge AI technology in the defense industry with the FIVE-ML simulation system of HAVELSAN. HAVELSAN, which creates high-quality D-level simulators at global standards, produces high-quality flight simulators, training complements, decision support and systems for war games in many fields for both civil and military aviation. With the Forces in Virtual Environment (FIVE), one of the simulators created by HAVELSAN, the behaviors of virtual land, air, and sea platforms, which can establish defense and offensive objectives needed for tactical training of simulators of combat platforms, can be modelled and therefore, the required tactical environments for simulators can be provided. The FIVE-ML structure has been revealed as a result of the studies on making this autonomous rule-based software based on learning artificial intelligence. Developed to make improvements in the rule-based structure and alleviate some workloads in the system, this system has been developed to work closely with field experts, improve standard and predictable performance, etc. offers advantages with its innovative artificial intelligence infrastructure. In this study, the use of reinforcement learning was preferred, which helps to train multiple actors with a reward-punishment system.

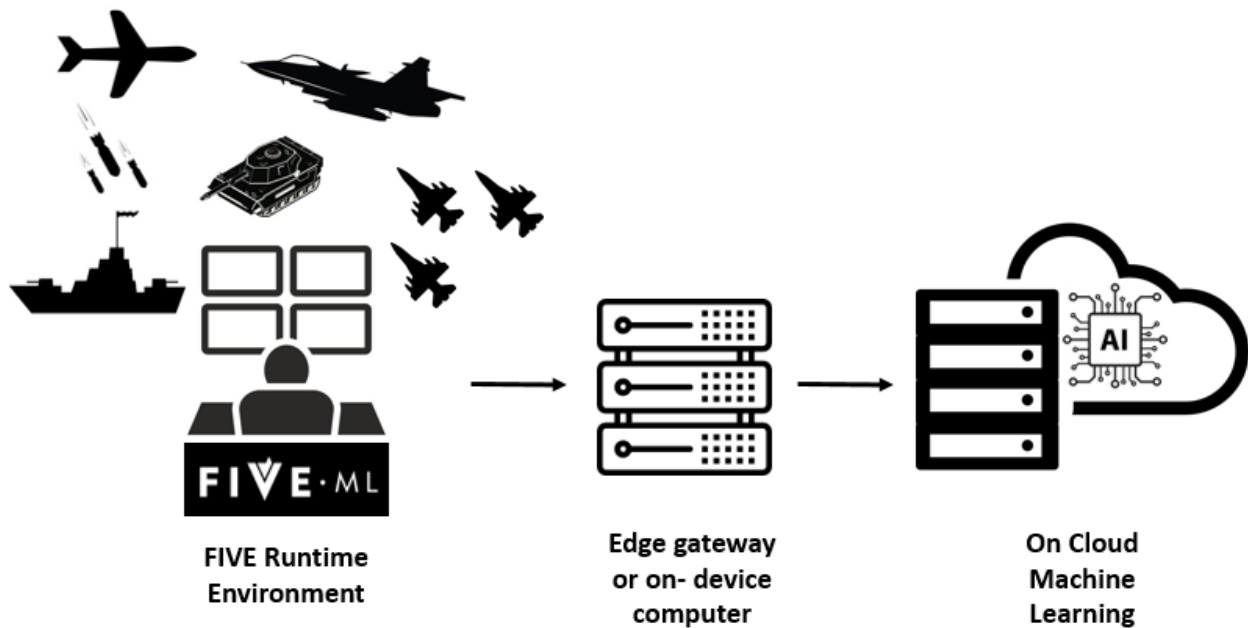
Learning what to do and how to match situations with actions to maximize a digital reward signal is called reinforcement learning. To find out, the agent is not informed about the course of action but is rather asked to identify actions that are the most rewarding. In this discovery process, almost every possibility is tried and the most appropriate behavior is learned. But there is a very long and heavy processing load with too many parameters in it. For example, we train a model with reinforcement learning on a simulation or the behavior of a device. When we think that we are training this model in the cloud, there is a case of moving a lot of data to the cloud from devices during the training of the model. In this case, the bandwidth problem arises. In addition, as a result of printing all data to the cloud, information security vulnerability may occur in military simulations. Generally, the principle of not removing military data from the working environment is followed. For this reason, it is preferred not to be presented to the cloud environment, which is an environment open to many attacks. However, in the case of using the cloud, it is necessary to take high-security measures or use a secure cloud infrastructure developed specifically for that institution. In order to meet such requirements, each institution needs to develop and secure its own cloud infrastructure. This can also be very costly to do. Instead, edge AI technology can be used to create an environment that meets the desired standards with minimal tradeoffs.

Many artificial intelligence modules can be run on edges, as well as reinforcement learning modules, many of which may require expensive and high hardware with the training process.

Edge AI, which emerged with the reinforcement of artificial intelligence-based studies using edge technology, is also used for FIVE-ML performed using reinforcement learning (Figure 6). Especially in the method used in FIVE, while the players are being trained, the subsystems on the player, the number and types of ammunition, etc. many parameters are used. While many parameters flow instantly to the system/model in long-term training, it creates certain data traffic. In case the model is kept completely in the cloud, there is an additional process of processing the data coming to the edge and transferring it to the cloud. As a result of moving the machine learning system made in the cloud to the edge, the amount of data in the cloud is reduced. The latency and reduction in network traffic caused by this transmission offer the advantages of moving military projects and model data to the edge where data security can be more easily ensured.

Similarly, a safer and more efficient approach can be followed with the use of edge AI in terms of ensuring data security and minimizing the bandwidth requirement of digital twins used in the military field. Similarly, Tesla uses the edge principle to create a digital twin of each vehicle (Orrin & Chehreh, 2020).





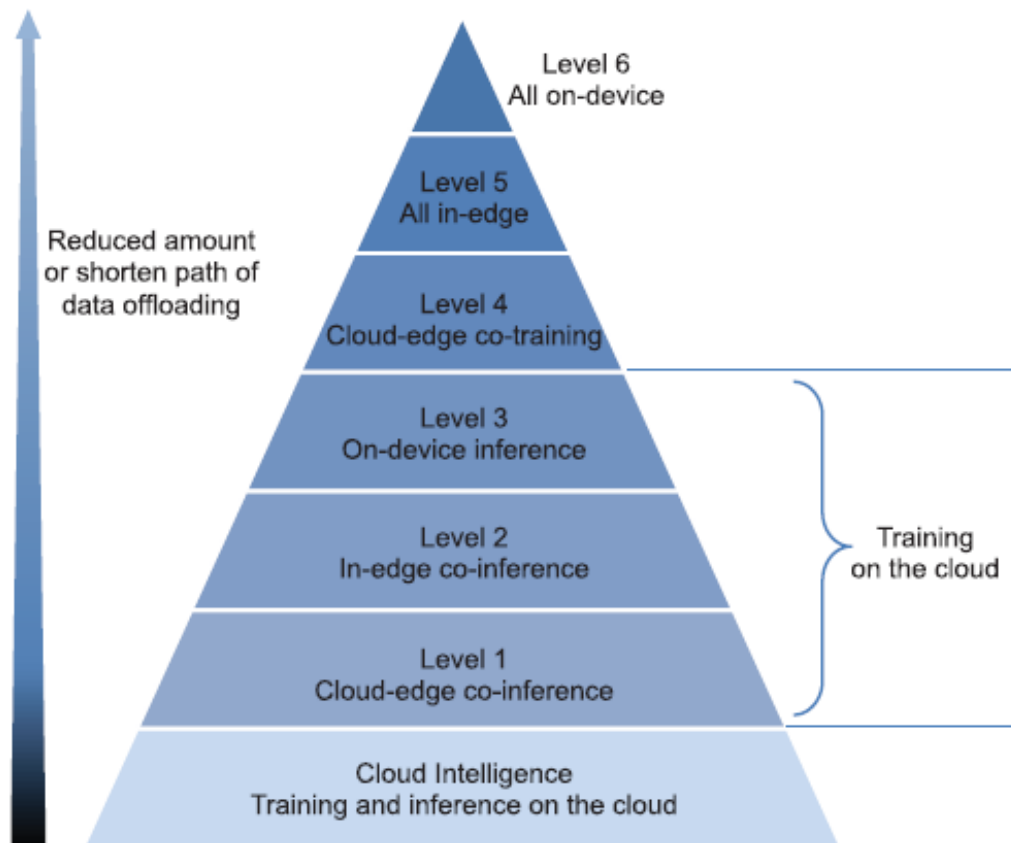
**Figure 6.** FIVE-ML edge ai structure

## 6. Discussions

Although edge computing is a one of the latest versions of technology, the world's giant software companies continue their investments in this field without slowing down. Some important examples are Amazon and Google. Thinking that taking the lead and investing in these technologies is the only way to stay competitive, these companies also consider that increasing demand for IoT devices will encourage the use of 5G, Edge computing, and edge AI technologies. Gartner highlighted technology providers that are improving and accelerating the use of edge AI in its 2020 "Emerging technologies: Tech Innovators in Edge AI" report. The report includes Atos as an edge AI Technology Innovator for his work in this field (Atos, 2020).

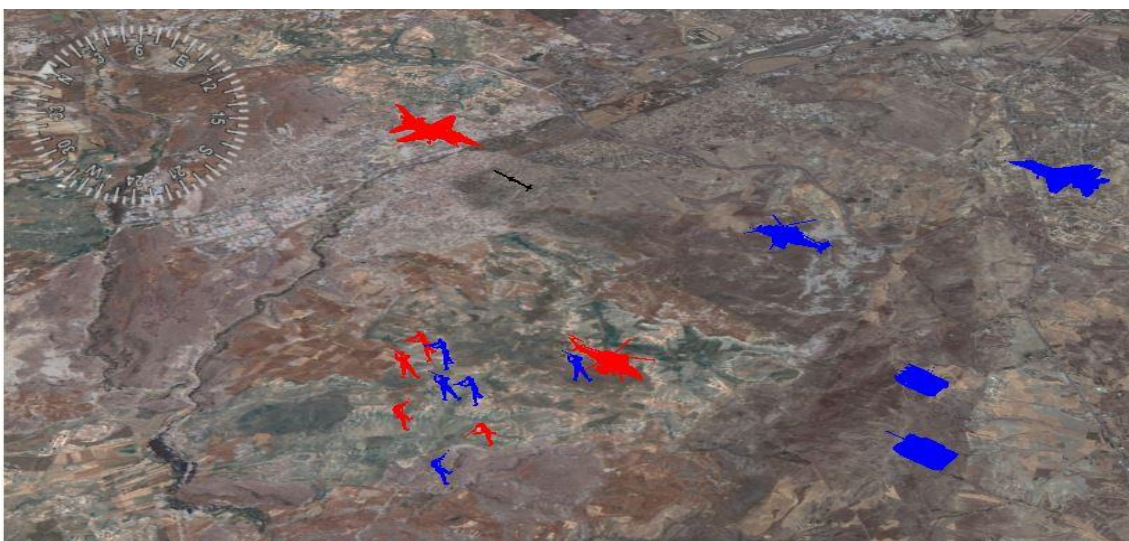
Edge AI will be more useful as a result of the rollout of 5G technology networks, which will result in faster and very low latency mobile data transfer. The launch of 5G-based edge solutions from IBM and Red Hat will help businesses more easily manage workloads across numerous devices from various vendors, aiming to serve their customers quickly, providing the agility the telecommunications sector needs. Additionally, there will be high potential to use edge AI technology in the image and video analysis, creating responses to audio-visual stimuli or in-the-moment recognition of scenes and areas, for instance, on smartphones (Satyanarayanan & Davies, 2019). Edge AI technology will also cut costs and increase security in terms of Industrial IoT (IIoT). Artificial intelligence will monitor machines for any possible glitches or mistakes in the production chain, and their use will become widespread with digital twins.

The FIVE-ML simulation system is one of the exemplary projects where Edge AI technology is used, especially in the field of defense. When we look at the edge levelling (See Figure 7 for details of levels) in the study, it is seen that the works done in FIVE-ML, are at the level of 2. Predominantly, education is carried out in a single-center, and partially at the edges. It will be in the direction of bringing this level to level 3-4 with the improvement of the current system.



**Figure 7.** Levels of edge intelligence (Zhou et al., 2019)

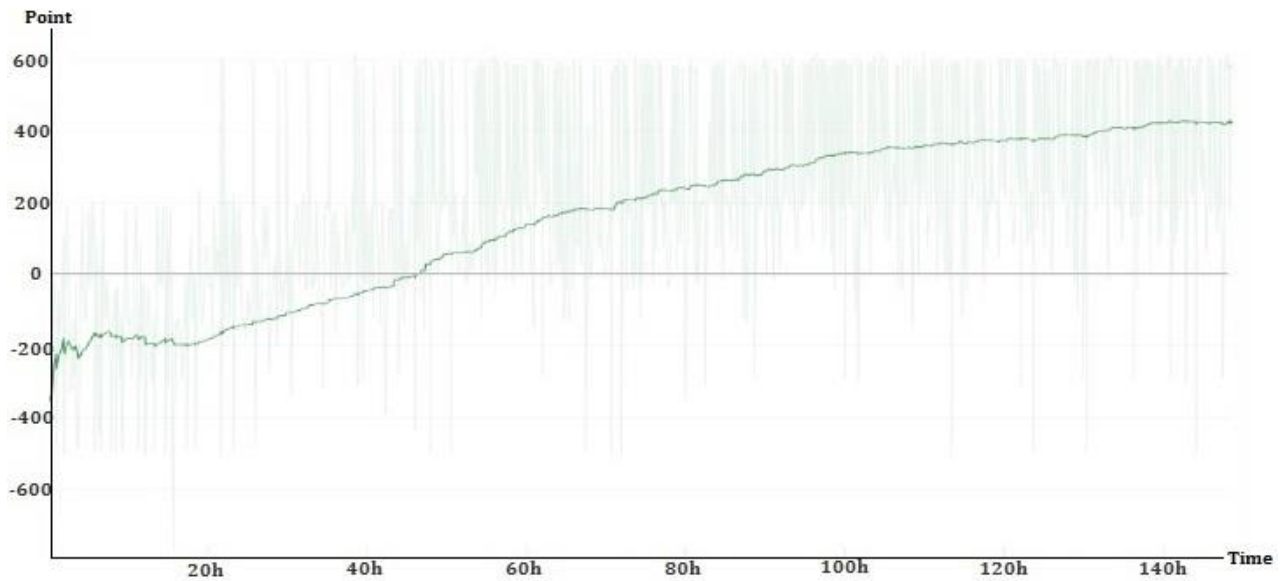
The focus of the study is on air to air and air to ground engagement scenarios with up to six virtual entities. Three friendly and three hostile entities are featured in the scenarios (Figure 8). Two of the three friendly entities are under the control of RL-based behavior models. The current HAVELSAN rule-based behaviour rules law the other entities. It can be seen that RL-based entities perform better than HAVELSAN rule-based entities in the same starting position scenarios. These experiments also demonstrate that using supervised learning as an initial point for RL significantly reduces training time and results in more realistic behavior models. The rule-based HAVELSAN rules that are currently in use are used to train the supervised learning models.



**Figure 8.** A screenshot of air and ground platforms from FIVE-ML

The score values obtained from the air-ground scenario in the FIVE-ML study carried out using reinforcement learning are shown in Fig. 9. The point values here are obtained from the calculation of the penalty and reward

values obtained at the end of the section. For example, hitting an enemy target is a reward, while hitting friendly forces is considered a punishment. FIVE-ML may open the way for decision support systems that can be applied in the real-world operation environment. Totally 34% increase of the pointing the correct target is gathered. It is also anticipated that it will be actively used as a military and strategic decision support system.



**Figure 9.** RL training score curve for air-to-ground scenario in FIVE-ML

The reinforcement machine learning technique was used in FIVE-ML. When evaluated according to the transition levels to edge intelligence, it has been determined that the current work is at the 2nd level and there is a 54% performance increase in terms of time with accuracy through edge AI. Reinforcement learning is a technology that is likely to be used in decision support systems, which will gain even more importance in the future, and in decision support systems where instant decision making and high performance are critical, studies can be made to improve performance in instant transactions with edge AI.

The positive developments we have achieved in this study encourage us to take our work further. One of the most important technologies to be used together with edge AI technology is digital twin technology. Digital twins are digital versions of a real-world entity that can be used for a variety of purposes, such as simulating the physical entity's behaviour, are typically located in the cloud and are protected in the cloud and facilitated with information from devices or simulations in the field. Digital twins are used to understand and predict former and current operations, utilizing machine learning techniques for failure prediction, condition monitoring and anomaly detection. There are two ways to use reinforcement learning in digital twins. First, reinforcement learning can be used as well as supervised learning to analyze data from digital twins and create optimization recommendations for twin-owning entities or systems. As a second use, studies could be made to use digital twins of assets trained using reinforcement learning.

In the past, edge devices were primarily used for data collection and basic calculations, while edge computing offers advanced calculations and cloud-powered analytics at the edge that enable faster and local decision-making. The new real-time AI applications will be possible once the digital twin is moved to the edge. Its advantages are described under three main headings: low latency, closed-loop integration of analytics and local control, and rapid development of the digital twin.

### 6.1. Lower latency

In some cases, round-trip delays to the cloud can become unacceptable. Applications that require sub-second delays are possible with the digital twin executed on the Edges. For example, when danger is detected or predicted by the digital twin analytics, device protection functions can be initiated instantly.

## 6.2. Closed-loop integration of analytics and local control

The data and analytical values produced by the digital twin can orient local control. This helps enable proactive control applications that result in autonomous operation. For example, a predicted critical anomaly can be mitigated without human intervention.

## 7. Future studies

Using approaches such as online machine learning and real-time reinforcement learning in the data flow, the digital twin is constantly self-learning and evolving. This is ensured by optimized system operation and devices that adjust themselves to situations. For example, by learning and developing its digital twin at the edge, a grid-connected power device can extract optimum operational or control parameters for maximum output without affecting grid stability.

While the use of digital twins has many advantages, there are also business advantages to running digital twins at the edge rather than the cloud.

- Provides lower cloud hosting costs. Normally it can be expensive to send all data to the cloud for storage and analysis. Even sending a certain amount of data instead of all data helps to reduce costs on a large scale.
- Data preprocessing reduces the volume of data transmitted to the cloud. Before the data is sent to the cloud, it is necessary to make the data available in the cloud through various pre-processes. In digital twins, multiple data flows from many sensor sources to the cloud. In addition, many data are related to each other and are in communication. While this is the case with physical devices, the situation is similar for twins in the digital environment. For this reason, the data should be sent in appropriate formats so that they can work in harmony with each other. In addition, the use of edge technology reduces the amount of data transferred to the cloud, resulting in a lower bandwidth requirement.
- Sensitive data does not need to be sent to the cloud. Sending all commercial or national confidential data to the cloud by companies and even countries can cause problems in case of any attack. For this reason, keeping critical data at the edges instead of being exposed to the cloud has an important place in facilitating the protection of sensitive data.
- With increased durability, operations at the edges can be performed smoothly even when the digital twin is disconnected.

Running edge AI applications and algorithms directly on field devices requires computational and processing capacity, making it an effective use case for machine learning and deep learning. The volume of data gathered by field assets is escalating rapidly. Edge AI applications are made possible by machine learning and deep learning for better, real-time management of this data. As a result, edge nodes are created where data can be stored, processed, and filtered before being sent to the cloud for additional processing, analysis and integration with different applications.

The widespread use of edge AI technology helps to solve the problem of transferring large amounts of data in digital twins from the physical asset to the digital twin of the asset, filtering certain data and partially printing it into the cloud. With the widespread use of edge AI technology, it will be easier to implement systems using digital twin technology. It is predicted that there will be an increase in studies conducted in direct proportion to this.

## 8. Conclusion

Although edge AI technology is a new technology, its prevalence is increasing day by day and it is a technology that many companies invest in. In addition, the most important factor that helps the spread of this technology is that innovative and rising technologies such as IoT, IIoT, digital twin, and 5G facilitate the application areas and become widespread with these technologies. Therefore, it will be possible to see edge AI-based technology applications in the future. It is expected to be used not only in the civil field but also in the military field due to the cost, time, and security advantages it provides. It is aimed to take the edge AI technology level in the

FIVE-ML simulation system further from its current situation in the future, so that it is planned to benefit from the benefits offered by this technology such as gaining the cost advantage and increasing the security level at a higher level. The advantages offered by digital twin technology are brilliant, but the disadvantages will be eliminated with edge AI. Thus, the level of maturity of the technology will increase even more and the number of applications in this field will increase.

### Author contribution

The author is responsible for designing the study, establishing research methods, applying and concluding theoretical theories.

### Declaration of ethical code

The author 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 author declares that there is no conflict of interest.

### References

- 360 Research Reports. (2019). *Global Edge AI Software Market Growth (Status and Outlook) 2019-2024*. <https://www.360researchreports.com/global-edge-ai-software-market-14355998>
- Ahmed, E., Rehmani, M. H., & Bonnet, P. (2017). Editorial to a Special Section on Information Fusion in Internet of Things. *Information Systems*, 69, 194. <https://doi.org/10.1016/j.is.2017.06.004>
- Anciaux, N., Bonnet, P., Bouganim, L., Nguyen, B., Pucheral, P., Sandu Popa, I., & Scerri, G. (2019). Personal Data Management Systems: The security and functionality standpoint. *Information Systems*, 80, 13–35. <https://doi.org/10.1016/j.is.2018.09.002>
- Arisoy, E. B., Ren, G., Ulu, E., Ulu, N. G., & Musuvathy, S. (2016). A data-driven approach to predict hand positions for two-hand grasps of industrial objects. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, 1A-2016*(August). <https://doi.org/10.1115/DETC2016-60095>
- Atos. (2020, November 23). *Atos named by Gartner as an Edge AI Technology Innovator for 2020 - Atos*. Atos. [https://atos.net/en/2020/press-release\\_2020\\_11\\_23/atos-gartner-edge](https://atos.net/en/2020/press-release_2020_11_23/atos-gartner-edge)
- Bernard Marr. (2017, March). *What Is Digital Twin Technology - And Why Is It So Important?* Forbes. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/?sh=66775e592e2a>
- Chang, W. J., Chen, L. B., & Su, K. Y. (2019). Deepcrash: A Deep Learning-Based Internet of Vehicles System for Head-on and Single-Vehicle Accident Detection with Emergency Notification. *IEEE Access*, 7, 148163–148175. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946468>
- Dursun, M., & Çuhasdar, İ. (2018). Video Streaming with Raspberry Pi 3, Picamera and https Implementation for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Data Link. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 23–28. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.307294>
- Eurotech. (2021). *Edge AI: Enabling Deep Learning and Machine Learning with High Performance Edge Computers*. Eurotech. <https://www.eurotech.com/en/page/edge-ai>
- Grand View Research. (2021, May). *Edge Computing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software, Services, Edge-managed Platforms), By Application, By Industry Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2021 - 2028*. Grandviewresearch. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/edge-computing-market>
- Hung, N. Q. V., Weidlich, M., Tam, N. T., Miklós, Z., Aberer, K., Gal, A., & Stantic, B. (2019). Handling probabilistic integrity constraints in pay-as-you-go reconciliation of data models. *Information Systems*, 83, 166–180.

<https://doi.org/10.1016/j.is.2019.04.002>

- Karaarslan, A. (2019). Bilgisayar Sistemlerinde SEPIC Dönüştürücü Uygulaması ve Benzetim Çalışması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 111–117. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.540127>
- Koohestani, A., Abdar, M., Khosravi, A., Nahavandi, S., & Koohestani, M. (2019). Integration of Ensemble and Evolutionary Machine Learning Algorithms for Monitoring Diver Behavior Using Physiological Signals. *IEEE Access*, 7, 98971–98992. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926444>
- Lechtenböcker, J., & Vossen, G. (2003). Multidimensional normal forms for data warehouse design. *Information Systems*, 28(5), 415–434. [https://doi.org/10.1016/S0306-4379\(02\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0306-4379(02)00024-8)
- Lee, Y. L., Tsung, P. K., & Wu, M. (2018). Technology trend of edge AI. *2018 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test, VLSI-DAT 2018*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT.2018.8373244>
- Navrat, P., Manolopoulos, Y., & Vossen, G. (2004). Special issue on ADBIS 2002: Advances in databases and information systems. *Information Systems*, 29(6), 437–438. <https://doi.org/10.1016/j.is.2003.10.003>
- Nguyen, N. D., Nguyen, T., & Nahavandi, S. (2017). System Design Perspective for Human-Level Agents Using Deep Reinforcement Learning: A Survey. *IEEE Access*, 5, 27091–27102. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2777827>
- Nguyen, T. (2023). *Emerging Technologies on the 2023 Gartner Impact Radar*. Gartner. <https://www.gartner.com/en/articles/4-emerging-technologies-you-need-to-know-about>
- Nvidia. (2021). *AIMobile Edge AI Solution Powered by NVIDIA*. Nvidia. [https://www.aimobile.com.tw/EdgeAI\\_Products.html](https://www.aimobile.com.tw/EdgeAI_Products.html)
- Orrin, S., & Chehreh, C. (2020, October 20). *How Edge Computing and Hybrid Cloud Are Shifting the IT Paradigm - Nextgov*. Nextgov. <https://www.nextgov.com/ideas/2020/11/how-edge-computing-and-hybrid-cloud-are-shifting-it-paradigm/170238/>
- Paaajanen, S. (2020, April 28). *What is Edge Analytics?* Advian. <https://www.advian.fi/en/blog/what-is-edge-analytics>
- Satyanarayanan, M., & Davies, N. (2019). Augmenting Cognition Through Edge Computing. *Computer*, 52(7), 37–46. <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2911878>
- Senderovich, A., Weidlich, M., & Gal, A. (2019). Context-aware temporal network representation of event logs: Model and methods for process performance analysis. *Information Systems*, 84, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.is.2019.04.004>
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48(January), 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- Van Den Bussche, J., Vansummeren, S., & Vossen, G. (2005). Towards practical meta-querying. *Information Systems*, 30(4), 317–332. <https://doi.org/10.1016/j.is.2004.04.001>
- Wang, P., Ye, F., Chen, X., & Qian, Y. (2018). Datanet: Deep learning based encrypted network traffic classification in SDN home gateway. *IEEE Access*, 6, 55380–55391. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872430>
- Watkinson, N., Zaitsev, F., Shivam, A., Demirev, M., Heddes, M., Givargis, T., Nicolau, A., & Veidenbaum, A. (2021). EdgeAvatar: An Edge Computing System for Building Virtual Beings. *Electronics*, 10(3), 229. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10030229>
- Xilinx. (2021). *Edge AI*. Xilinx. <https://www.xilinx.com/applications/industrial/analytics-machine-learning.html>
- Yılmaz, S. (2022). Development stages of a semi-autonomous underwater vehicle experiment platform. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 19(3), 1–21. <https://doi.org/10.1177/17298806221103710>
- Zhou, Z., Chen, X., Li, E., Zeng, L., Luo, K., & Zhang, J. (2019). Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence With Edge Computing. *Proceedings of the IEEE*. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2918951>

## Yapay sinir ağları kullanılarak fotovoltaik sistemin maksimum güç noktası takibi

### Maximum power point tracking of the photovoltaic system using artificial neural networks

Leyla KARAGÖZOĞLU\*<sup>1</sup>, Zeynep Bala DURANAY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 12.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 23.06.2023

#### Öz

Bu çalışmada, bir fotovoltaik sistemin yapay sinir ağı kullanılarak maksimum güç noktası takibinin benzetimi yapılmıştır. Fotovoltaik sistemlere olan ilgi, fosil kaynakların yetersizliği ve enerjiye olan talebin yükselmesi ile giderek artmaktadır. Fotovoltaik sistem performansının çevre koşullarına göre değişmesi, sistem verimliliğini düşürmektedir. Bunun önüne geçmek, maksimum güç noktasına ulaşmakla mümkündür. Sistemi maksimum güç noktasında çalıştırmaya yönelik birçok teknik geliştirilmiştir. Yapay zekanın yaygınlaşmasıyla, maksimum güç noktası tespitinde akıllı sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Akıllı sistemlerden biri olan yapay sinir ağı, öğrenilme, genelleme yapabilme ve karar verme kabiliyetine sahiptir. Bu çalışmada giriş değişkenleri sıcaklık ve ışınım olan bir yapay sinir ağı ile maksimum güç noktası tespit edilmektedir. Sistemin benzetimi MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Levenberg-Marquardt algoritmasının kullanıldığı ağı eğitiminde, %70'i eğitim, %15'i geçerlilik ve %15'i test aşamalarında olmak üzere toplam 1000 veri kullanılmıştır. Işınımın 1000W/m<sup>2</sup>'den 200W/m<sup>2</sup>'ye belirli aralıklarla azaltıldığı sistemde, fotovoltaik panelin gücünün 225.1W'dan 46.9W'a, yükseltici konvertör gücünün 220.9W'dan 45.75W'a kadar azaldığı izlenmiştir. Sıcaklığın 25°C'den 45°C'ye belirli aralıklarla artırıldığı sistemde, fotovoltaik panel gücünün 225.1W'dan 194.6W'a, yükseltici konvertörün gücünün 220.9W'dan 190.7W'a kadar azaldığı görülmüştür. Sabit ışınım (1000W/m<sup>2</sup>) ve sıcaklık (25°C) değerlerinde, sistem %98 ile en yüksek verim değerine sahiptir. Sabit sıcaklık ve farklı ışınım koşullarında, sistem verimi incelenmiş, ışınım değeri azaldıkça sistem veriminin azaldığı görülmüştür. Benzer olarak, sabit ışınım ve farklı sıcaklık koşulları altında, sıcaklık artışının sistem veriminin azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, yapay sinir ağı tabanlı maksimum güç noktası izleme sistemine sahip fotovoltaik sistemin, değişen çevre koşullarında maksimum güç noktasını izlediğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Fotovoltaik, Güneş enerjisi, Maksimum güç noktası, Yapay sinir ağı, Yenilenebilir enerji.

#### Abstract

In this study, a photovoltaic system is simulated for maximum power point tracking using an artificial neural network. The interest in photovoltaic systems is increasing with inadequacy of fossil resources and rise in demand for energy. The variation of photovoltaic system performance depending on environmental conditions reduces efficiency. It is possible to prevent this by reaching maximum power point. Many techniques have been developed to operate system at maximum power point. With the spread of artificial intelligence, smart systems have started to be used in determining maximum power point. Artificial neural networks are intelligent systems that have the ability to learn, generalize and make decisions. In this study, maximum power point is determined with an artificial neural network whose inputs are temperature and radiation. The system was simulated in MATLAB/Simulink environment. A total of 1000 data were used in training of network in which Levenberg-Marquardt algorithm was used, 70% in training, 15% in validation and 15% in testing stages. It was observed that power of photovoltaic panel decreased from 225.1W to 46.9W, and power of boost converter from 220.9W to 45.75W when radiation was reduced from 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup> at regular intervals. When temperature was increased from 25°C to 45°C at regular intervals, it was determined that power of photovoltaic panel decreases from 225.1W to 194.6W, and power of boost converter from 220.9W to 190.7W. At constant radiation (1000W/m<sup>2</sup>) and temperature (25°C), system has the highest efficiency value of 98%. At constant temperature and different radiation conditions, it was seen that efficiency decreased as radiation value decreased. Similarly, under constant radiation and different temperature conditions, temperature increase caused a decrease in efficiency. The results show that photovoltaic system with artificial neural network based maximum power point tracking reaches maximum power point under changing environmental conditions.

**Keywords:** Photovoltaic, Solar energy, Maximum power point, Artificial neural network, Renewable energy.

\* Leyla KARAGÖZOĞLU; leylakaragozoglu@gmail.com

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Günümüzde güneş enerjisi, güvenilir, çevre dostu, yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul görmektedir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (FV) sistemlerin kullanımı, artan enerji talebi ile birlikte hızla artmaktadır. Bununla birlikte, FV sistemler düşük verimlilik ve yüksek maliyetten muzdariptir. FV sistemlerin bulut, yağmur, kar, toz, nem gibi çevre şartlarına bağımlı olmaları verimliliklerini düşürmektedir (Berrera vd., 2009; Sreekanth & Raglend, 2012; Karagözoğlu & Duranay, 2021; Duranay vd., 2021). Bu dezavantajın üstesinden gelmek için, FV sistemler maksimum güç noktası (MGN) etrafında çalıştırılarak üretilen enerji maksimuma çıkarılmaktadır. Bu ise maksimum güç noktası izleme (MGNİ) teknikleri ile mümkün olmaktadır (Chy & Khaliluzzaman, 2015).

FV sistemler için kullanılan birçok MGNİ tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler basitlik, doğruluk, zaman cevabı, popülerlik, maliyet ve diğer teknik yönlerden farklılık göstermektedir. Değiştir gözle tekniği (Liu vd., 2014), tepe tırmanma tekniği (Bouakkaz vd., 2020), artımlı iletkenlik algoritması (Liu vd., 2008; Safari & Mekhilef, 2010) gibi geleneksel yöntemler kolaylık ve hız sebebiyle yaygın kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin dezavantajı, değişen hava koşullarında MGN etrafındaki salınımların sistem verimini büyük ölçüde azaltmasıdır (Dadfar vd., 2019). Yani tam bir MGN izlemesi mevcut değildir.

Bu problemleri çözebilmek amacıyla, MGN takibinde yapay sinir ağı (YSA) (Joshi & Arora, 2017; Seyedmahmoudian vd., 2016) ve bulanık mantık (Fathi & Parian, 2021) gibi yapay zeka teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, değişen hava şartlarında MGN'yi daha verimli izleyebilmektedir.

Literatür çalışmalarına bakıldığında yapay sinir ağları ve geleneksel yöntemler kullanılarak sistemin maksimum güç takibinde simülasyon çalışmaları değerlendirilmiştir (Makhloufi vd., 2014). Işınım değişiminin sık yaşandığı durumlarda YSA'nın klasik yöntemlere göre enerji kaybını en aza indirgeyerek sistem verimini artırabileceği görülmüştür.

Literatürdeki bir çalışmada, fotovoltaik sistem verimliliğinin artırılması için bulanık sinir ağı yapısı kullanan MGNİ yöntemi geliştirilmiştir (Gani, 2021). Belirtilen çalışmada, incelenen simülasyonlardan elde edilen sonuçlar artımsal iletkenlik ve gözle & değiştir MGNİ yöntemleriyle karşılaştırıldığında değişken ışınım koşullarında MGN'de sapmaların meydana gelmediği gözlemlenmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada, fotovoltaik sistemlerde kullanılan çeşitli MGNİ yöntemlerinin performans, maliyet, izleme hızı, karmaşıklık, doğruluk, avantaj ve dezavantajları incelenerek bu yöntemler sınıflandırılmıştır (Mao vd., 2020).

Sinirsel-bulanık denetim esaslı iki döngülü MGNİ ve artımsal iletkenlik yöntem esaslı tek döngülü MGNİ'nin performansları karşılaştırılmıştır (Gani vd., 2020). Değişken yük ve güneş ışınımı altında iki döngülü benzetim çalışmalarında takip sisteminin, tek döngülü takip sistemine göre daha hızlı olduğu ve daha az güç kayıplarına sebep olduğu görülmüştür.

Güneş ışınımı ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden etkilenen FV sistem çıkış karakteristiği, doğrusal değildir. YSA tekniğinde, ışınım ve sıcaklık gibi bilgiler alınarak, değişen hava koşullarına göre YSA tarafından sistem eğitilir. Böylece MGNİ amacıyla YSA kullanılarak, FV sistemin MGN'de çalışması sağlanmış olur.

Bu çalışmada, Matlab/Simulink'te bir FV sistemin YSA kullanılarak MGN takibine yönelik benzetimi gerçekleştirilmiştir. Materyal ve metot bölümünde, ilk olarak MGNİ konusu açıklandıktan sonra, sistemde kullanılan DA-DA yükseltici konvertör devresinden bahsedilmiştir. Daha sonra YSA'nın oluşturulması ve eğitilmesi aşamalarına değinilmiştir. Son olarak, Bulgular bölümünde farklı çevresel koşullar ve yük değerleri için elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir.

Çalışma, Bulgular bölümünde sunulan benzetim sonuçları ile YSA tabanlı MGNİ sistemine sahip bir FV sistemin, değişen çevre koşullarında MGN'yi izlediğini açık bir şekilde göstermektedir. YSA kullanılarak oluşturulan MGN izleyicisinin, değişken yük ve güneş ışınımı altında sistemin maksimum gücünü elde ettiği ve salınımları azalttığı görülmektedir.



## 2. Materyal ve metot

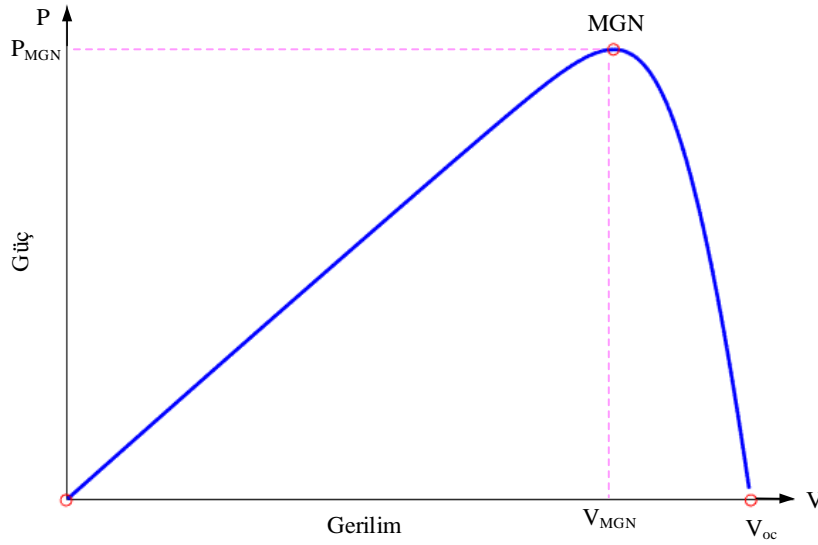
### 2. Material and method

#### 2.1. Maksimum güç noktası izleme

##### 2.1. Maximum power point tracking

FV sistemlerde modül için en verimli çalışma noktası MGN olarak adlandırılmaktadır. MGN'da çalışma durumunda, panelden elde edilen verim de maksimum olmaktadır.

Bir FV sistemin çıkış karakteristiği Şekil 1'de görüldüğü gibi doğrusal değildir (Duranay & Guldemir, 2021). FV panellerin maksimum güç noktası, FV güç üretim sistemlerinin verimliliklerini düşürmektedir. Maksimum güç noktası çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğinden, yükün talep ettiği gücü sağlamak için, FV sistemlerde modüller seri ya da paralel bağlanarak panelleri oluşturmaktadır ve panellerde birleştirilerek diziler tasarlanmaktadır. Bu durum, FV sistemin maliyetini artırmaktadır ve önemli miktarda enerji kayıplarına neden olmaktadır.



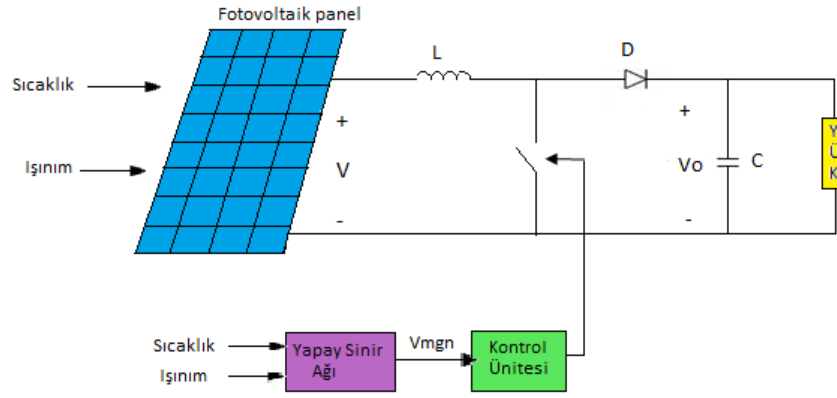
**Şekil 1.** FV sistem güç karakteristiği

**Figure 1.** PV system power characteristic

Hem bu olumsuzluğu gidermek hem de sistem çıkışında yüksek verim almak için, FV panel maksimum güç noktasında çalıştırılmalıdır. Belirli şartlar altında FV sistemden maksimum güç elde etmeyi sağlayan ve şarj kontrol cihazlarına dahil edilen algoritmalar ile sistem maksimum güç noktasında çalıştırılabilmektedir. Bu amaçla MGNİ yöntemleri kullanılmaktadır. MGNİ yöntemi, FV sistemin gerilim ve akımını izleyerek çıkış gücünü kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır (Köse, 2018; Kurak vd., 2016; Duranay & Guldemir, 2019).

Sistemi kendi MGN'sinde çalıştırmak için bir MGNİ algoritmasının kullanılması gerekir. MGNİ için gözle ve düzelt (Liu vd., 2014), tepe tırmanma teknikleri (Waszynek, 1983; Hsiao & Chen, 2002), kesirli yöntemler, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı (Kobayashi vd., 2004; Hart vd., 1984), bulanık mantık tabanlı (Fathi & Parian, 2021; Duranay & Guldemir, 2021) ve NN tabanlı yöntemler (Divyasharon vd., 2019; Elaissoui vd., 2020) gibi farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Bu çalışmada YSA kullanan bir FV sistem için MGNİ simülasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 2'de gösterilen sistem bir FV panel, bir DA-DA yükseltici konvertör, bir kontrol ünitesi ve bir rezistif yükten oluşmaktadır. Eğitilmiş YSA, her bir sıcaklık ve güneş ışın değeri için, uygun yükseltici konvertör görev döngüsüne karşılık gelen MGN'yi belirlemektedir.

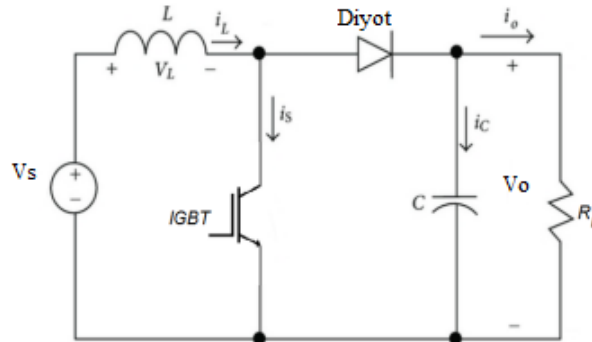


**Şekil 2.** YSA tabanlı FV sistemin blok şeması  
**Figure 2.** Block diagram of ANN based PV system

## 2.2. DA-DA yükseltici konvertör

### 2.2. DC-DC boost convertor

Yükseltici konvertör, DA gerilimi yükselterek, gerekli olan DA gerilimi elde etmek amacıyla kullanılan bir güç elektroniği devresidir (Duranay & Guldemir, 2020). Şekil 3’de gösterilen DA-DA yükseltici konvertör devresi indüktör, kondansatör, diyot ve IGBT içermektedir. Yükseltici konvertör, FV uygulamaları için panel gerilimini uygun seviyeye yükseltmek için kullanılır. Ayrıca konvertör, FV panelden maksimum güç çekmek için kontrollü bir yük olarak düşünülebilir ve güç elektroniği anahtarının görev döngüsü D’yi değiştirerek, giriş kaynağından yüke enerji transferini modüle etmek için kullanılır.



**Şekil 3.** Yükseltici konvertör devre şeması  
**Figure 3.** Boost convertor circuit diagram

Yükseltici konvertörün  $V_s$  giriş gerilimi ile  $V_o$  çıkış gerilimi arasındaki ilişki Denklem 1’de verilmiştir (Duranay & Guldemir, 2020)

$$\frac{v_s}{v_o} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

Yükseltici konvertör devresi, yarı iletken güç anahtarının iletme ve kesime götürülmesine göre çalışmaktadır. Anahtar iletme götürüldüğünde, indüktör içinden geçen akım artmakta ve üzerinde enerji depolanmaya başlanmaktadır. Anahtar kesime götürüldüğünde ise, indüktör içinden geçmekte olan şarj akımı diyot üzerinden kondansatör ve yüke doğru akmaya başlamaktadır. Böylece, indüktör, enerjisini deşarj eder ve indüktör üzerindeki gerilimin polaritesinin yönü gerilim kaynağının polaritesi ile aynı olur ve diyot üzerinden yüke bağlanır. Böylece çıkış geriliminin seviyesi yükseltilmiş olur.

Denklem 2’de giriş gerilimin görev döngüsüne bağlı olarak gösterimi verilmiştir. Denklem 3 ve Denklem 4’te sırasıyla indüktör ve kondansatör değerlerinin değişimi gösterilmektedir (Duranay & Guldemir, 2020)

$$V_0 = \frac{V_s}{1-D} \quad (2)$$

$$L > \frac{v_s D}{f_s \Delta I_L} \quad (3)$$

$$C > \frac{DP_0}{f_s V_o \Delta V_o} \quad (4)$$

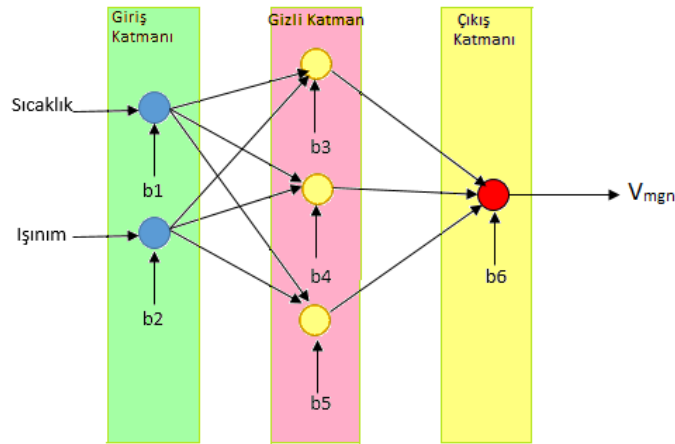
Burada D görev döngüsü,  $f_s$  anahtar frekansı,  $\Delta I_L$  indüktör akım dalgalanması,  $P_0$  çıkış gücü,  $\Delta V_o$  ise çıkış gerilim dalgalanmasını ifade etmektedir.

### 2.3. Yapay sinir ağının oluşturulması

#### 2.3. Implementation of artificial neural network

YSA insan beyninin öğrenme ve karar verme fonksiyonlarından esinlenerek oluşturulmuş uyarlanabilir sistemlerdir. YSA'ların öğrenme ve genelleme yapabilmeleri onların esnek ve güçlü olmalarını sağlamaktadır. Bu sayede karar verme noktasında vazgeçilmez araçlar olmaktadır. YSA'lar öğrenme, uyarlanabilir ve genelleme özelliklerine sahiptir (Öztemel, 2003). Bunun yanı sıra çok girişli, çok çıkışlı sistemlere de uygulanabilmektedir. Bu sebeple denetim sistemlerinde tercih edilmektedir. YSA çok sayıda basit işlemciden oluşmaktadır ve bağlantı ağırlıkları ayarlanabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı YSA'lar esnek bir yapıya sahiptir. YSA'da ağırlıklar; problemdeki değişikliklere göre ayarlanabilmektedir. Problemi çözebilmek için eğitilen bir YSA, problemdeki değişime göre tekrar eğitilebilmektedir.

Yapay nöronlar, doğal nöronların işleyişini simüle etmektedir (Hassan, 2020). Yapay nöronlar aralarında bağlantı oluşturularak ve katmanlar halinde gruplandırılarak YSA oluşturulur. YSA birbirine bağlı bir grup yapay nörondan oluşur. Nöronların aynı doğrultuda bir araya gelmeleriyle katmanlar oluşur. Şekil 4'te gösterildiği gibi bir YSA üç katmandan oluşmaktadır. Giriş katmanı, ara/gizli katman ve çıkış katmanı.



Şekil 4. YSA yapısı

Figure 4. ANN structure

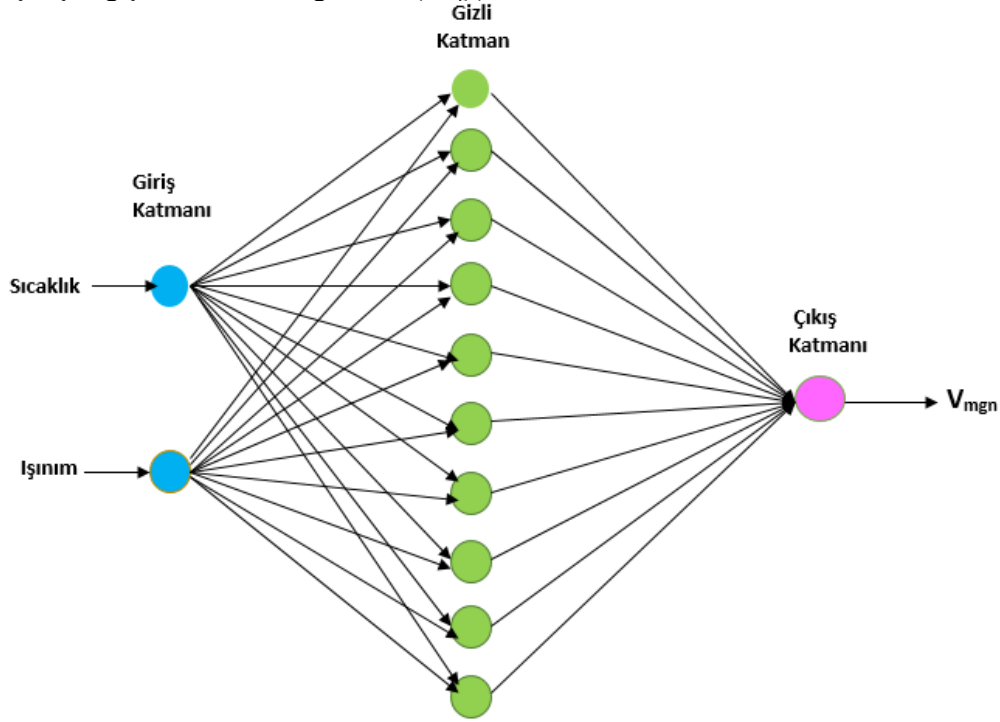
Giriş katmanı dışardan girişleri alan nöronları içermektedir (Jyothy Lakshmi & Sindlu, 2018; Ibrahim vd., 2019). Çıkış katmanı nihai YSA çıktısını üreten katmandır. Gizli katman, giriş katmanından çıkış katmanına YSA ara hesaplamalarını gerçekleştirir. Giriş ve çıkış katmanlarındaki nöron sayısı, giriş ve çıkış problemlerinin sayısına bağlıdır. Gizli katmandaki nöron sayısı ise gerekli doğruluk ve hesaplama süresine bağlıdır.

### 2.4. Yapay sinir ağı eğitimi

#### 2.4. Artificial Neural Network Training

Bu çalışmada, MATLAB programı içerisindeki YSA'nın uygulamalarını bulunduran Neural Network Toolbox'tan yararlanılmıştır. Bu çalışmada MGN'yi izleyebilmek için bir YSA yapısı kullanılmıştır. Şekil 5'te

gösterilen bir üç katmanlı YSA, MGN'ye ulaşmak için kullanılmıştır. YSA'nın iki giriş değişkeni sıcaklık (S) ve ışınım (I), çıkış değişkeni ise MGN gerilimi ( $V_{mgn}$ )'dir.



**Şekil 5.** Sinir ağı yapısı  
**Figure 5.** Neural network structure

Sinir ağını eğitmek için giriş ve çıkış değişkenleri olarak bazı verilere ihtiyaç duyulmaktadır. MATLAB'da FV model programlaması ile istenilen veri değerleri elde edilmiştir. YSA başarısı ölçülürken regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ve ortalama kare hata (MSE) dikkate alınmıştır.

MSE bir regresyon eğrisinin bir dizi noktaya mesafesinin ne kadar olduğunu göstermektedir. Yani MSE ile öğrenme modelinin performansı ölçülmektedir. Bu değer sürekli pozitiftir ve sifıra yaklaştıkça performans daha iyi gelişim göstermektedir.

Bu yöntem hataların ortalamasını ölçen sürekli değişkenlerde yaygındır. MSE Denklem 5'te gösterilmiştir (Gündoğdu & Çelikel, 2020).

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_i)^2}{n} \quad (5)$$

İki ya da daha fazla nicel değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz yöntemine regresyon analizi denir. Analiz işleminde tek değişken varsa tek değişkenli regresyon, birden fazla değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak adlandırılmaktadır. Denklem 6'da regresyon katsayısının formülü gösterilmiştir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_{m,1})^2} \quad (6)$$

Burada n örnekleme boyutu,  $y_p$  tahmini değer,  $y_m$  ölçülen değer,  $y_i$  örneklenmiş veri değeridir.

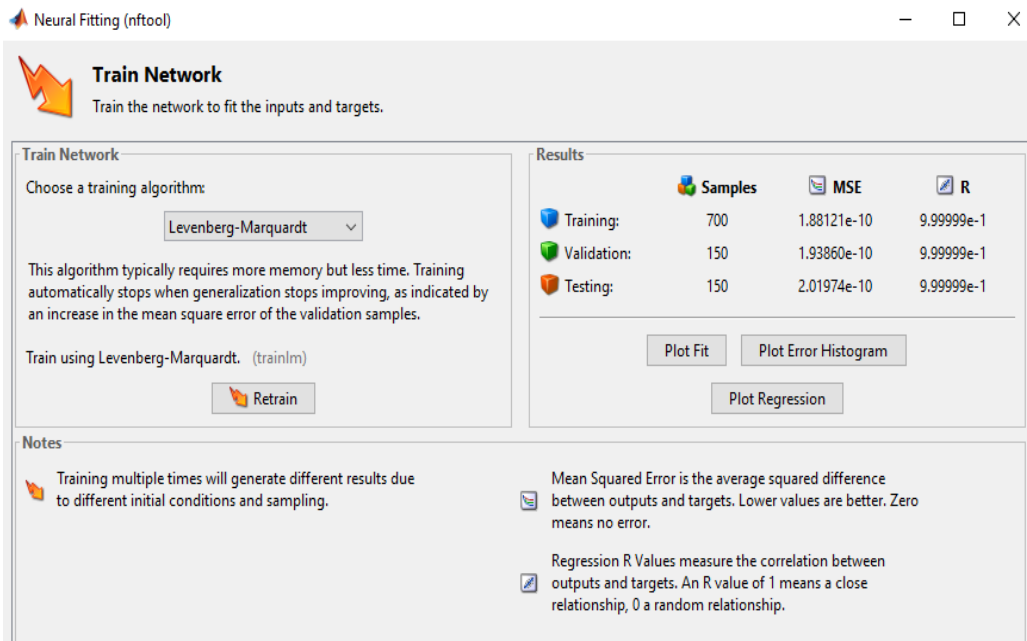
YSA eğitimi için gereken veri değerleri Matlab'da oluşturulmuştur. Matlab'da FV sistemler için kullanılan arayüzden faydalanarak, giriş değişkenleri için 1000 tane farklı sıcaklık ve ışınım değerine karşılık MGN gerilimi üretilerek, YSA eğitimi için gerekli veriler elde edilmiştir. Bu değerler üretilirken, sıcaklık 15-35 °C

değerleri arasında değiştirilmiş, ışınlım ise 0-1000 değerleri arasında rastgele oluşturulmuştur. Örnek veri setine ait değerler Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Örnek veri seti  
*Table 1. Sample data set*

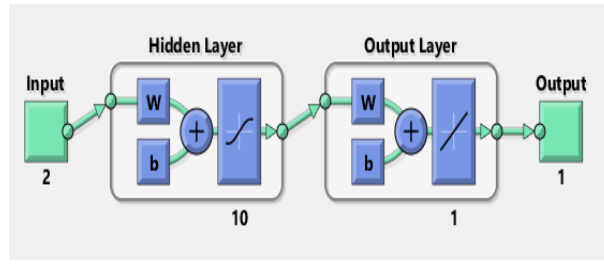
Işınım (W/m <sup>2</sup> )	Sıcaklık (°C)	Maksimum güç gerilimi (W)
905	31	28.377
913	17	33.452
97	27	29.723
546	20	32.334
964	34	27.323
970	18	33.226
485	34	27.326
141	31	28.483
915	23	31.277
959	30	28.543

YSA eğitimi için 1000 veri kullanılmıştır. Bu 1000 tane verinin %70’i (700) eğitim aşaması için, %15’i (150) geçerlilik aşaması için ve %15’i (150) test aşaması için kullanılmıştır. Bu uygulamada Levenberg-Marquardt (LM), Bayesian Regularization (BR), Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritmaları kullanılarak ağ eğitimi yapılmıştır. Daha sonra bu algoritmaların tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Algoritmaların karşılaştırılması sonucunda LM algoritmasının en düşük ortalama kare hatayı bulduğu ve maksimum başarıyı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca LM algoritmasının diğerlerinden hızlı olduğu belirlenmiştir. Ağ eğitimi tamamlandıktan sonra regresyon eğrileri incelenmiştir. Şekil 6’da görüldüğü gibi LM algoritmasının test aşamasındaki MSE değeri 2.0197e-10 olarak bulunmuştur.



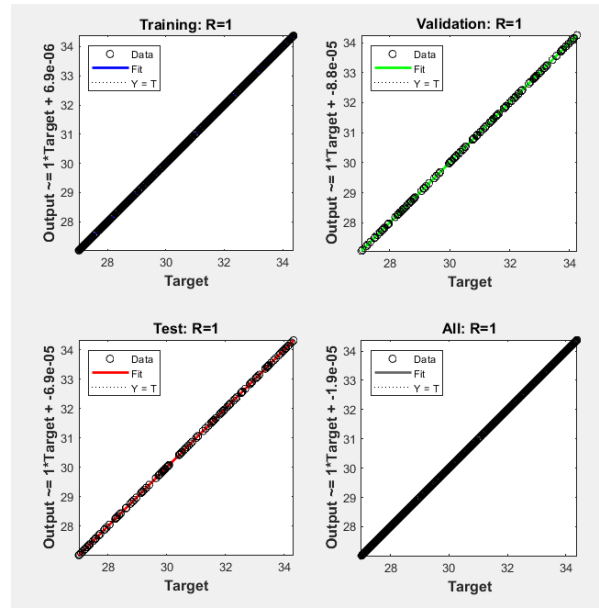
**Şekil 6.** LM algoritmasının kullanılması  
*Figure 6. Using the LM algorithm*

Sinir ağının eğitimi için Matlab nntool ara yüzü kullanılmıştır. Şekil 7’de sistemde kullanılan YSA modeli görülmektedir. Sinir ağı modelinde gizli katman aktivasyon fonksiyonu tan-sigmoid fonksiyonu ve çıkış katmanı aktivasyon fonksiyon doğrusal fonksiyon olarak belirlenmiştir. Gizli katman nöron sayısı deneme yanılma yöntemi ile hesaplanmıştır ve 10 olarak seçilmiştir. YSA’nın performansı ortalama kare hata göz önünde bulundurularak seçilmiştir.



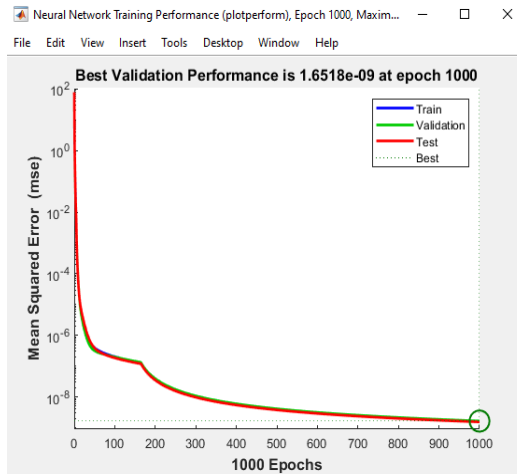
Şekil 7. YSA modeli  
Figure 7. The ANN model

Şekil 8’de verilen LM algoritmasına ait regresyon analiz sonuçlarına bakıldığında modelin tüm durumlarında R=1 değeri ile oldukça iyi sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 8. Regresyon eğrileri  
Figure 8. Regression curves

Şekil 9’da YSA’nın eğitim performansı gösterilmiştir. YSA’nın eğitim performansında ortalama kare hata değerinin iterasyon sayısı arttıkça, azaldığı görülmektedir. İyi eğitilmiş bir YSA’da ortalama kare hatanın çok düşük olması gerekmektedir.



Şekil 9. Sinir ağının eğitim performansı  
Figure 9. Training performance of neural network

Ağ eğitimi tamamlandıktan sonra matlab simulinkte FV sistem tasarımı yapılmıştır. Simulinkte kullanılan FV panelin özellikleri Tablo 2’de, tasarlanan sistemde kullanılan elemanların değerleri ise Tablo 3’de gösterilmiştir.

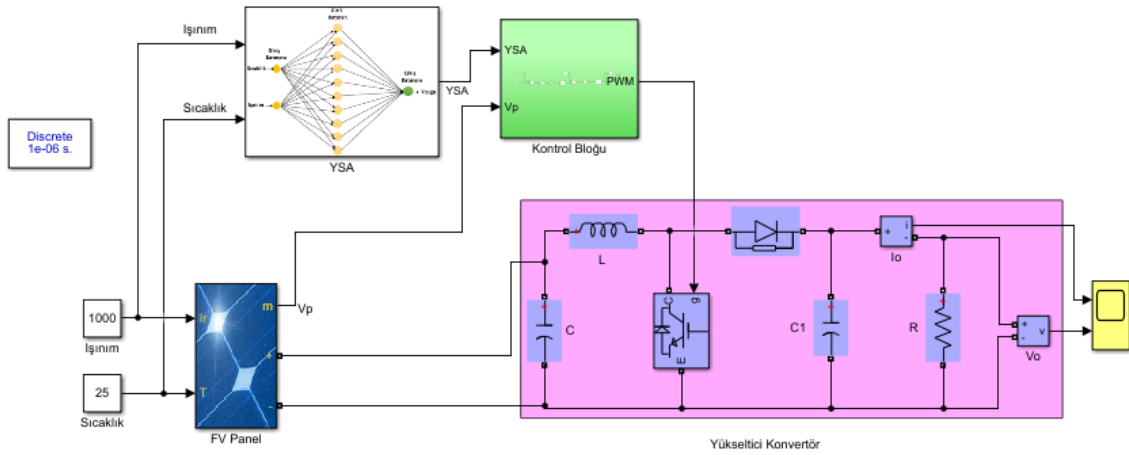
**Tablo 2.** FV panel özellikleri  
*Table 2. PV panel specifications*

Parametre	Değer
Paralel dizi sayısı	1
Dizi başına seri bağlı modül sayısı	1
Maksimum güç değeri	250.205 W
Açık devre gerilimi- $V_{OC}$	37.3 V
Kısa devre akımı- $I_{SC}$	8.66 A
Modül başına hücre sayısı	60
Maksimum güç noktası gerilimi- $V_{mp}$	30.7 V
Maksimum güç noktası akımı- $I_{mp}$	8.15 A
$V_{OC}$ 'nin sıcaklık katsayısı	-0.36901
$I_{SC}$ 'nin sıcaklık katsayısı	0.086998

**Tablo 3.** Sistemde kullanılan elemanların değerleri  
*Table 3. The values of the elements used in the system*

Parametre	Değer
Kondansatör	470 $\mu$ F
Kondansatör	1200 $\mu$ F
İndüktans	2.5 mH
Direnç	20 $\Omega$
Frekans	5 kHz

Tasarlanan sistemin MATLAB/Simulink Modeli Şekil 10’da gösterilmiştir.



**Şekil 10.** YSA tabanlı MGNİ simulink modeli  
*Figure 10. ANN based MPPT simulink model*

### 3.Bulgular

#### 3. Results

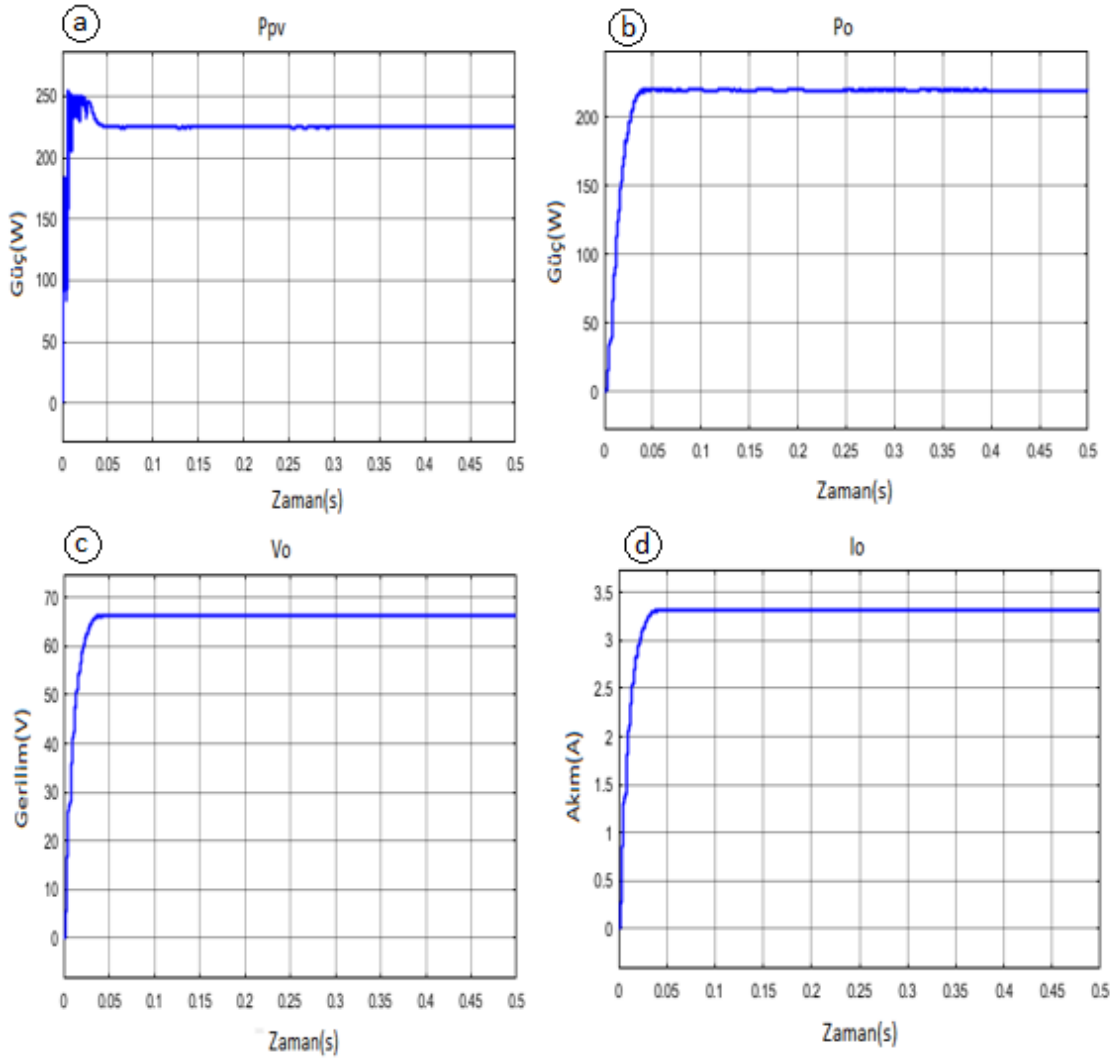
Bu çalışmada farklı sıcaklık, ışınım ve yük değerleri için Simulink/MATLAB’da simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

Işınım değerinin 1000 W/m<sup>2</sup>, sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 20 $\Omega$  olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 11 (a)’da gösterilmektedir. Bu durumda çıkış gücü 225.1W olarak elde edilmiştir. Aynı

durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış gerilimi ve çıkış akımı ise sırasıyla Şekil 11 (b), (c) ve (d)'de verildiği gibidir. Tablo 4'te fotovoltaik panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri verilmektedir.

**Tablo 4.** Sabit ışınım ve sıcaklık için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri  
**Table 4.** PV panel and boost converter output values for constant radiation and temperature

Parametre	Değer
Fotovoltaik panel çıkış gücü	225.1 W
Yükseltici konvertör çıkış gücü	220.9 W
Yükseltici konvertör çıkış gerilimi	66.47 V
Yükseltici konvertör çıkış akımı	3.323 A



**Şekil 11.** Işınım değerinin  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , sıcaklık değerinin  $25^\circ\text{C}$  ve direnç değerinin  $20\Omega$  olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

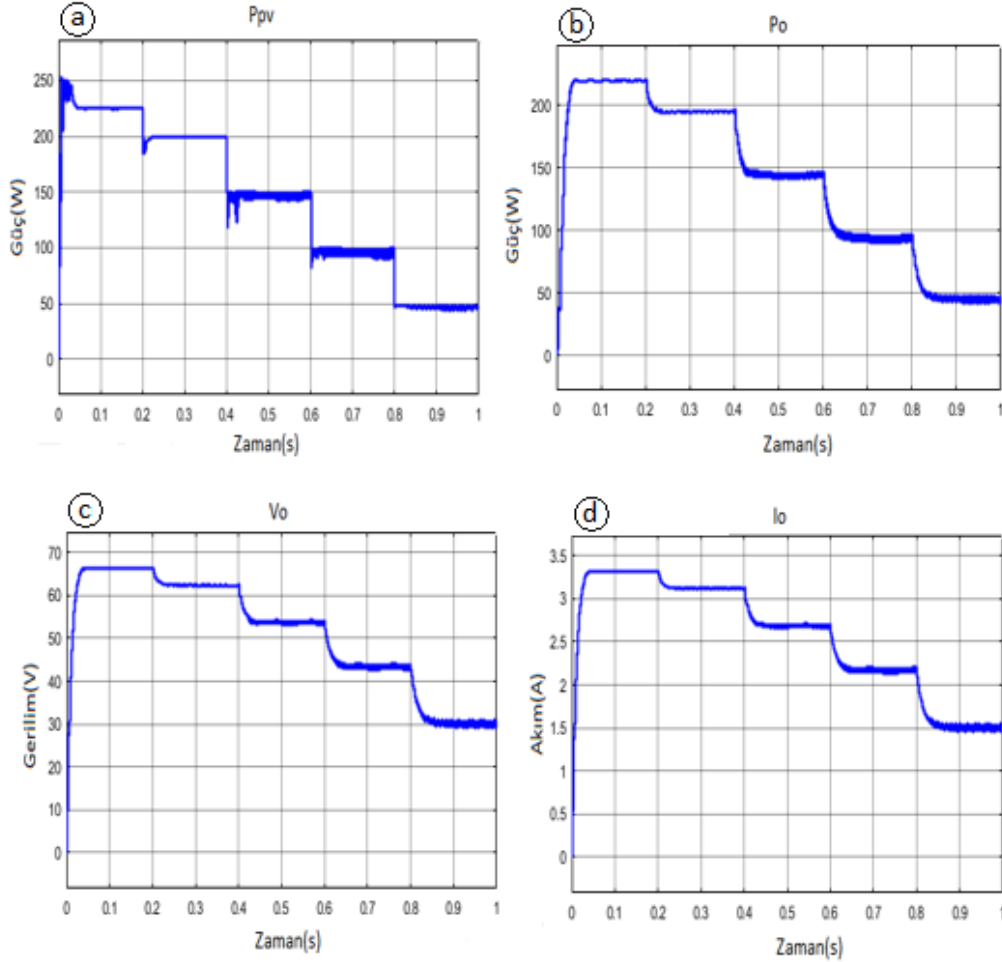
**Figure 11.** For the case where the irradiance value is  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , the temperature value is  $25^\circ\text{C}$  and the resistance value is  $20\Omega$  (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

Şekil 11'deki güç değerleri baz alınarak ve Denklem 7 kullanılarak sistem verimi %98 olarak hesaplanmıştır.

$$\eta\% = 1 - \frac{P_{max} - P_{max} \cdot \eta}{P_{max}} \quad (7)$$



Işınım değerlerinin sırasıyla 1000-800-600-400-200 W/m<sup>2</sup>, sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 20Ω olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 12 (a)'da gösterilmektedir. Işınım değeri azaldıkça panel gücünde azalmaktadır. Aynı durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış gerilimi ve çıkış akımı ise sırasıyla Şekil 12 (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir. Şekil 12 (b)'de görüldüğü gibi ışınım değerleri belirli bir süre zarfında azaltıldığında çıkış gücünde azalma görülmektedir. Çünkü ışınım değeri azaldıkça yükseltici konvertörün Şekil 12 (c) ve (d)'de görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri de azalmaktadır. Akım değerleri ışınımın azalmasına paralel olarak azalmaktadır.



**Şekil 12.** Işınım değerlerinin sırasıyla 1000-800-600-200 W/m<sup>2</sup>, sıcaklık değerinin 25°C ve direnç değerinin 20Ω olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

**Figure 12.** For the case where the irradiance values are respectively 1000-800-600-200 W/m<sup>2</sup>, the temperature value is 25°C and the resistance value is 20Ω (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

Tablo 5'te FV panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri listelenmektedir.

**Tablo 5.** Değişken ışımaya durumu için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri

**Table 5.** PV panel and boost converter output values for variable radiation

Parametre	1000	800	600	400	200
FV panel çıkış gücü	225.1	199.1	150.6	99.25W	46.98W
Yükseltici konvertör çıkış	220.9	195.5	146.9	95.96 W	45.75 W
Yükseltici konvertör çıkış	66.47	62.53	54.2 V	43.81 V	30.25 V
Yükseltici konvertör çıkış	3.323	3.126	2.71A	2.19 A	1.513 A

Ayrıca, Denklem 7 kullanılarak, farklı ışınma durumları için hesaplanan verim değerleri, Tablo 6'da görülmektedir.

**Tablo 6.** Farklı ışınma durumları için verim değerleri  
**Table 6.** Efficiencies for different radiation values

Işınma değeri (W/m <sup>2</sup> )	Verim
200	97
400	96
600	97
800	98
1000	98

Işınım değerlerinin 1000W/m<sup>2</sup>, sıcaklık değerlerinin sırasıyla 25-30-35-40-45°C ve direnç değerinin 20Ω olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 13'te gösterilmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak panel güç çıkışı azalmaktadır. Aynı durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış akımı ve çıkış gerilimi ise sırasıyla Şekil 13 (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir.

Tablo 7'de ışınım değerinin 1000W/m<sup>2</sup> ve sıcaklık değerlerinin ise değişken olduğu durum için FV panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri verilmiştir.

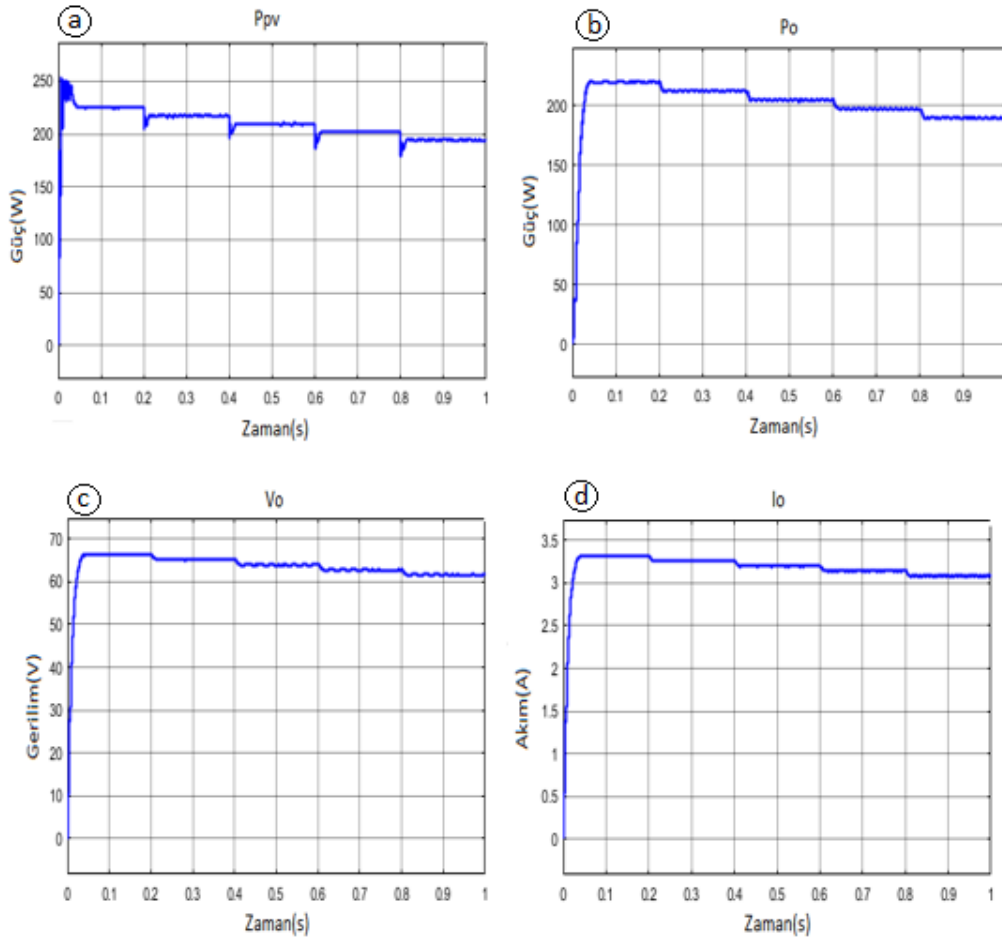
**Tablo 7.** Farklı sıcaklık değerleri için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri  
**Table 7.** PV panel and boost converter output values for different temperature values

Parametre	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
FV panel çıkış gücü	225.1W	217.4W	209.7W	202.1W	194.6W
Yükseltici konvertör çıkış	220.9W	213.3W	205.7W	198.1W	190.7W
Yükseltici konvertör çıkış	66.47V	65.31V	64.14V	62.95V	61.76V
Yükseltici konvertör çıkış	3.323A	3.265A	3.207A	3.148A	3.088A

Sıcaklık değerinin artması panel çıkış gücünü azaltmaktadır. Ayrıca sıcaklık arttıkça konvertör çıkış gerilimi ve çıkış akımı da azalmaktadır. Buna bağlı olarak, yükseltici konvertörün çıkış gücü de azalmaktadır. Ayrıca, Denklem 7 kullanılarak, farklı sıcaklık durumları için hesaplanan verim değerleri, Tablo 8 ile verilmektedir.

**Tablo 8.** Farklı sıcaklık durumları için verim değerleri  
**Table 8.** Efficiencies for different temperature values

Sıcaklık değeri (°C)	Verim
25	98
30	98
35	97
40	96
45	97



**Şekil 13.** Işınım değerinin  $1000\text{W/m}^2$ , sıcaklık değerlerinin sırasıyla  $25\text{-}30\text{-}35\text{-}40\text{-}45^\circ\text{C}$  ve direnç değerinin  $20\Omega$  olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

**Figure 13.** For the case where the irradiance value is  $1000\text{W/m}^2$ , the temperature values are  $25\text{-}30\text{-}35\text{-}40\text{-}45^\circ\text{C}$  and the resistance value is  $20\Omega$  (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

Şekil 13 (a) incelendiğinde, belirli aralıklarla sıcaklık değeri arttırıldıkça çıkış gücünde azalma görülmektedir. Çıkış gerilimi ve çıkış akımı azalmaktadır. Çünkü sıcaklık değeri arttırıldıkça yükseltici konvertörün Şekil 13 (c) ve (d)'de görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri de azalmaktadır.

Işınım değerinin  $1000\text{W/m}^2$ , sıcaklık değerlerinin  $25^\circ\text{C}$  ve direnç değerinin  $50\Omega$  olarak belirlendiği durumda FV panelin güç çıkışı Şekil 14 (a)'da gösterilmektedir. Bu durumda FV panel güç çıkışı  $107\text{W}$  olarak elde edilmiştir. Aynı durum için, yükseltici konvertörün güç çıkışı, çıkış gerilimi ve çıkış akımı Şekil 14 (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir.

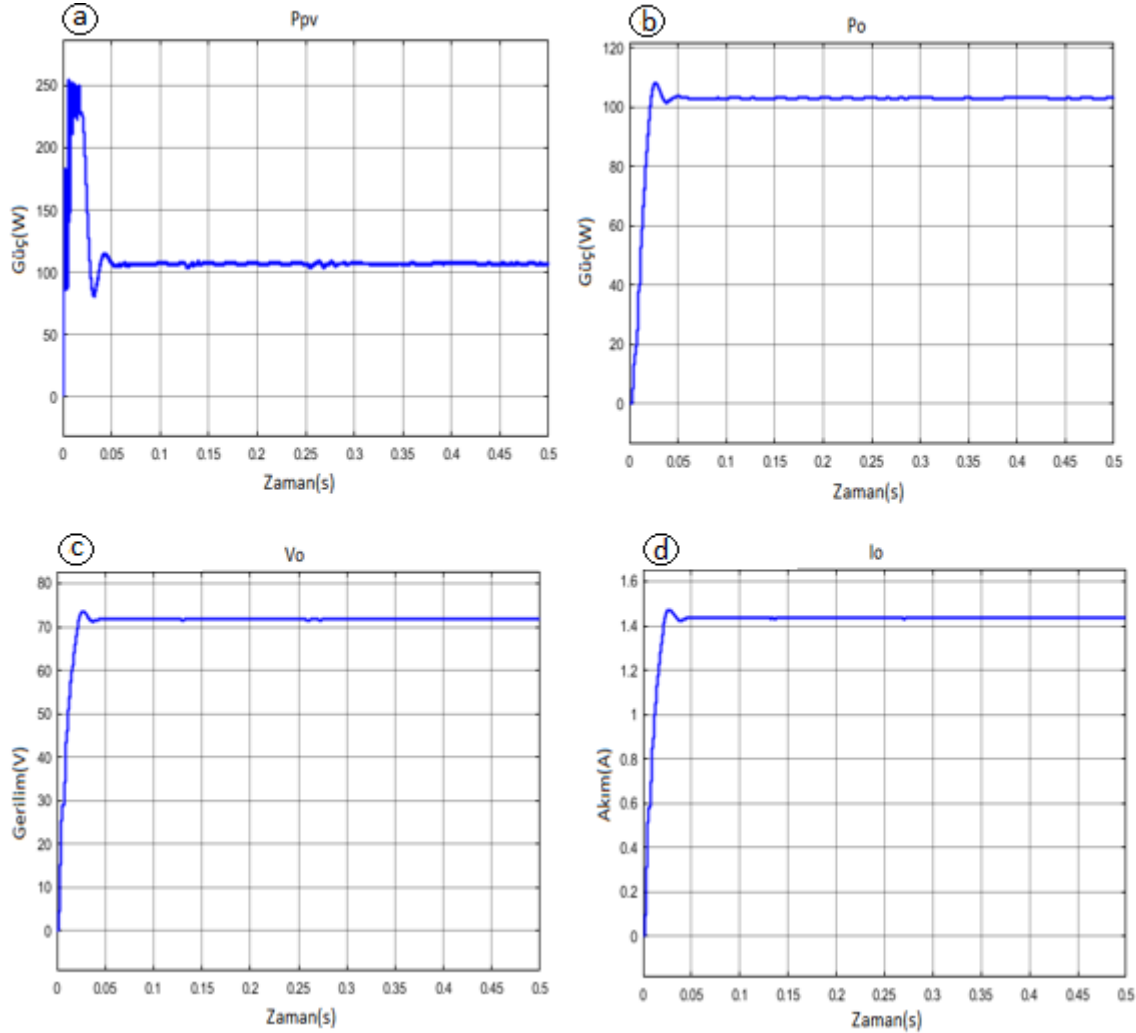
Tablo 9'da  $50\Omega$  yük için FV panel çıkış gücü, yükseltici konvertörün çıkış gücü, çıkış gerilimi ve çıkış akım değerleri verilmiştir.

**Tablo 9.**  $50\Omega$  yük için FV panel ve yükseltici konvertör çıkış değerleri  
**Table 9.** Photovoltaic panel and boost converter output values for  $50\Omega$  load

Parametre	Değer
Fotovoltaik panel çıkış gücü	107.8 W
Yükseltici konvertör çıkış gücü	103.2 W
Yükseltici konvertör çıkış gerilimi	71.82 V
Yükseltici konvertör çıkış akımı	1.436 A

Sistemdeki yükün artmasına bağlı olarak konvertör çıkışındaki gerilim ve akım azalmaktadır. Buna bağlı olarak konvertör çıkışındaki güç değeri de azalmaktadır. Bu durum için verim değeri  $\eta\%=95$  hesaplanmıştır.

Şekil 14 (c)'de görüldüğü gibi çıkış gerilimi, artan yük ile ve çıkış güç ve çıkış akımındaki azalmaya bağlı olarak azalmaktadır. Bu durumda, yükseltici konvertörün çıkış gücü 103W, çıkış gerilimi 71.8V, çıkış akımı ise 1.43A olarak elde edilmiştir.



**Şekil 14.** Işınım değerinin  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , sıcaklık değerinin  $25^\circ\text{C}$  ve direnç değerinin  $50\Omega$  olduğu durum için (a) FV panel güç çıkışı, yükseltici konvertörün (b) güç çıkışı (c) çıkış gerilimi ve (d) çıkış akımı.

**Figure 14.** For the case where the irradiance value is  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , the temperature value is  $25^\circ\text{C}$  and the resistance value is  $50\Omega$  (a) PV panel power output, (b) power output (c) output voltage and (d) output current of the boost converter.

#### 4. Tartışma ve sonuçlar

##### 4. Discussion and conclusions

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek amacıyla FV sistemlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Fakat bu sistemler sıcaklık, ışınım, rüzgar, hava kirliliği vb. birçok faktörden etkilenmektedir. Değişen faktörlere bağlı olarak FV sistemin çıkış gücünde de değişim meydana gelmektedir. Bu değişimler sırasında MGN'yi bulmak önemli bir sorun oluşturmuştur. Çünkü sistemin MGN'de çalıştırılması verimi büyük ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden FV sistemler verimliliklerinin artırılması için MGN etrafında çalıştırılmalıdır. MGN'nin kontrolü için birçok algoritma kullanılmaktadır. Bu algoritmalarda giriş değişkeni olarak açık devre gerilimi, kısa devre akımı, ışınım şiddeti, rüzgar hızı, modülün sıcaklığı gibi faktörler kullanılabilir. Ayrıca bu MGN yöntemleri karmaşıklık, maliyet, kararlılık durumu, yakınsama vb. birçok açıdan farklı özelliklere sahiptir.

MGNİ algoritmalarının kullanılması sistem verimini etkileyen en önemli unsurdur. Bu nedenle sistemin tasarım aşamasında kullanılacak MGNİ algoritması önem kazanmaktadır. Eşit dağılımlı ışıma koşullarında geleneksel yöntemlerin verimleri yüksektir. Ancak farklı ışınım koşullarında bu yöntemler düşük yakınsama hızına sahiptir ve dinamik cevapları yavaştır. Akıllı yöntemler, matematiksel hesaplamalara bağımlı olmadan sistemi daha basit yapmaktadır. Ayrıca verilerin depolanabilip, algılanabilmesiyle izleme hızları artmaktadır. Bu yöntemler kısmi gölgelenme koşullarında MGN'yi izlemek için uygun tekniklerdendir.

Bu çalışmada, akıllı MGNİ yöntemlerinden biri olan, YSA kullanılarak bir FV sistem MGN etrafında çalıştırılmış ve maksimum güç elde edilmiştir. YSA'nın eğitimi için gerekli olan veriler Matlab programından elde edilmiştir. 1000 farklı ışınım ve sıcaklık değeri için elde edilen  $V_{mgn}$  değerleri YSA eğitiminde kullanılmıştır. Bu uygulamada eğitim için verilerin %70'i eğitim aşaması, %15'i geçerlilik aşaması ve %15'i test aşaması için kullanılmıştır. Bu eğitimde LM, BR ve SCG algoritmalarının tahmin performansları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

YSA oluşturulurken gizli katman nöron sayısı deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmiş ve performansın yüksek olduğu YSA modeli seçilmiştir. YSA için öğrenme algoritması belirlenirken ortalama kare hatası göz önünde bulundurulmuştur. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan geleneksel MGNİ teknikleri ile YSA tabanlı MGNİ tekniği karşılaştırıldığında, ışıma ve sıcaklık değişimlerinin sık yaşandığı durumlarda, YSA kontrolörünün enerji kaybını azaltarak, tüm sistem verimini arttırdığı görülmüştür. Bunun yanında YSA kontrolörün kullanılmasıyla MGN etrafındaki dalgalanmalar da ortadan kaldırılmıştır.

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında MGNİ kontrolüne dayalı YSA performansı, farklı sıcaklık ve ışınım değerlerinde FV sistemin MGN'ye ulaşmasında etkili olduğu görülmüştür.

Geleneksel MGNİ yöntemleri düşük yakınsama hızına sahiptir ve çevresel koşulların ani değişiminde dinamik cevapları yavaştır. Bu nedenle geleneksel MGNİ yöntemlerinin bu dezavantajları ile başa çıkmak için bu yöntemler, akıllı yöntemler ve optimizasyon yöntemleriyle birleştirilerek hibrit yöntemler oluşturulmaktadır. FV sistemin MGN'yi izleme süresi, yakınsama hızı, salınım süresi vb. parametreler dikkate alındığında hibrit yöntemlerin verimlilikleri daha yüksektir. Bu nedenle FV sistemlerin statik ve dinamik performanslarını daha iyi hale getirmek için hibrit MGNİ yöntemleri kullanılabilir.

### **Teşekkür / Katkı belirtme**

#### *Acknowledgement*

Bu makale Leyla Karagözoğlu'nun yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

### **Yazar katkısı**

#### *Author contribution*

Leyla Karagözoğlu: Verilerin oluşturulması, makale yazılması.

Zeynep Bala Duranay: Sonuçların yorumlanması, makale yazılması.

### **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*

- Berrera, M., Dolara, A., & Leva, S. (2009). *Experimental test of seven widely adopted MPPT algorithms*. 2009 Bucharest PowerTech Conference (ss. 1-8). Bucharest, Romania: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5282010>
- Bouakkaz, M. S., Boukadoum, A., Boudebouz, O., Attoui, I., Boutasseta, N., & Bouraiou, A. (2020). *Fuzzy logic based adaptive step hill climbing MPPT algorithm for PV energy generation systems*. 2020 International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT-1441) (ss. 1-5). Tabuk, Saudi Arabia: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIT-144147971.2020.9213737>
- Chy, D. K., & Khaliluzzaman, M. (2015). *Experimental assessment of PV arrays connected to buck-boost converter using MPPT and Non-MPPT technique by implementing in real time hardware*. 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE) (ss. 306-309). Dhaka, Bangladesh: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2015.7506856>
- Çoruh, N., Erfidan, T., & Ürgün, S. (2008). DA-DA Boost Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik- Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)* (pp. 362-365), Bursa.
- Dadfar, S., Wakil, K., Khaksar, M., Rezvani, A., Miveh, M. R., & Gandomkar, M. (2019). Enhanced control strategies for a hybrid battery/photovoltaic system using FGS-PID in grid-connected mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 14642-14660. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.174>
- Divyasharon, R., Narmatha Banu, R., & Devaraj, D. (2019). *Artificial neural network based MPPT with cuk converter topology for PV systems under varying climatic conditions*. 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS) (ss. 1-6). Tamilnadu, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/INCOS45849.2019.8951321>
- Duranay, M., Turmus, A., & Tanyildizi, V. (2021). Experimental efficiency analysis of a solar panel electricity generation system using planar reflection. *IET Renewable Power Generation*, 15(3), 521-531. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12012>
- Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2019). *Modelling and simulation of a single phase standalone PV system*. 2019 International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) (ss. 1-6). Pitesti, Romania: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECAI46879.2019.9041997>
- Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2020). Voltage controlled boost converter-inverter system for photovoltaic applications. *Turkish Journal of Science and Technology*, 15(2), 85-92.
- Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2021). Fuzzy logic based maximum power point tracking for photovoltaic systems. *2021 International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automatics and Informatics of the Republic of North Macedonia (ETAI)* (ss. 95-101), Macedonia.
- Elaissaoui, H., Zerouali, M., Ougli, A. E., & Tidhaf, B. (2020). *MPPT algorithm based on fuzzy logic and artificial neural network (ANN) for a hybrid solar/wind power generation system*. 2020 International Conference On Intelligent Computing in Data Sciences (ICDS) (ss. 1-6). Fez, Morocco: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDS50568.2020.9268747>
- Fathi, M., & Parian, J. A. (2021). Intelligent MPPT for photovoltaic panels using a novel fuzzy logic and artificial neural networks based on evolutionary algorithms. *Energy Reports*, 7, 1338-1348. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.02.051>
- Gani, A., Açıkgöz, H., & Şekkel, M. (2020). Fotovoltaik sistemlerde değişken yük ve güneş ışınımı altında sinirsel-bulanık denetleyici ile maksimum güç noktası takibi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19, 734-745.
- Gani, A. (2021). Improving dynamic efficiency of photovoltaic generation systems using adaptive type 2 fuzzy- neural network via EN 50530 test procedure. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 49(11), 3922-3940.
- Gündoğdu, A., & Çelikel, R. (2020). ANN-based MPPT algorithm for photovoltaic systems. *Turkish Journal of Science & Technology*, 15(2), 101-110.

- Hart, G. W., Branz, H. M., & Cox Iii, C. H. (1984). Experimental tests of open-loop maximum-power-point tracking techniques for photovoltaic arrays. *Solar Cells*, 13(2), 185-195. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(84\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0379-6787(84)90008-5)
- Hasson, U., Nastase, S. A., & Goldstein, A. (2020). Direct fit to nature: An evolutionary perspective on biological and artificial neural networks. *Neuron*, 105(3), 416-434. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.12.002>
- Hsiao, Y. T., & Chen, C. H. (2002). *Maximum power tracking for photovoltaic power system*. 2002 IEEE Industry Applications Conference (ss. 1035-1040). Pittsburgh, PA, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042685>
- Ibrahim, A., Jin, X., Dai, X., Sarhan, M. A., Shafik, M. B., & Zhou, H. (2019). Artificial neural network based maximum power point tracking for PV sytems. *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference* (ss. 6559-6564), Guangzhou, China.
- Joshi, P., & Arora, S. (2017). Maximum power point tracking methodologies for solar PV systems—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1154-1177. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.019>
- Jyothy Lakshmi, P. N., & Sindhu M. R. (2018). An artificial neural network based MPPT algorithm for solar PV sytem. *4th International Conference on Electrical Energy Sytems (ICEES)* (ss. 375-380), Chennai, India.
- Karagözoğlu, L., & Duranay, Z. B. (2021). Fotovoltaik panel performansını etkileyen faktörlerin incelenmesi. *2021 2nd International Baku Conference on Scientific Research* (ss. 218-228), Baku.
- Kobayashi, K., Matsuo, H., & Sekine, Y. (2004). *A novel optimum operating point tracker of the solar cell power supply system*. 2004 IEEE Power Electronics Specialists Conference (ss. 2147-2151). Aachen, Germany: IEEE. <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355451>
- Köse, E. (2018). Fotovoltaik sistemlerin maksimum güç noktasında çalıştırılması. *Dünya Multidisipliner Araştırmalar Dergisi*, 2018(1), 8-27.
- Kurak, E., Erdemir, V., & Dursun, B. (2016). PV sistemin için maksimum güç noktası izleyicisi tasarım ve uygulanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 581-592.
- Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B., & Kang, Y. (2008). A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), 2622-2628. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.920550>.
- Liu, Y., Li, M., Ji, X., Luo, X., Wang, M., & Zhang, Y. (2014). A comparative study of the maximum power point tracking methods for PV systems. *Energy Conversion and Management*, 85, 809–816. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.049>
- Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327.
- Makhloufi, M. T., Khireddine, M. S., Abdessemed, Y., & Boutarfa, A. (2014). Tracking power photovoltaic sytem using artificial neural network control strategy. *I.J. Intelligent Sytems and Applications*, 6(12), 17-26.
- Öztemel, E. (2003). *Yapay sinir ağları*. Papatya yayıncılık.
- Safari, A., & Mekhilef, S. (2010). Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1154–1161. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2048834>
- Seyedmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T. K., Rahmani, R., Oo, A. M. T., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2016). State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 435–455. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.053>
- Sreekanth, S., & Raglend, I. J. (2012). *A comparative and analytical study of various incremental algorithms applied in solar cell*. 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET) (ss. 452-456). Nagercoil, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCEET.2012.6203876>
- Wasynezuk, O. (1983). Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 9, 3031-3037. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.318109>

## Implementing data warehouse infrastructure for an e-learning system

*Uzaktan eğitim sistemi için veri ambarı altyapısının geliştirilmesi*

İhsan GÜNEŞ\*<sup>1</sup> , Mustafa Kemal BİRGİN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Eskisehir Technical University, Open and Distance Education Application and Research Center, 26555, Eskişehir

<sup>2</sup>Anadolu University, Open and Distance Education Faculty, 26000, Eskişehir

• Received: 19.01.2023

• Accepted: 23.06.2023

### Abstract

The use of a data warehouse (DW) in e-learning applications helps us evaluate students from different perspectives. Depending on user behavior, we may change the content or appearance of the e-learning platform to achieve the best results. The aim of this study is to build a data warehouse infrastructure, which is a central information system for Anadolu University's distance education system. Thanks to the data warehouse project, all learners' activities in the Learning Management System (ÖYS: Anadolium e-Kampüs) will be recorded regularly. Various analytical reports were obtained about students' study styles, preferred e-learning resources, and the time spent in the system. Additionally, the data warehouse system regularly pulls information from other information systems, such as the student information system related to the open education system. Data warehousing is designed to combine data from multiple sources into a single unified view, rather than performing operational operations like a database. Generally, data warehouses are used for analytical processing as opposed to transaction processing. They are used to analyze historical data and trends, as well as to identify patterns and insights that can aid in informing business decisions. When analysis and reporting is done in a different environment using data warehousing, there is no additional load on the database, which is already busy with daily operational processes. The data warehouse has made it easy to obtain student analytics for various periods, including daily, monthly, and yearly. The reports provided through this infrastructure are used in studies to increase the quality of the LMS system.

**Keywords:** Data analytics, Data mining, Data warehouse, Open and distance learning

### Öz

*E-öğrenme sistemlerinde veri ambarı (DW) kullanımı, öğrencilerin çeşitli açılardan değerlendirilmesine yardımcı olur. En iyi sonuçları elde etmek için, e-öğrenme platformunun içeriğini veya tasarımını kullanıcı davranışına göre değiştirebiliriz. Bu çalışmanın amacı, üniversitenin uzaktan eğitim programının ana bilgi sistemi olarak hizmet verecek bir veri ambarı altyapısını oluşturmaktır. Veri ambarı altyapısı sayesinde öğrencilerin öğrenim yönetim sistemindeki (ÖYS: Anadolium e-Kampüs) tüm etkinlikleri rutin olarak kayıt altına alınmaktadır. Öğrencilerin çalışma stilleri, tercih edilen e-öğrenme kaynakları ve sistemde harcanan zamanla ilgili çeşitli analitik raporlar almak mümkün olacaktır. Veri ambarı sistemi ayrıca açıköğretim sistemi ile ilgili öğrenci bilgi sistemi gibi diğer bilgi sistemlerinden de düzenli olarak veri çekmektedir. Veri ambarı, veritabanı gibi anlık operasyonel işlemleri yapmak yerine birden çok kaynaktan gelen verileri, tek bir birleşik görünümünde birleştirmek için tasarlanmıştır. Genel olarak, veri ambarları, işlem işleme yerine analitik işleme için kullanılır. Geçmiş verileri ve eğilimleri analiz etmenin yanı sıra iş kararlarını bilgilendirmeye yardımcı olabilecek modelleri ve görüşleri belirlemek için kullanılırlar. Veri ambarı kullanılarak analiz ve raporlama işlemleri farklı bir ortamda yapıldığında, günlük operasyonel işlemler ile meşgul olan veri tabanı üzerine daha fazla yük getirilmemiş olur. Veri ambarı, günlük, aylık ve yıllık dahil olmak üzere çeşitli zaman dilimleri için öğrenci analitiği elde etmeyi kolaylaştıracaktır. Bu altyapı üzerinden sağlanan raporlar ÖYS sisteminin kalitesini artırmak amacıyla yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır.*

**Anahtar kelimeler:** Veri analitiği, Veri madenciliği, Veri ambarı, Açık ve uzaktan eğitim sistemi

\* İhsan GÜNEŞ; igunes@eskisehir.edu.tr



## 1. Introduction

There are approximately 3 million students, greater than 1 million active, in the Anadolu University Open Education System. Most of these active students use the LMS web and mobile applications. Student movements are stored independently in LMS and mobile application databases. In addition, data, such as the courses taken by the student, success grades and profile information, are also kept in the student information system. Apart from this, applications are related to many LMS systems, such as help desks, e-learning material tracking systems and gamification applications. There is no direct relationship between the information held in these systems. For example, to measure the effects of e-learning material on student success, data from LMS and student information systems should be taken separately, and a relationship should be established in a different database. Apart from this, in the current situation, when the LMS system is changed, there is no relation between the data in the old LMS system and the new one. In this case, data continuity will be lost because the data of the old and new LMS will be stored in different databases and the data structures will be different; therefore, it may not be possible to merge the data. Analyzing and reporting processes including past years may not be done correctly. Therefore, the data to be used in analytical and reporting processes should be stored in a data warehouse structure in a certain format instead of in operational databases. To solve all these problems, a data warehouse infrastructure is needed to establish the relationship between the LMS system and other information systems and to store the desired data in a certain format over the years.

Data warehouse and database are two different data storage methods. Data warehousing is the design and implementation of processes, tools, and facilities to manage and distribute complete, timely, accurate, and understandable information for decision making. It encompasses all the actions that make it possible for an organization to establish, operate, and maintain a data warehouse or data mart. In addition, a data warehouse is frequently understood to be an architecture that integrates data coming from a wide variety of sources in order to provide support for analytical reports, structured and/or unstructured queries, and decision-making processes. Data warehousing accesses disparate data sources, cleans, filters, and transforms it, and stores it in an easy-to-use format. Data are queried, reported, and analyzed. Thus, transaction-oriented operational environments have varied access, use, technology, and performance requirements. In data warehousing, historical data analysis requires a lot of data. Data analysis programs must scan large amounts of data, which could slow operational applications. To reduce operational conflicts and performance degradation, the two environments must be separated (Chuck et al., 1998, Golfarelli et al., 1998).

A database is a structured collection of data for efficient retrieval and management. Databases can handle everything from data entry forms to enterprise-level solutions. Operational applications that need real-time data access store data in databases designed for read write, update and delete activities. Data warehouse and databases differ mostly in purpose and design. Data warehouses support business intelligence and store massive amounts of historical data for analysis, while databases support operational applications and hold current, often updated transactional data. Data warehouses use denormalized data structures for read-intensive queries, whereas databases use normalized data structures for both read and write operations. As a consequence of this, databases are typically employed for the processing of operational transactions, while data warehouses are used for report generation.

In this study, data analytic operations were performed on a data warehouse. Data warehousing and data analytics are related but distinct data management concepts. In data analytics, data sets are analyzed to draw conclusions. Data analytics on a data warehouse involves using advanced techniques and tools to extract insights and value from large volumes of structured and semi-structured data stored in a data warehouse. Data analytics on a data warehouse can help organizations gain a deeper understanding of their operations, identify trends and patterns, make informed decisions, and improve business performance. However, the task of a data warehouse is to centrally collect, store and manage very large amounts of data. A data warehouse centralizes enterprise-wide data to improve business intelligence and decision-making.

In the open education system, students are offered many course materials, such as e-books, e-audio books, summary lecture videos, TRT school videos, unit summaries, summary voice-overs, leaf tests, end-of-unit practice exams, one-question and one-answer videos, animation and video tutorials. Based on the need for a learning management system (LMS) that offers open and distance education services as a whole, has a modular structure and provides the highest level of interaction. The Anadolom eKampus system, built on Blackboard learning infrastructure, was put into use in 2016. Later, in 2019, the LMS was developed by the software

developers of the Open Education Faculty. As mentioned above, different LMS systems have been used in e-learning processes. However, since the data related to the LMS were not collected in a central data warehouse, a relationship could not be established between the old data and the new data in case of switching LMS software. Since the data of previous years resided in the database of the old LMS and the data structure of the new LMS was different, merging of data was not possible. Thus, there were difficulties in preparing reports and analyses that included historical data.

The educational data warehouse collects a lot of data such as student profile, demographics, class attendance or data about activities intended to influence student outcomes, which are recorded within universities' information systems, repositories of learning management systems (LMSs), communication/collaboration platforms, or separate files created by the teaching staff (Gladić & Petrovački, 2021). The educational data warehouse developed within the scope of this study stores many student and course data such as web and mobile lms access, material access, course access, trial exam results, forum data, course enrollments, demographics, course information and course material information.

The main purpose of this study is to collect all student, instructor, and staff movements in the learning management system and other related information systems in a certain format. Then, in the data warehouse, the requested analytical reports are regularly created based on the accumulated data. These reports can include different analytics, such as material usage frequencies, student interactions, and the relationship between LMS system usage and student success. In this context, there is a need for tools to help monitor and measure the activities performed by all students to evaluate the effectiveness of e-learning actions and the structure of the courses. One of the technologies that can be used to meet this need is data warehouse technology. Unlike the LMS database, whose sole purpose is to support the operation of the application, all information in the data warehouse must be consistent, organized, and standardized. Therefore, a data warehouse that follows the dimensional model is necessary to extract the data and retain them after transformation. To this end, the Learning Management System as a data source integrated with the business intelligence tool is a good starting point to provide the answers needed. The true potential of such databases lies in retaining data and hidden patterns. The main concurrent addition for most service providers is the ability to find, understand and use these patterns with intelligent analytics in numerous databases.

The main contributions of this study are listed below:

1. Determining the reports and analyses to be gathered through a meeting with open education system field experts.
2. Determining the information systems from which to pull data based on the needed reports and analyses.
3. Developing the data warehouse infrastructure and executing data extraction, conversion, and loading operations
4. Creating web interfaces for displaying reports to authorized users.

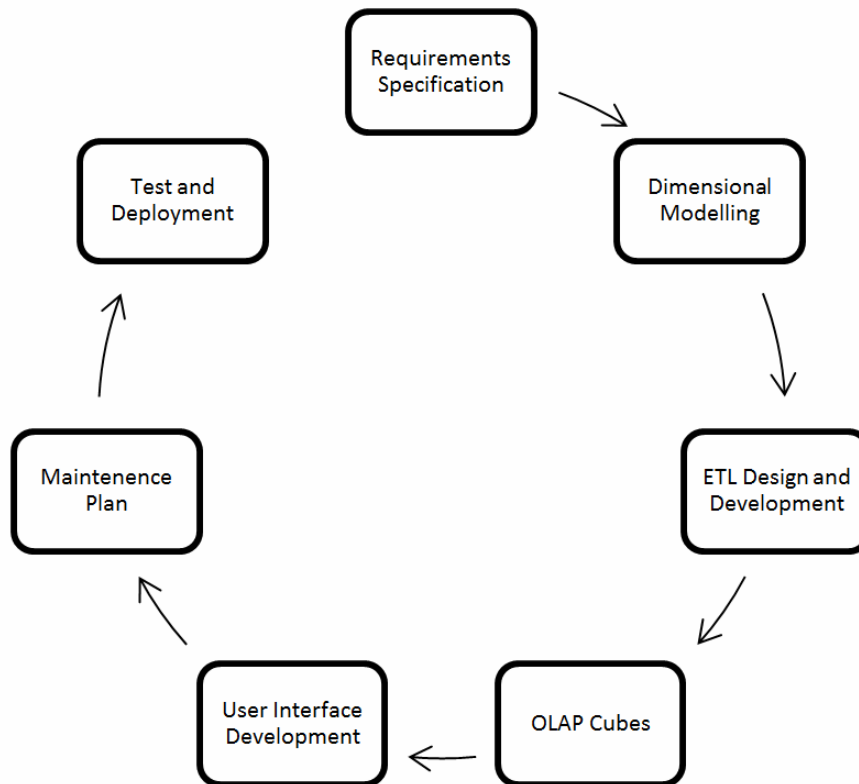
The remainder of the paper is structured as follows. In the next section 2, related studies are reviewed. In Section 3, the e-learning data warehouse design stages are described. We describe technical data warehouse infrastructure in Section 4. Finally, in Section 5, the conclusion and further studies are reported.

## 2. Related work

The data warehouse is the central data storage area where the data stored in the different information systems of the organizations are kept in an organized manner. In addition, since the data in the data warehouse is kept simplified in accordance with the data warehouse's objective, the analysis and reporting processes are more efficient than those in the operational database. A data warehouse is a repository where related data can be queried and analyzed. If the desired queries and reports are created in the data warehouse, the databases of the information systems will not be forced in terms of performance. A data warehouse performs the necessary operations to analyze relevant data easily, fast, and accurately. Data from transactional systems are copied and stored in a data warehouse usefully decision-making. Data and information can be obtained in different information systems and associated with each other. The processes of extracting, transforming, and loading the requested data from information sources are called the ETL Extraction-Transformation-Loading process. The major activities listed below serve as an overview of how these tools work: A dataset is cleaned up based on database and business rules, (a) by identifying relevant information on the source side, (b) by removing that

information, (c) by customizing and integrating information from various sources in a common format, (d) by cleaning the final dataset, and (e) by distributing the data into data warehouses and/or data marts (Simitsis et al., 2005).

Nebi & Mahni (2010) proposed a data warehouse solution for a variety of purposes, including information on LMS system utilization, the degree of institutional adoption, course activity, and monitoring and analysis of platform usage. The authors offer models for a potential data warehouse that would enhance decision-making and offer resources for using OLAP and data warehouse technologies to evaluate and explain outcomes. The authors used the Moodle e-learning system at the University of Rijeka to explain how to develop a functioning data warehouse solution and several associated analyses. The E-learning Data Warehouse Development Lifecycle model created by the authors, is depicted in the picture below in Figure 1.



**Figure 1.** E-learning data warehouse development lifecycle (Nebić & Mahnič, 2010)

According to the authors, the data warehouse development lifecycle steps are described as follows:

- **Requirements specification:** The requirements document, which outlines the questions that must be resolved before the e-learning data warehouse can be considered complete, is the product of the first step of the development process. It usually includes specifying the reports and analyses required to create the data warehouse schema. Student activities by day, month, and year as an example.
- **Dimensional modeling:** A dimensional schema is composed of a central fact table and analytical dimensional tables. Dimensional modeling is creating a multidimensional schema based on user needs analysis and importing it into the base system, which is often a relational database. The dimensional model begins with two different kinds of tables: Fact tables are followed by dimension tables. Fact tables contain metrics, or items that we wish to measure, whereas dimensional tables contain the attributes of the metrics, or descriptions of what is being measured. Each fact table is associated with multiple dimensions, some of which are shared by multiple fact tables, but the dimensions are unrelated.
- **Extraction-Transformation-Loading (ETL) Design and Development:** This includes establishing the data stage schema, specifying the ETL processes, and configuring synchronization settings between the data source and the data warehouse.

- **OLAP Cubes:** The major goal of this phase is to develop and set up online analytical processing (OLAP) cubes needed to supply information for reports. An OLAP cube is a multidimensional data structure that enables the organization and analysis of data based on multiple dimensions or perspectives. OLAP cubes provide quick and versatile data access for analysis and reporting and can be used to answer complex business questions requiring multiple levels of aggregation and drill-down.
- **User interface development:** creates a user interface that enables end users to browse and create reports from data in the data warehouse.
- **Maintenance Plan:** This covers backing up and maintaining the database that makes up the data warehouse.
- **Test and Deployment:** At this stage, the analytics and reports are tested for accuracy and the application is activated.

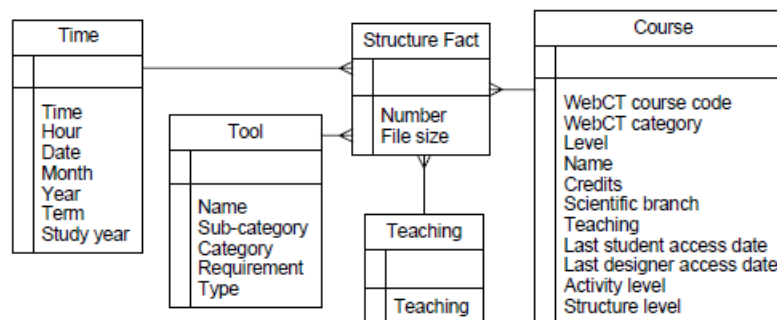
[Goyal & Vohra \(2012\)](#) used data warehousing and data mining methods to increase the efficiency of higher education institutions. Thanks to these methods, they tried to learn student performance and behavior carefully. The authors designed the data warehouse infrastructure in four sections in their studies. These:

- **Data sources:** The operational systems that support the organizations main business operations are where the data in the data warehouse is obtained from. Production data, internal data, external data, and archived data are some examples of the four primary categories of source data that enter the data warehouse.
- **Data preparation:** Operational data are cleaned and transformed at this layer so that they may be stored and quickly retrieved. Data extraction, data transformation, and preparation for loading are the three basic tasks carried out during the data preparation.
- **Data storage:** The data are now kept in the data store. The operational system of a company can only support data that is now available, but, since the data warehouse is designed for large data storage and fast reporting, it will be easier to access historical data.
- **Information distribution:** At this point, a large data warehouse user is given helpful information using various platforms, including online, intranet, internet, and e-mail.

By fusing data from university administration information systems with WebCT learning management system log information, [Solodovikova & Niedrte \(2005\)](#) presented a centralized data warehouse model. The model enables several e-learning points of view. These are for senior management, academic administration, teachers who create courses, and departments in charge of the standard and organization of the educational process. For image definition, measurements characteristic of business functions is suggested. Analysis of measurement results in terms of WebCT usage at the university throughout the study is then presented. [Gladi & Petrovaki \(2021\)](#) present a pilot project of a DWS in the paper to track how well students are meeting course requirements in both traditional and distance learning settings. A DWS that provides data analysis and the generation of numerous reports in the portion of the teaching process that deals with student achievement was developed as part of the project. The analysis findings and information reveal potential drawbacks that must be quickly discovered to minimize the effects. To help teachers, students, and administrators make decisions, [Araque et al. \(2007\)](#) conducted studies on the use of the data warehouse as an integrated module in an e-learning platform. The authors have also demonstrated how OLAP analysis can be used to collect data that will be used to enhance the interaction between teachers and students. The authors wanted to ensure that the e-learning platform automatically adjusted to each student who used it for future studies; therefore, they planned to add adaptive hypermedia concepts into the platform. In a case study conducted at the Catholic University of Murcia, [Cantabella et al. \(2019\)](#) described how student behavior throughout the previous four academic years was examined in relation to learning modalities. To speed up the statistical analysis of the data, statistical and association rule techniques have been employed using a Big Data framework. This is due to the difficulties of managing enormous volumes of user-generated data in the LMS. The Apache Hive data warehouse architecture is used to store data. To swiftly extract the data, the authors used the Hadoop MapReduce technique. Visual analytical approaches were used to demonstrate the obtained results.

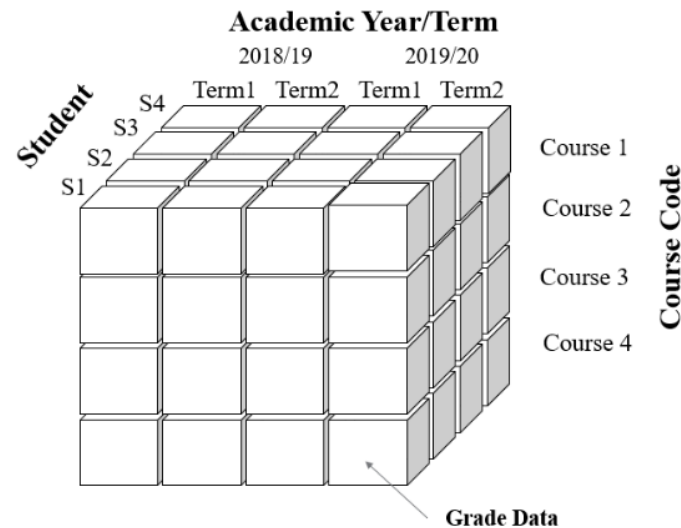
An adaptive e-learning system named AE-LS was proposed by [Janati et al. \(2019\)](#) to track and analyze student behavior. This strategy offers teachers and administrators thorough reports to assess, perform, and evaluate student activities. It enables teachers to see, examine, and explore student behavior to enhance the instruction and reach the best decisions. The authors' research has demonstrated that students spend less time on courses and tutorials and instead prefer to engage in group projects such as participating in forums and virtual classrooms. To develop an analytical model for AE-LS, the authors suggested a data warehouse model implemented in the PostgreSQL database management system (DBMS). All data and analysis concerns addressed by adaptive e-learning systems are handled by the proposed model. The primary goal of the data warehouse system is to gather information from various AE-LS sources that are required to enable analysis and facilitate decision-making. This data warehouse solution allows us to query the data and saves a considerable amount of data cumulatively over the years. To predict student performance in schools, [Kurniawan & Halim \(2013\)](#) created a model that may be used in data warehousing and data mining techniques. The authors examined the correlations between the variables housed in the data warehouse and extracted fundamental information from it using data mining techniques. In the study, it was examined how low-achieving students can benefit from the data mining and data warehouse model, how they can assess the applicability of a course or module, and how the interventions required to improve students' academic performance in schools can be used. Student retention is being used as a gauge for academic success and record management ([Zhang et al., 2010](#)). The authors of the study tracked the student, examined the student's academic behavior, and established a foundation for effective intervention tactics using data mining and natural language processing technologies. The study aims to identify potential issues as soon as feasible and follow-up with alternatives for intervention to improve student retention. The authors talked about how data mining might help students determine their risk status, gauge the applicability of a course or module, and modify necessary interventions to boost student retention.

[Solodovikova & Niedrĭte \(2005\)](#) combined WebCT log files with a university management information system and WebCT data. They suggested storing integrated data in a data warehouse. This study supported senior management, faculty management, course designers, and learning process quality, and planning departments' e-learning opinions. The authors established four viewpoints to determine the indices needed to measure course consumption at different management levels and instructor levels. The authors presented data warehouse star schema information regarding the course structures and application. In their study, the star schema consisted of three fact tables: Structure Fact, Usage Fact, and Activity Fact, which comprise measurements, and of dimensions, which comprise descriptive data.



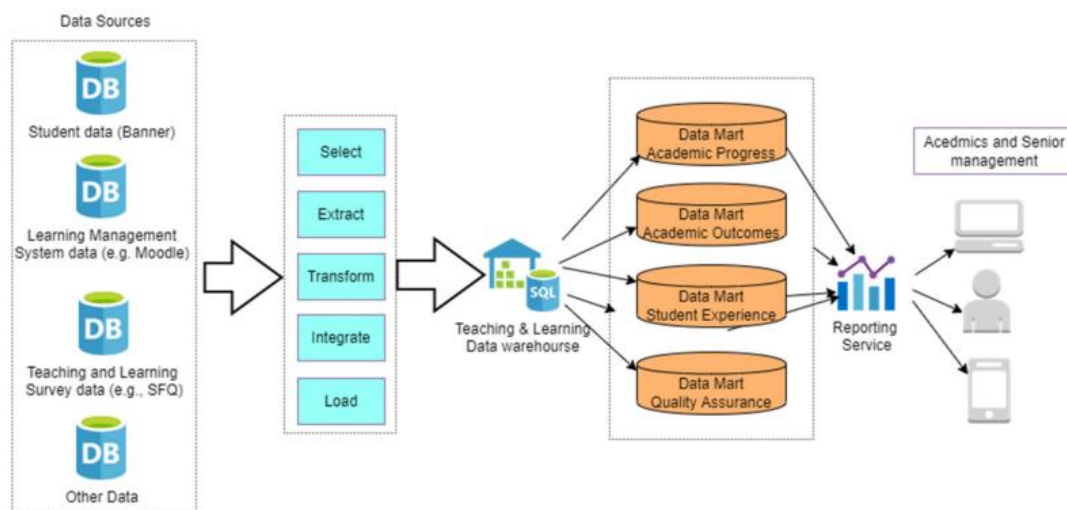
**Figure 2.** The Structure star schema ([Solodovikova & Niedrĭte, 2005](#))

[Li et al. \(2022\)](#) developed a multidimensional teaching and learning analytics data warehouse system (TLDWAS) to evaluate massive amounts of teaching and learning data. Senior management/educators could use TLDWAS's simple/interactive interface to view university students' applications, admissions, registration, and academic progress/status until graduation. This new analytic technology let policymakers and senior management see the broad picture and obtain insight from massive student course and teacher assessment data. Student, program, academic year, and course data were modeled using a multidimensional model in their paper. As shown in Figure 6, time, student, and course are dimension information in TLDWAS, while grade data is fact information in the data warehouse. Dimensional tables describe the dimension hierarchy for each dimension.



**Figure 3.** 3D data cube for the student performance tracking (Li et al., 2022).

Li et al. (2022) used multidimensional lenses to analyze the massive amount of data in the course student evaluation area, a crucial aspect of the teaching and learning quality assurance in higher education. On the basis of the data warehouse system, a novel analytical framework for categorizing courses into various domains (Student Effort, Outcome Achievement, Course Rating, and Teacher Rating) to address domain-specific course issues was proposed. Their framework enabled senior administrators and program leaders to quickly identify courses that require closer examination. Their streamlined system determined whether course enhancement measures are warranted and in what areas. The flow diagrams of the data warehouse architecture developed by the authors are shown in Figure 4. Figure 4 demonstrates that the operational database's raw sensor data are aggregated by ETL and then processed by the data warehouse, which divides them into various datamarts for the reporting service.



**Figure 4.** The data flow in the data warehouse (Li et al., 2022)

In study (Zorrilla, 2009), it was demonstrated that the technologies of data warehouse and OLAP are the most appropriate for developing this software application. The author detailed the implementation process from inception to the creation of the user interface. The author provided a summary of her experience with the design and implementation of MATEP, the Monitoring and Analysis instrument for E-learning Platforms, an instrument developed at the University of Cantabria.

According to the author, the fact that this application was built on a BI/DW architecture has the following technological advantages:

- The software is autonomous of the e-learning platform it audits.
- The application collects academic and demographic information, and instructor-specified context.
- The application provides instructors with up-to-date information based on the frequency with which the administrator executes ETL procedures. Generally speaking, daily.
- Even though the volume of data is large, the system manages the information effectively.
- The use of OLAP technology not only provides fast answers, but also permits users to manage the data by increasing the level of aggregation along one or more-dimension hierarchies, decreasing the level of aggregation, or reorienting the multidimensional view of the data.
- The system is readily expandable to accommodate the needs of other academic environment users.
- In addition, this can be used to retain the information that intelligent algorithms should obtain patterns and serve as their repository.
- The solution's modular design and adherence to industry standards facilitate the replacement of any component.

Figure 5 depicts the E-learning Data Warehouse architecture presented by the author. Presented are the four components of a data warehouse environment: data sources, data staging area, data area, and data access tools.

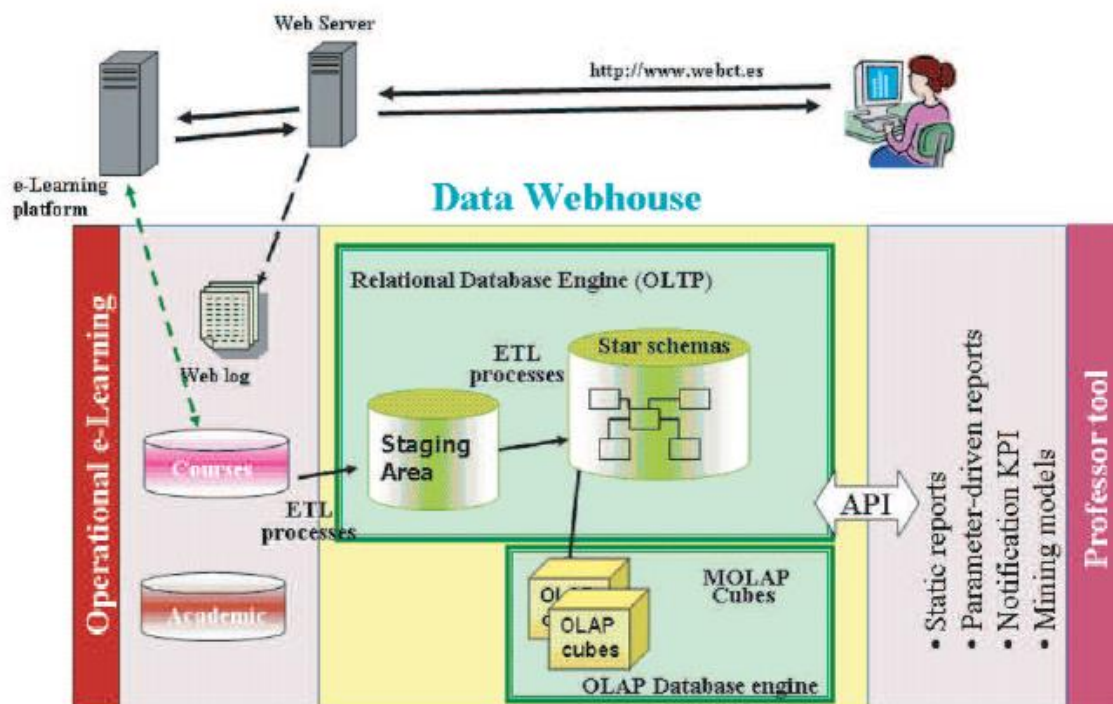


Figure 5. E-learning Data Webhouse (Zorrilla, 2009)

### 3. E-learning data warehouse design

An e-learning data warehouse (EDW) is a type of data warehouse designed expressly to meet the needs of educational institutions, such as schools, colleges, and universities. An EDW aggregates data from diverse sources, such as student information systems, learning management systems, assessment tools, financial systems, and other operational systems, to provide an all-encompassing view of the institution's data. In conclusion, an EDW is a specialized type of data warehouse that is tailored to the requirements of educational

institutions, whereas a data warehouse is a more general-purpose system that can be applied in a variety of industries and settings.

At the stage of designing the data warehouse infrastructure, the opinions of experts who have administrative or academic experience in the distance education system were consulted to determine which analyzes and reports would be needed to improve the e-Learning processes and increase the quality of the Open Education system. At the same time, the opinions of experts in data mining and statistics were taken on which methods to apply for these analyses. Within the framework of the opinions, integrations to the information systems needed for the data warehouse was carried out. Data obtained from the participants, especially the administrators in the Open Education system and ÖTAG unit, were used.

The main purpose of this study is to collect all student, instructor and staff movements in the learning management system and other related information systems in a particular format. Then, the data warehouse regularly creates the requested analytical reports based on the accumulated data. These reports can include different analytics, such as material usage frequencies, student interactions, and the relationship between LMS system usage and student success. Tools are required in this situation to aid in monitoring and measuring the actions taken by all students to assess the efficacy of the course structure and e-learning activities. All of the information in the data warehouse needs to be consistent, arranged, and standardized, unlike the LMS database, which exists solely to facilitate the operation of the application. To extract the data and keep it after transformation, a new data warehouse that adheres to the dimensional model is needed. Data warehouse technology is one of the technologies that can be applied to fulfill this demand. Alternately, technologies like data lakes and NoSQL databases can be used for data storage, but because data is kept unstructured in such environments, analytics and report retrieval can be more challenging. The main contributions of the data warehouse system are the ability to locate, interpret, and exploit these patterns with intelligent analytics in oversized databases. Such databases have the genuine potential to hold data as well as hidden patterns.

In this context, this study sought answers to the following questions:

- The analytics and reports that will be requested should be determined in consultation with the administrators of the open education system. The data to be extracted from other information systems should be determined based on the requested analytics and reports
- Determining which data will be retrieved and how often they will be retrieved in the LMS system
- Determining which data will be retrieved and how often they will be retrieved from other applications, such as the Student Information System, support desk, and material management system (ETS) related to the LMS system within the scope of the Open Education System
- Transforming and simplifying data in accordance with the data warehouse
- Creating table structures in the database and determining the relationship between tables, combining and associating data from the LMS system and other systems
- Setting up the database server and preparing the infrastructure
- Preparation of works for extracting data from LMS and other systems
- Determining the reports requested after the creation of the data warehouse system
- Developing interfaces for writing queries and displaying reports required for the production of reports

The desired result of the study

- The accumulative storage of data in the LMS system and other related information systems in a secure environment over the years



- Improving the benefits and effects of e-learning based on analytic reports extracted using data from the data warehouse
- Optimizing e-learning materials in the LMS system
- Measuring the relationship between the use of the LMS system and student achievement, using simplified data
- Monitoring student interactions in the LMS system
- Individual guidance specific to the student can be provided by thanks to the data in the data warehouse

Within the scope of this study, it regularly stores the e-learning activities of all students in a secure data warehouse. In addition, the data of these students were correlated with the LMS system and different reports were provided. Through this study, complex queries that may cause performance problems on the LMS system can now be run on the data warehouse. In addition, this data warehouse infrastructure works independently of the LMS. Therefore, in the case of switching the LMS system in the future, there will be no disruption in the reporting system.

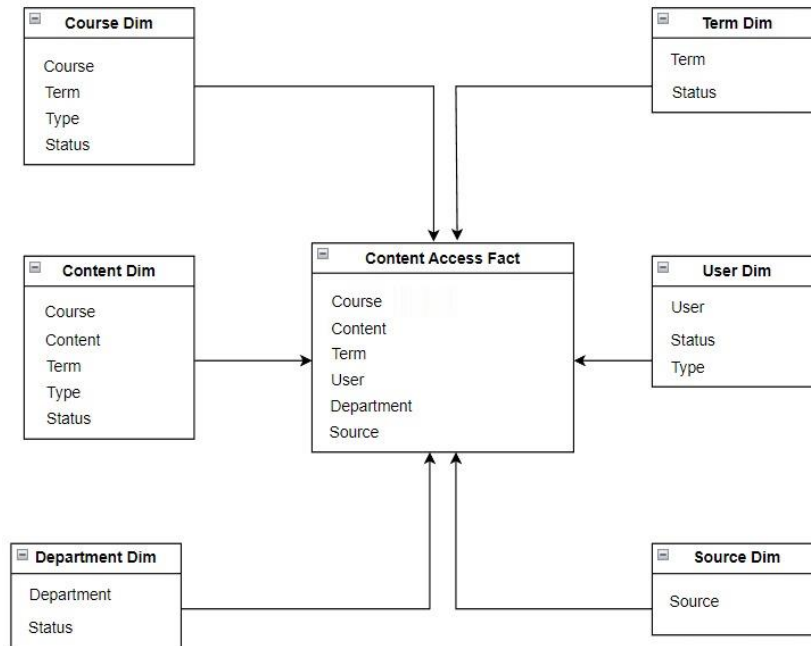
#### **4. Data warehouse infrastructure**

Enterprise-licensed Microsoft MSSQL Server 2019 was employed as a database engine in the data warehouse system. The .NET environment has been used for the web service project that pulls the data and for the software of the web environment where the reports will be displayed. Also, as the programming language, C# is used within .NET environment.

The data warehouse stores data in three distinct forms and levels. These are known respectively as operational data stores (ODS), data warehouses (DW), and data marts (DM). The operational system's data are replicated to create the ODS layer. Providing the following data layers is the objective here. The primary responsibility of the ODS layer is to feed the DW layer. In the data warehouse, data moved from operational systems to operational data stores (ODS) is transformed to create the DW layer. The DM layer is composed of aggregated representations of the multidimensional data received via the DW layer. The necessary SQL codes were generated and then executed at specific intervals to transfer the necessary data to the aforementioned levels of the data warehouse, ensuring that the data warehouse was continually updated. This procedure is known as ETL (Extract, Transform, Load). During the extraction process, data from multiple sources are compiled in a single location. Transformation refers to cleaning and transforming the retrieved data into the appropriate format. The process of transferring updated data into the relevant resource is known as loading. In the data warehouse, the SQL codes required by ETL operations have been generated and implemented. MSSQL Server was used to set up linked servers, and the necessary connections were established to pull data from operational systems. The ETL procedure was executed daily in order to maintain an up-to-date data warehouse. MS SQL Server's job scheduling function was used to perform this operation.

##### **4.1. Data warehouse schema**

In data warehouse architecture, there are two possible designs. These are known as the star and snowflake schemas. This study employed a star schema architecture. In star schema architecture, a fact table is constructed within a structure fed by dim tables. In this structure, dim tables are not interconnected. These results in a denormalized structured architecture. This denormalized structure of the star schema necessitates more disk space; however, because it requires fewer joins, SQL expressions are significantly simpler and more efficient. The material usage activity fact table depicted in the figure is populated with data from numerous dim tables. Fact tables contain metrics, or items that we wish to measure, whereas dimensional tables contain attributes of metrics, or descriptions of what is being measured. Each fact table is connected to a number of dimensions, some of which are common to multiple fact tables; however, the dimensions are not connected to one another in any way.



**Figure 6.** A sample fact table in the star schema

## 4.2. Datamart

In this study, many datamarts were used to obtain some standardized reports and analytics faster. A datamart is a subset of a data warehouse (DW) that serves a particular business function or department, such as sales, marketing, or finance. Typically, a datamart comprises a subset of DW data that has been pre-aggregated and organized to support the analytical requirements of the business function it serves. As it comprises a smaller subset of the data from the DW, the primary advantage of using a datamart is that it can provide faster access to the data required for a particular business function. As the data is already aggregated and organized for a particular business function, this can improve query performance and reduce the complexity of data analysis. Additional advantages of using a datamart may include:

- **Improved data quality:** By focusing on a certain business function or department, a datamart may ensure data accuracy, completeness, and consistency.
- **Better decisions:** Datamarts enable faster access to pertinent data, which can improve decision-making.
- **Lower cost:** A datamart requires less hardware, software, and development work than a full-scale data warehouse.
- **Increased agility:** Datamarts can adapt to change business requirements and analytical demands by focusing on a certain business function or department.

Using a datamart can improve the effectiveness and efficacy of data analysis for particular business functions, while also reducing costs and enhancing agility.

In the study, many datamarts were created when needed. Different datamarts such as course information, material information, demographics, general usage, temporal dimension of access to the system, course and material access summaries, semester usage statistics, general usage of mock exams, semester enrollments were created according to the needs.

The data warehouse is fed from the student information system (ÖBS), learning management system (ÖYS), material management system (ETS), and various flat file sources. LMS and other related databases are defined as OLTP (Online Transaction Processing) databases, the operational system in which the processes in the

organization are managed. Data are pulled from these OLTP sources and transferred to the data warehouse system.

### 4.3. Stages of the data warehouse infrastructure

In general, there are three stages of the data warehouse infrastructure to be developed. These are ETL (Extract Transform Load), data storage, and data processing (analysis and reporting), respectively.

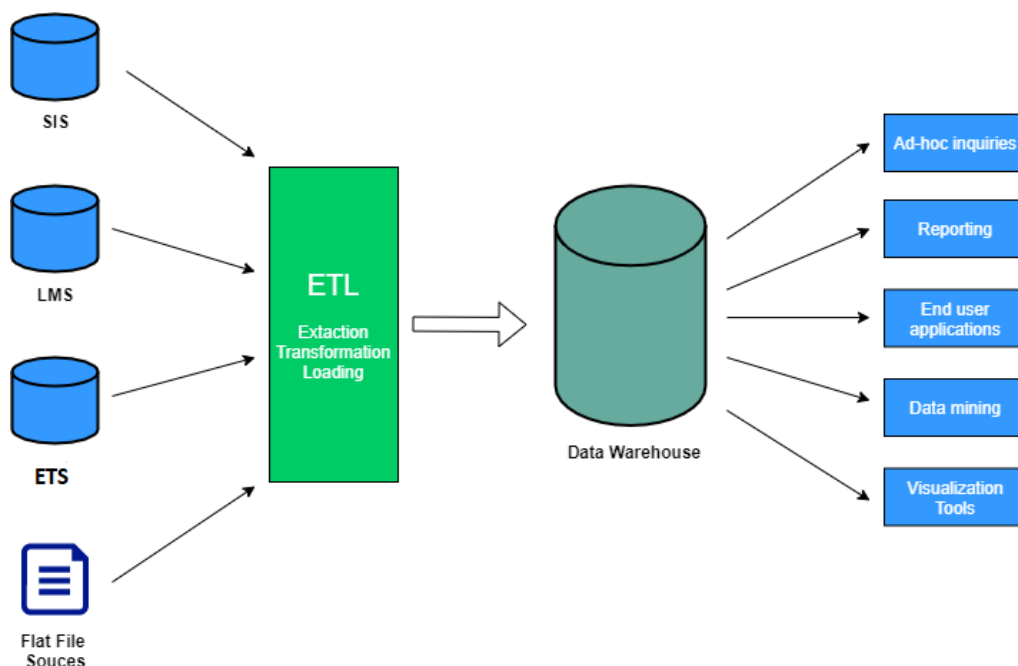
The ETL process:

- Extract:** It is called the process of extracting the data from the source system. It specifies the process of obtaining data from the LMS system and related information systems at certain times.
- Transform:** Putting the collected data into the desired format in accordance with the purpose, that is, cleaning it and increasing its quality,
- Load:** This means to load the data into the created central information system data warehouse.

**Data Retention:** The data organized with the ETL process are stored in the database that forms the infrastructure of the data warehouse. The data pushed into the data warehouse are permanent and cannot be modified. The data warehouse has a time dimension. Data are stored in chronological order.

**Data analysis reporting:** Data mining methods enable analysis of student movements in e-learning environments to enable administrators and educators to have an idea about the student's learning methods. Many analyzes can be performed, such as statistical analysis of training data, the most popular pages that students access, the number of downloads of e-learning resources, the number of different pages accessed, and the total time they spend in the system. These analytics are visualized for display to end users.

Thanks to the data warehouse infrastructure to be developed, student success can be predicted by running analyze on the data. With the recommendation system algorithms, suggestions, such as e-learning materials and study methods, can be offered to the students to enhance their performance. In this study, the data warehouse architecture developed for the distance education system is shown in Figure 7. The figure shows data sources, ETL processes and outputs that can be obtained from the system.



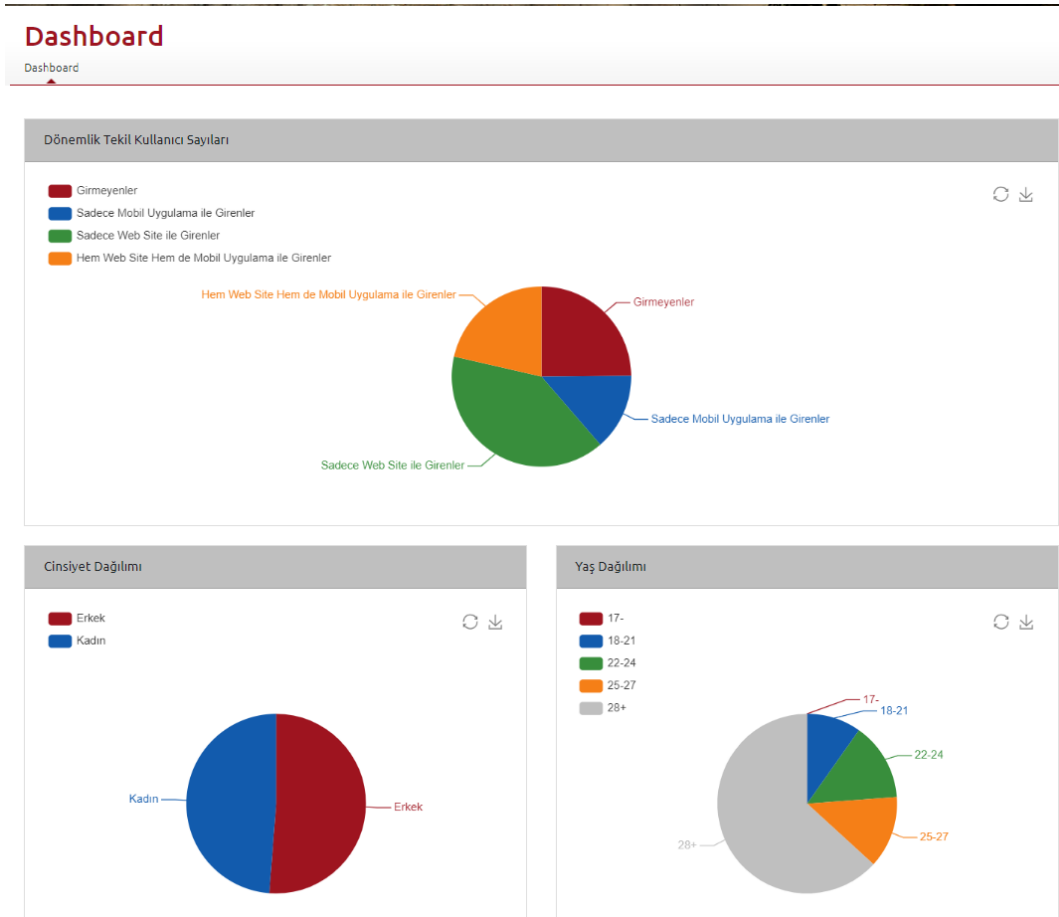
**Figure 7.** Open education system data warehouse architecture

#### **4.4. Features of the designed data warehouse system**

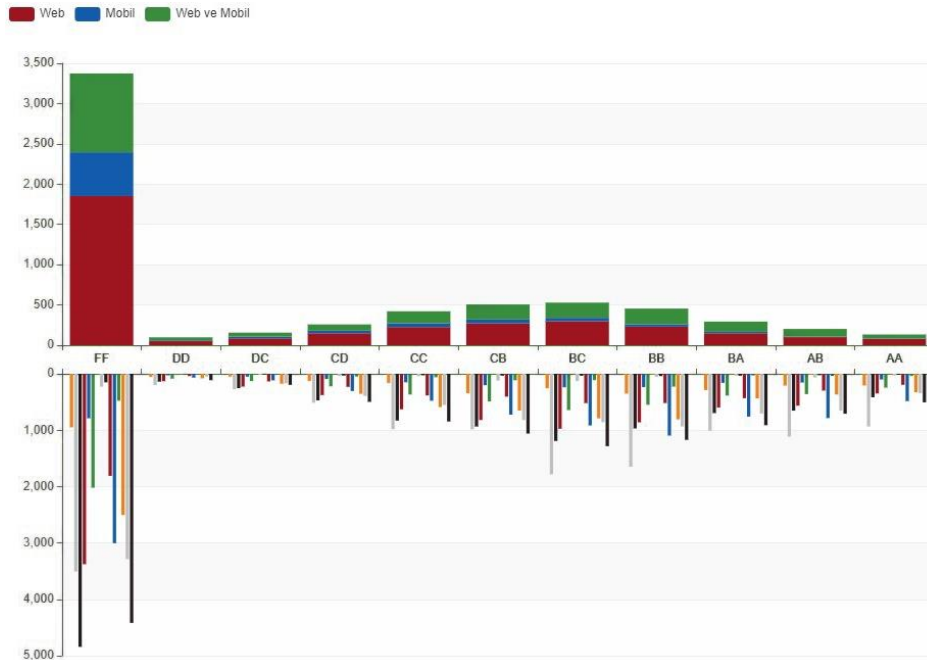
The designed system has the following features:

- Ensuring that the data in the LMS system and other related information systems are stored in a safe environment cumulatively over the years.
- Data can be retrieved at certain intervals from data sources, such as ÖYS, ETS and Student Information System, using web services.
- A web application has been developed to display the reports from the web interface. The web application is published at <https://aofanalytics.anadolu.edu.tr/>. People in the open education system can access the web page.
- Presenting reports have been made according to the role.
- A dashboard has been prepared for the administrators in the Open Education system to show the summary of the whole current semester.
- With the admin panel, administrative staff can access summary information, such as the number of student entries, the use of LMS according to the student profile status, and the material usage status with the LMS system.
- Reports created in the web interface can be downloaded as CSV files or images.
- Reports, such as material usage, individual usage numbers, and course access information, can be obtained.
- Reports can be received based on the Open Education System, faculty and program.
- The system allows us to generate reports for intervals, such as daily, weekly, or custom periods.
- By connecting the data warehouse system with visualization tools, such as Tableau and Power BI, instant reports and graphs, can be created based on their needs.
- In the case of a need for instant data not presented as the administrators, reports can be provided by SQL queries.
- Within the scope of data up-to-dateness, data mining and artificial intelligence algorithms can be run by connecting to a data warehouse system with software, such as Python, R or MATLAB, to be used in academic and administrative studies for the Open Education System.
- The data warehouse system is designed to be flexible and open to development. Optionally, new reports can be created.
- With the responsive interface design, transactions can be made by easily accessing mobile devices.
- Feedback about the usage of the LMS system can be shown to students from the data warehouse system. Summary reports showing the students work status in the LMS system can be presented. In addition, the usage of course materials and the scores in the practice exams are compared to the class average. Feedback is reflected on the students page in the LMS system ([ekampus.anadolu.edu.tr](http://ekampus.anadolu.edu.tr)).

Some of the reports available from the web interface are shown below. The dashboard report contains summary information such as users' web/mobile usage status, age, gender and number of unique users per week. The reports on the dashboard screen are organized according to the request of the institution administrators.



**Figure 8.** Summary Reporting View

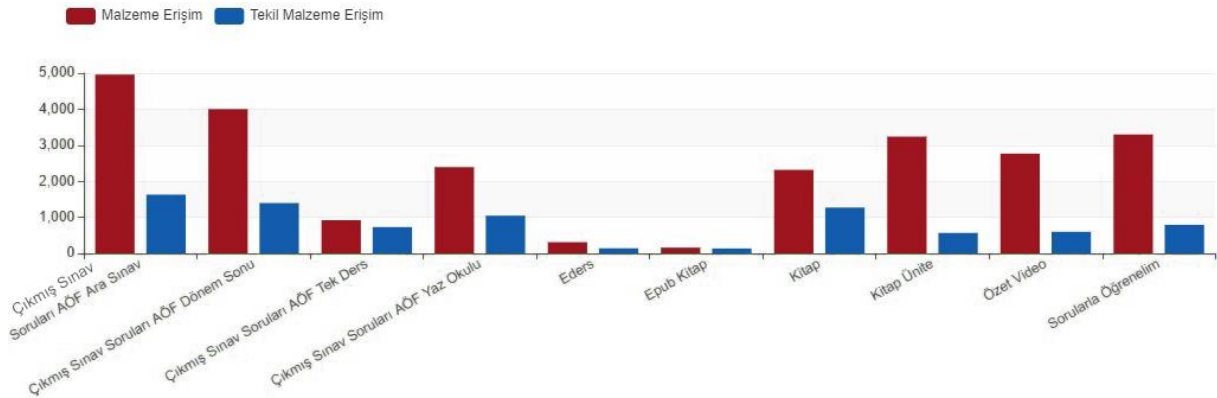


**Figure 9.** The relationship between material use and student achievement in a sample course

The graph in the Figure 9 shows an example of the multidimensional data obtained in the data warehouse. The data on the top axis shows the number of students classified according to their letter grades within a course. The platforms from which these students access the system are also shown in the same graph. On the other

hand, the types of materials used by students belonging to each letter grade class are also shown on the lower axis. In this way, the platforms from which successful or unsuccessful students of a course accessed the system and which materials they used can be shown in a single graph. It is not possible to claim this kind of data from any other database other than the data warehouse.

The graph in the Figure 10 shows aggregate data on the usage of materials for a course. The total access to the materials of a course and the number of individual students accessing each material are given in a single graph. In this way, it is possible to make various inferences about a material. Questions such as "Do students continue to use materials that can be used offline by accessing them online or do they prefer to use them offline?" or "Is the high usage of materials in video format due to the nature or is it really used a lot?" can be answered through this graph.



**Figure 10.** Number of material accesses in a sample course

## 5. Discussion and conclusion

With this study, the infrastructure of the environment where administrators, academicians, and related unit managers can easily receive reports on the e-learning system has been created. Thanks to this study, data from different data sources such as LMS, student information system, mobile applications have been simplified by combining them in a single environment. In this way, in-depth and faster analytical reports about the distance education system will be produced using simplified data. Reports obtained through the data warehouse help managers decide on processes for improvement with these reports, improvements can be made in areas such as LMS interfaces, material types and question quality to increase student success. In the study, datamarts were created in order to get some complex reports faster. New datamarts can be added to the system as needed. The data warehouse system is open to the continuous expansion. New reports can be added as new data related to Open Education is added. Since the interfaces are developed by the software developers of the institution, operations such as adding, removing and modifying reports can be done easily. Data is stored on the data warehouse server with secure and daily backups. The server can be accessed by authorized users over the local network. Maintenance operations are performed daily on the database server and operations such as backup, data integrity, and indexing is performed.

It is expected that the academic studies conducted using these arranged data will contribute to the scientific performance of our university. It is thought that this system developed for the open education system will set an example for other institutions implementing the distance education system in Turkey.

Today, as the data grows, it becomes difficult to process data with classical SQL queries. Since the data in the data warehouse will increase over the years, it is planned to integrate with technologies such as Hadoop, Apache Spark, which are used to process larger data in future studies. The e-learning recommendation system, which provides personalized recommendations to students based on their learning styles and past behaviors, is planned to be integrated into the data warehouse system. In addition, according to student behavior, it is planned to predict the student success status in advance and alert the system when necessary.

## Acknowledgments

This work was partially supported by the Anadolu University Scientific Research Projects Coordination Department under Grant No 1808E291.

## Author contribution

- Ihsan Gunes performed literature search, database design, data processing, prepared figures, authored or reviewed drafts of the article, and approved the final draft.
- Mustafa Kemal Birgin performed database design, coding, data collection, processing, authored or reviewed drafts of the article, and approved the final draft.

## Declaration of ethical code

The author 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 they have no conflicts interests.

## References

- Araque, F., Salguero, A., Martínez, L., Navarro, E., & Calero, M. (2007). Data warehousing for improving web-based learning sites. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 2(4). <https://doi.org/10.3991/ijet.v2i4.81>
- Ballard, C., Herreman, D., Schau, D., Bell, R., Kim, E., & Valencic, A. (1998). *Data modeling techniques for data warehousing* (p. 25). San Jose: IBM Corporation International Technical Support Organization.
- Cantabella, M., Martínez-España, R., Ayuso, B., Yáñez, J. A., & Muñoz, A. (2019). Analysis of student behavior in learning management systems through a Big Data framework. *Future Generation Computer Systems*, 90, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.08.003>
- Gladić, D., & Petrovački, J. (2021, March). Using a data warehouse system to monitor and analyze student achievement in teaching process: student paper. In *2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH51037.2021.9400685>
- Golfarelli, M., Maio, D., & Rizzi, S. (1998, January). Conceptual design of data warehouses from E/R schemes. In *Proceedings of the Thirty-First Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 334-343). IEEE.
- Goyal, M., & Vohra, R. (2012). Applications of data mining in higher education. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 9(2), 113.
- Janati, S. E., Maach, A., & El Ghanami, D. (2019). Learning analytics framework for adaptive E-learning system to monitor the learner's activities. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(8).
- Kimball, R., & Ross, M. (2010). *The Kimball group reader: relentlessly practical tools for data warehousing and business intelligence*. John Wiley & Sons.
- Kurniawan, Y., & Halim, E. (2013). Use data warehouse and data mining to predict student academic performance in schools: A case study (perspective application and benefits). In *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)* (pp. 98-103). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TALE.2013.6654408>
- Lane, P., & Schupmann, V. (2007). *Oracle Database Data Warehousing Guide*. 11g Release 2 (11.2) E16579-01.
- Li, Q., Duffy, P., & Zhang, Z. (2022). A novel multi-dimensional analysis approach to teaching and learning analytics in higher education. *Systems*, 10(4), 96. <https://doi.org/10.3390/systems10040096>

- Li, Q., Li, Z., Han, J., & Ma, H. (2022). Quality assurance for performing arts education: A multi-dimensional analysis approach. *Applied Sciences*, 12(10), 4813. <https://doi.org/10.3390/app12104813>
- Nebić, Z., & Mahnič, V. (2010). Data warehouse for an e-learning platform. *Latest Trends on Computers*, 2, 415-420.
- Seker, S. E. (2015). Büyük veri ve büyük veri yaşam döngüleri. *Ybs Ansiklopedi*, 2(3), 10-17.
- Simitsis, A., Vassiliadis, P., & Sellis, T. (2005). Optimizing ETL processes in data warehouses. In *21st International Conference on Data Engineering (ICDE'05)* (pp. 564-575). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDE.2005.103>
- Solodovnikova, D., & Niedrite, L. (2005). Using data warehouse resources for assessment of e-learning influence on university processes. In: *Proc. of the 9th East-European Conf. on Advances in Databases and Information Systems (ADBIS)*, (pp. 233. – 248), Tallinn.
- Zhang, Y., Oussena, S., Clark, T., & Kim, H. (2010). Use data mining to improve student retention in higher education. In *Proceeding of the 12th International Conference on Enterprise Information System (ICEIS 2010)*, (pp. 8-12), Funchal.
- Zorrilla, M.E. (2009). Data warehouse technology for E-learning. In: D., Zakrzewska, E., Menasalvas, & L., Byczkowska-Lipinska (Eds.), *Methods and Supporting Technologies for Data Analysis* (ss. 1-20). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02196-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02196-1_1)



## SMOTE vs. KNNOR: An evaluation of oversampling techniques in machine learning

*SMOTE ve KNNOR: Makine öğreniminde aşırı örnekleme tekniklerinin değerlendirilmesi*

Ismet ABACI\*<sup>1</sup> , Kazim YILDIZ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Computer Engineering, Istanbul

<sup>2</sup> Marmara University, Faculty of Technology, Computer Engineering, Istanbul

• Received: 20.02.2023

• Accepted: 23.06.2023

### Abstract

The increasing availability of big data has led to the development of applications that make human life easier. In order to process this data correctly, it is necessary to extract useful and valid information from large data warehouses through a knowledge discovery process in databases (KDD). Data mining is an important part of this, and it involves discovering data and developing models that extract unknown patterns. The quality of the data used in supervised machine learning algorithms plays a significant role in determining the success of predictions. One factor that improves the quality of data is a balanced dataset, where the input values are distributed close to each other. However, in practice, many datasets are unbalanced. To overcome this problem, oversampling techniques are used to generate synthetic data that is as close to real data as possible. In this study, we compared the performance of two oversampling techniques, SMOTE and KNNOR, on a variety of datasets using different machine learning algorithms. Our results showed that the use of SMOTE and KNNOR did not always improve the accuracy of the model. In fact, on many datasets, these techniques resulted in a decrease in accuracy. However, on certain datasets, both SMOTE and KNNOR were able to increase the accuracy of the model. Our results indicate that the effectiveness of oversampling techniques varies depending on the specific dataset and machine learning algorithm being used. Therefore, it is crucial to assess the effectiveness of these methods on a case-by-case basis to determine the best approach for a given dataset and algorithm.

**Keywords:** KNNOR, Machine learning, Oversampling, SMOTE, Unbalanced data

### Öz

Büyük verinin artan mevcudiyeti, insan hayatını kolaylaştıran uygulamaların gelişmesine yol açmıştır. Bu veriyi doğru şekilde işlemek için, bilgi keşfi veritabanları (KDD) olarak adlandırılan büyük veri deposundan faydalı ve geçerli bilgiyi çıkarmak gereklidir. KDD işlemlerinin önemli bir parçası olan veri madenciliği, veriyi keşfetmeyi ve bilinmeyen desenleri çıkarmak için model geliştirmeyi içermektedir. Supervised makine öğrenimi algoritmalarında kullanılan verinin kalitesi, tahmin başarısının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Verinin kalitesini arttıran bir faktör, girdi değerlerinin birbirine yakın dağılmış olmasıdır. Ancak pratikte, birçok veri seti dengesizdir. Bu sorunu aşmak için, oversampling teknikleri gerçek veriye en yakın şekilde sentetik veri üretebilmek için kullanılır. Bu çalışmada, farklı veri setlerinde iki oversampling tekniği olan SMOTE ve KNNOR'un performanslarını farklı makine öğrenimi algoritmaları kullanarak karşılaştırdık. Sonuçlarımız, SMOTE ve KNNOR'un modellerin doğruluğunu her zaman arttırmadığını, hatta birçok veri setinde bu tekniklerin doğrulukta azalma yaratabileceğini gösterdi. Ancak belirli veri setlerinde, SMOTE ve KNNOR modellerin doğruluğunu arttırmayı başardı. Bulgularımız, oversampling tekniklerinin etkililiğinin belirli veri seti ve makine öğrenimi algoritmasına bağlı olarak değişebileceğini sugere etmektedir. Dolayısıyla, veri seti ve algoritma için en iyi yaklaşımı belirlemek için bu tekniklerin performanslarını durum bazında değerlendirmek önemlidir.

**Anahtar kelimeler:** KNNOR, Makine öğrenmesi, Aşırı örnekleme, SMOTE, Dengesiz veri

\* Ismet ABACI; ismetabaci@marun.edu.tr

## 1. Introduction

With the advancement of technology, the proliferation of big data has made it possible to process and convert this data into applications that enhance human life. In order for the data to be processed correctly, first of all, it is necessary to be able to make sense of the data correctly. For this reason, it is necessary to determine patterns of useful, understandable, and valid data from large data warehouses (such as databases, data warehouses) a knowledge discovery process in database (KDD). Data mining, which is so crucial for the KDD process, is a process that discovers data and develops models that extract unknown patterns (Maimon & Rokach, 2010).

The quality of the data used in supervised machine learning algorithms has a very important effect on prediction success. Features such as the amount, accuracy, completeness, diversity, and balance of the data to be used are one of the requirements for supervised machine learning algorithms to give more accurate results.

One factor that improves the caliber of data used in machine learning algorithms is that the data is balanced (Galar et al., 2012). The distribution of the input numbers of the values to be estimated close to each other is called balanced, and the distribution of them far from each other is called unbalanced data sets. Models trained on unbalanced datasets often give poor results when they need to be generalized. In such cases, there are oversampling techniques used to get rid of the problems created by the unbalanced data set. By using these techniques, synthetic data can be produced as close to real data as possible. In this study, it will be examined which oversampling technique gives better results for which types of datasets and which machine learning algorithm. All the data set used in this study did not have an equal distribution, the data sets were balanced with the SMOTE and KNNOR oversampling techniques. Random Forest (RF), Decision Trees (DT), and Support Vector Machines (SVM) machine learning algorithms were used to compare how they affect prediction success.

Asif et al. (2015) developed a model for predicting fourth-grade university students' grades based on their social or demographic characteristics, which are unknown, but the first and second-grade course grades are known in their study. They applied Naive Bayes, 1-Nearest Neighbor, Decision Trees, and Neural Networks models to two different sets of data, containing grades from different time periods. While the 1-Nearest Neighbor model performed well in the first data set, they found that the Naive Bayes model was more successful in the second data set (Asif et al., 2015).

In 2005, two techniques named Borderline-SMOTE1 and Borderline-SMOTE2 were developed (Han et al., 2005). Both of these techniques focused on samples that were located on the boundary of the dataset, as the authors believed that these samples were at risk of being misclassified. By oversampling in this region, they aimed to decrease the chances of misclassification. Similarly, another technique called SAFESMOTE was developed which focused on oversampling the central samples that were farther away from the boundary region.

In their study, Adekitan & Salau (2019) aimed to predict the weighted grade point averages (GPAs) of university students in Nigeria using the GPAs of their first three years of education. They evaluated six different algorithms on the data, including Linear Regression, Random Forest, Decision Trees, Naive Bayes, Tree Trunk, and such as classifying it as a classification task and determining the success rate as a regression task. Neural Network. They found that the most successful model was the linear regression model, with an accuracy of 89.15% (Adekitan & O. Salau, 2019).

Strecht et al. (2015) conducted a study on determining the success or failure status of students and estimating their success grade. They considered determining the pass or fail status such as classifying it as a classification task and determining the success rate as a regression task. They found that while the model performed well in the classification task, the results were poor in the regression task. As a result, they found that SVM and DT had the best results in the classification task, while Adaboost, SVM and RF had the best results in the regression task (Strecht et al., 2015).

Recent studies in the field of SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) have been concentrated on addressing the problem of uneven distribution of classes. One such algorithm is K-Means SMOTE (Last et al., 2017), that takes into account the spread of the under-represented group of samples in the data set. It

separates the data set into different clusters and calculates the proportion of imbalance in each cluster. The over-sampling is then done only on the samples where the proportion of imbalance is high.

Márquez et al. (2013) attempted to predict student performance using data from high school students in Mexico. They first reduced the dataset with 77 features to 15 features and applied the SMOTE method to balance the unbalanced dataset. After experimenting with various machine learning algorithms, they were able to achieve successful prediction results (Márquez et al., 2013).

Srinilta & Kanharattanachai (2021) balanced unbalanced datasets by using a search algorithm to identify the ideal value for the k parameter in the SMOTE method. They then used a SVM for classification on six different datasets. They observed that the k value obtained by the search algorithm gave better results than the assumed k value (Srinilta & Kanharattanachai, 2021).

Flores et al. (2018) balanced a dataset used for sentiment analysis by applying the SMOTE method. They then evaluated the performance of the system by using Decision Vector Machine (DVM) and Naive Bayes (NB) algorithms on the balanced dataset. The study found that the 10-fold cross-validation method gave better results than the 0.7 hold-out method. Additionally, the study concludes that the SMOTE method improves the performance of both DVM and NB classifiers (Flores et al., 2018).

A review of related studies shows that machine learning methods such as Adaboost, NB, DT, SVM, and RF generally provide good results in predicting student success. Additionally, the application of SMOTE method to balance unbalanced data is found to improve the performance of these algorithms (Márquez et al., 2013; Srinilta & Kanharattanachai, 2021; Flores et al., 2018).

Douzas & Bacao (2018) introduced a new method for handling imbalanced datasets by employing Conditional Generative Adversarial Networks (cGANs) for effective data generation (Douzas & Bacao, 2018). Imbalanced datasets pose a significant challenge in machine learning, as the under-representation of minority classes can lead to biased predictions. The researchers compared the performance of cGANs with other oversampling techniques, including the widely-used Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE), on various datasets with different degrees of imbalance. They found that cGANs outperformed traditional oversampling methods, resulting in improved classification accuracy, particularly for minority classes. This study highlights the potential of using advanced generative models, such as cGANs, to tackle the issue of imbalanced datasets and enhance the performance of machine learning algorithms.

He & Garcia (2019) introduced the Adaptive Synthetic Sampling Approach (ADASYN) as a novel method for addressing imbalanced datasets in machine learning applications (He & Garcia, 2019). Imbalanced datasets present challenges when predicting minority classes, as these classes are often under-represented, leading to biased predictions. The researchers compared the performance of ADASYN with other popular oversampling techniques, such as the Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE), on various datasets with differing degrees of imbalance. They found that ADASYN provided more accurate classification results, particularly for minority classes, outperforming traditional oversampling methods. This study underscores the potential of using adaptive oversampling techniques, such as ADASYN, to tackle the issue of imbalanced datasets and improve the performance of machine learning algorithms in various applications.

Balci et al. (2022) demonstrated the potential of machine learning techniques in healthcare, specifically in detecting and classifying sleep-disordered breathing types using time and time-frequency features extracted from polysomnography records of 19 patients (Balci et al., 2022). The researchers processed six types of physiological data with digital signal processing methods to obtain 35 features, which were then subjected to various machine learning algorithms, including Artificial Neural Networks, Support Vector Machines, Random Forest, Naive Bayes, K-Nearest Neighbors, Decision Trees, and Logistic Regression. The study found that the Random Forest algorithm achieved the highest classification accuracy of 76.3% for the five-class scoring, which increased to 86.6% when Hypopnea was excluded. These findings underscore the value of machine learning algorithms in healthcare applications, particularly the distinctiveness of time and time-frequency domain features in sleep-disordered breathing scoring and pave the way for the development of diagnostic support systems capable of evaluating multiple polysomnography data concurrently.

In the literature, numerous studies have utilized machine learning algorithms for classifying agricultural products. [Yasar \(2023\)](#) used CNN models for bread wheat classification with an accuracy of 97.67%. [Unlarsen et al. \(2022\)](#) employed a CNN-SVM hybrid model for wheat classification, achieving a 98.10% accuracy rate. [Kaya & Saritas \(2019\)](#) applied a neural network for durum wheat classification, reporting a 93.46% accuracy. [Sabanci et al. \(2022\)](#) combined CNN and SVM for pepper classification, obtaining a 99.02% accuracy rate. These studies demonstrate the potential of machine learning algorithms, including support vector machines and convolutional neural networks, for accurate agricultural product classification.

The application of machine learning algorithms in agriculture, particularly in the classification of various crop genotypes, has gained significant attention in recent years. [Golcuk & Yasar \(2023\)](#) conducted a groundbreaking study focusing on the classification of bread wheat genotypes using machine learning algorithms ([Golcuk & Yasar, 2023](#)). They collected 8,354 images from certified bread wheat varieties and extracted 90 color, 4 shape, and 12 morphological features using image processing and feature selection methods. These features were combined in various combinations and processed through an Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for feature selection. The bread wheat genotypes were then classified using Support Vector Machines (SVM), Decision Tree (DT), and Quadratic Discriminant (QD) classifiers. To enhance the accuracy and objectivity of the classification process, the researchers performed a 10-fold cross-validation. The most successful classification process was achieved using the SVM algorithm, obtaining an accuracy rate of 96.28% with the 46 features selected by the ABC algorithm ([Golcuk & Yasar, 2023](#)). This study demonstrates the potential of machine learning algorithms in accurately classifying wheat genotypes, ultimately leading to more efficient harvests and higher income for farmers.

In a recent study, [Islama et al. \(2022\)](#) introduced the K-Nearest Neighbor Oversampling (KNNOR) approach as a solution for distinguishing vital and secure regions for oversampling and generating synthetic data points of the minority class. The KNNOR approach consists of three steps and takes into account the relative density of the entire population when generating artificial points. This method allows for more reliable oversampling of the minority class, as well as increased resistance to noise. It is a promising approach for addressing the issue of imbalanced datasets, where the minority class is underrepresented. This can be a common problem in machine learning and the KNNOR approach presents a valuable solution for identifying and utilizing the most effective oversampling regions.

## **2. Material and method**

Datasets that have the same number of data in each class are called balanced datasets. There are two basic methods for balancing an unbalanced data set. One of them is oversampling, that is, increasing the quantity of samples in the minority class. The other is undersampling, that is, reducing the quantity of samples in the minority class ([Islama et al., 2022](#)). There are several approaches using these methods. One of these approaches is the SMOTE oversampling method.

### **2.1. Datasets**

The study analyzed the performance of three machine learning algorithms in predicting outcomes on four datasets. The datasets include one related to secondary school student performance in Portugal, another related to hepatitis cases in India, and a third related to the reflectivity of land surface types as observed by the Landsat MSS satellite. The fourth dataset was not specified. Each dataset was evaluated using an unbalanced dataset and two different oversampling techniques, SMOTE and KNNOR, and the accuracy of the models was compared.

One of the datasets used in this study is the dataset used by Cortez and Silva in their studies, which includes the success of secondary school students in Portugal in Mathematics and Portuguese courses and various attributes that are predicted to affect this success ([Cortez et al., 2008](#)). The dataset includes demographic characteristics of students such as age and gender, social characteristics such as time spent going to school, weekly study hours, and attributes such as exam grades. The exam grades of the students are examined in three semesters, and the scores of the last semester are also accepted as the final assessment.

Again, according to the data set, exam grades were scored between 0 and 20. Since the records that do not contain data belonging to any of the attributes were not taken into account while preparing the data set, there was no need to perform a null value scan in this study.

Another dataset that is used in the study was the Hepatitis dataset on the UCI Machine Learning Repository website which is a collection of data on hepatitis cases in India (Gong et al., 1988). It contains 155 samples and 20 attributes, 16 of which are continuous and 4 of which are nominal. The target attribute for this dataset is "Class", which indicates whether a patient has hepatitis. The other 19 features are various characteristics of patients, such as their age, gender, and blood test results.

The hepatitis dataset includes the following characteristics: Class: Binary (presence or absence of hepatitis) Age: Continuous variable Gender: Binary (male or female) Steroid use: Binary (yes or no) Antiviral treatment: Binary (yes or no) Fatigue: Binary (yes or no) Malaise: Binary (yes or no) Loss of appetite: Binary (yes or no) Enlarged liver: Binary (yes or no) Liver function: Binary (yes or no) Detectable spleen: Binary (yes or no) Presence of spider angiomas: Binary (yes or no) Ascites: Binary (yes or no) Presence of esophageal varices: Binary (yes or no) Bilirubin levels: Continuous variable Alkaline phosphatase levels: Continuous variable SGOT levels: Continuous variable Albumin levels: Continuous variable Prothrombin time: Continuous variable Histological findings: Binary (yes or no). This dataset is commonly employed for diagnosing and categorizing hepatitis and serves as a benchmark for machine learning algorithms in relevant studies.

The last dataset was The Statlog (Landsat Satellite) dataset (Srinivasan, 1988) which is a collection of data on the reflectivity of certain land surface types as observed by the Landsat MSS satellite. Compiled by researchers at the University of California, Irvine and hosted in the UCI Machine Learning Repository.

The dataset consists of 6435 samples, each representing a piece of land on the Earth's surface. For each sample, there are 36 properties, including various measures of reflectance at different wavelengths of light. There is also a class attribute, such as "barren land" or "evergreen forest", that indicates the type of land surface it represents, for example.

The dataset consists of 6435 samples, each representing a piece of land on the Earth's surface. For each sample, there are 36 properties, including various measures of reflectance at different wavelengths of light. There is also a class attribute, such as "barren land" or "evergreen forest", that indicates the type of land surface it represents, for example.

We consider two tables to examine the class distributions and imbalance ratios of four distinct datasets shown in table 1 and table 2. The first table provides an overview of the datasets and their class distributions. Each row in the table represents dataset, and the columns show the number of instances for different classes (Attribute1 to Attribute6). For example, the Hepatitis dataset contains 123 instances of one class (Attribute1) and 32 instances of another class (Attribute2). To gain a better understanding of the degree of class imbalance, we computed imbalance ratios for each pair of classes in the datasets as shown in table 3. The imbalance ratio is calculated as the ratio of the number of instances in the majority class to the number of instances in the minority class. These calculated imbalance ratios provide insight into the distribution of instances between the datasets, with higher values indicating a more significant class imbalance.

Upon comparing the calculated imbalance ratios within each dataset shown in table 2, we observe that the Portuguese (student) dataset exhibits the highest degree of imbalance with an imbalance ratio of 5.49. This suggests that this dataset has a more disproportionate distribution of instances across its classes compared to the other datasets. Conversely, the Statlog dataset demonstrates the least imbalance, with an imbalance ratio of 2.45, indicating a relatively more even distribution of instances among its classes. By understanding the degree of imbalance within each dataset, practitioners can tailor their approaches accordingly to develop more accurate and robust classification models.

The mean absolute deviation, commonly referred to as the average distance, is a statistical measure that quantifies the dispersion of data points in a dataset relative to the mean. This metric, which is presented in Table 2, is calculated by first determining the mean of the dataset and then computing the absolute differences between each data point and the mean. The average of these absolute differences provides the mean absolute deviation, which serves as an informative indicator of the dataset's variability. In comparison to other measures

of dispersion, such as standard deviation, the mean absolute deviation is less sensitive to extreme values and offers a more straightforward interpretation of the average distance between data points and the mean. In our analysis, we calculated the mean absolute deviation to be 0.2925, which indicates that, on average, the data points deviate from the mean by approximately 0.2925 units. This measure provides insight into the dispersion of the data and can be helpful in understanding the overall distribution and consistency of the dataset.

**Table 1.** The distribution of unbalanced datasets.

Mineral	Attribute 1	Attribute 2	Attribute 3	Attribute 4	Attribute 5	Attribute 6
Hepatitis	123	32	-	-	-	-
Portuguese(student)	549	100	-	-	-	-
Mathematics(student)	130	103	62	60	40	-
Statlog	1533	1508	1358	707	703	626

**Table 2.** Dataset Characteristics and Imbalance Metrics

Dataset	Majority class	Minority class	Imbalance ratio	Standard deviation	Average distance
Hepatitis	123	32	3.84	0.40	0.33
Portuguese	549	100	5.49	0.17	0.13
Mathematics	130	40	3.25	0.23	0.17
Statlog	1533	626	2.45	0.37	0.32

**Table 3.** Imbalance Ratios Between Pairs of Datasets

Pair	Majority class	Minority class	Imbalance ratio
Hepatitis vs. portuguese	549	123	4.46
Hepatitis vs. mathematics	130	123	1.06
Hepatitis vs. statlog	1533	123	12.46
Portuguese vs. mathematics	549	130	4.22
Portuguese vs. statlog	1533	549	2.79
Mathematics vs. tatlog	1533	130	11.79

## 2.2. Machine learning algorithms

### 2.2.1. Support vector machines (SVM)

SVM is one of the prediction methods based on statistical learning frameworks (Cortes et al., 1995). It was proposed by Vapnik and Chervonenkis (1971). SVM aims to perform the classification task by drawing a hyperplane, which is a line in 2d or 3d. It tries to parse the previously marked data with this hyperplane it has drawn. While there can be multiple such hyperplanes, SVM tries to find the hyperplane that best separates the two categories. SVM is a supervised learning algorithm as it needs marked data.

### 2.2.2. Decision tree (DT)

Decision Trees are the classification of an unknown sample, which can be depicted using a tree diagram, by dividing it into sub-branches within the framework of certain rules. Decision trees consist of a root node, multiple internal nodes, and terminal nodes specifying the final classifications. A graph is obtained by calculating statistics for all classes, and decision limits are determined by looking at this graph. At each stage, the tree is created by selecting the attribute that best expresses the difference between the classes (Swain & Hauska, 1988).

### 2.2.3. Random forest (RF)

It was first put forward by Tin Kam Ho (1995). According to Breiman's definition, a Random Forest is a tree-structured collection of classifiers made up of randomly distributed vectors, augmented by voting for the most

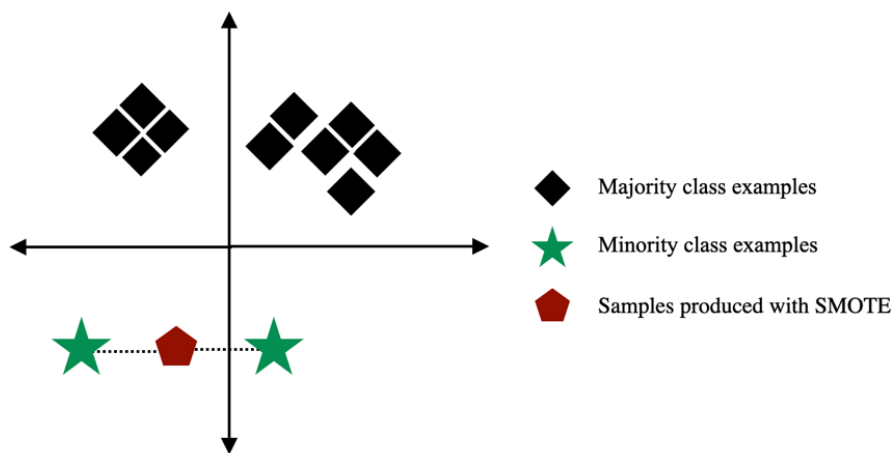
popular class. The Random Forest algorithm is a method that does not cause excessive learning and has a successful prediction ability (Breiman, 2001).

## 2.3. Oversampling techniques

### 2.3.1. SMOTE

The SMOTE method, called the Synthetic Minority Oversampling Technique, is an over-learning technique that relies on creating artificial new samples instead of reproducing existing data. To multiply minority samples, a random sample is generated, with one sample between its  $k$  nearest neighbors. Considering a data point with position (6.4), let's assume that the position of its nearest neighbor is also (4.3). The coordinate of this data point is subtracted from the coordinate of its nearest neighbor ((4-6), (3-4)) and a new sample is created by multiplying the obtained value with a random value in the range 0-1. The newly created sample's position  $(x, y)$  is calculated as Equation 1 (Chawla et al., 2002).

$$(x, y) = (6,4) + rand(0,1) * (-2, -1) \quad (1)$$



**Figure 1.** Generating synthetic data with SMOTE (Breiman, 2001)

In Figure 1, the data replication process is visualized by generating synthetic data at a random location between the minority samples and their  $k$  nearest neighbors with the SMOTE method.

### 2.3.2. KNNOR

KNNOR (K-Nearest Neighbor Oversampling) is a method for addressing class imbalance in a dataset by generating synthetic samples for the underrepresented class. Class imbalance can occur when one class in a dataset has significantly fewer examples than the other class, which can lead to biased machine learning models that are more likely to make predictions in favor of the more prevalent class.

One of the main advantages of KNNOR oversampling is that it does not necessitate any prior knowledge about the data distribution or the underlying relationships between the features and the target class. This makes it a relatively simple and flexible method that can be utilized for various datasets and classification tasks.

Overall, KNNOR oversampling can be a useful tool for addressing class imbalance in a dataset and enhancing the effectiveness of machine learning models. However, it is important to consider the potential drawbacks of this approach and to use it in combination with other techniques, such as feature selection or model hyperparameter tuning, to ensure optimal model performance.

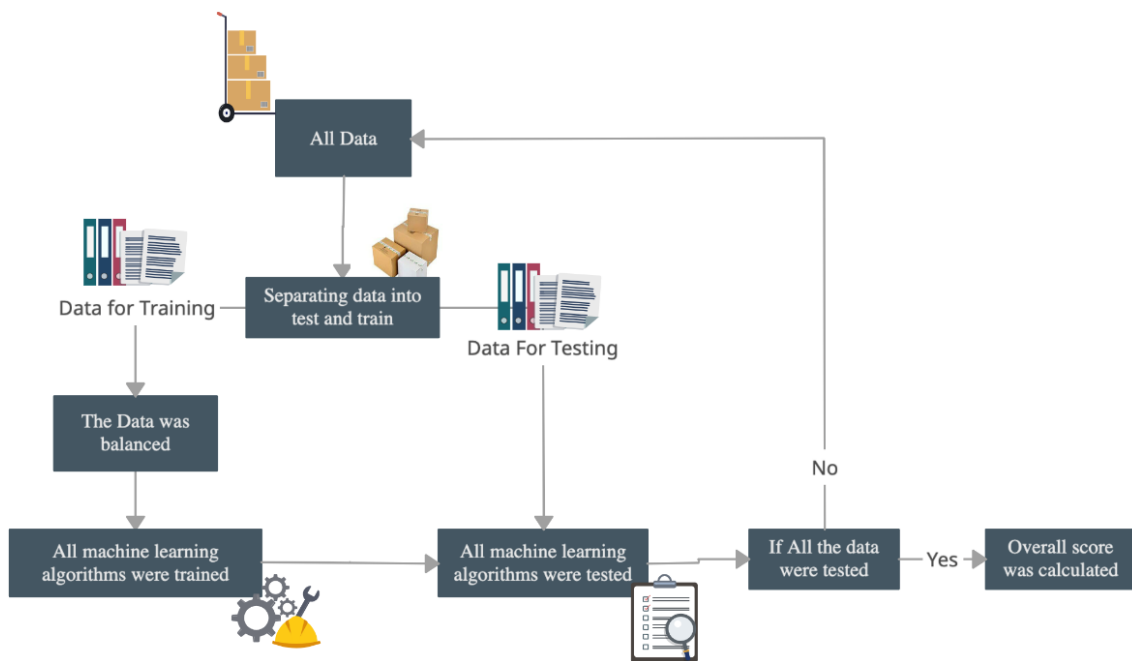
## 3. Process flow

Before using mentioned oversampling techniques, Random Forest, Decision Trees, and Support Vector Machines machine learning algorithms were used to get the accuracy in order to compare with the data sets

which will be balanced using the oversampling techniques. The n-fold cross-validation method was applied in the training of the model and the results were noted. After this process, balancing the data process started.

It is a common mistake that the artificial data that was created in oversampling technique should not be used for testing the algorithm, it should be only used for training so that it wouldn't give inaccurate results. In order to achieve this technique the process flow shown in Figure 2 was used.

1. The data was divided into N random equal-sized subsamples.
2. One of the n subsamples which hadn't been used was separated.
3. First, the rest of the data were balanced with the oversampling methods.
4. The mentioned machine learning algorithms were trained with balanced data.
5. The test data was used to test the mentioned machine learning algorithms which were trained.
6. The results were noted.
7. If all the data was not tested, step one was repeated.
8. The overall results were calculated and noted to compare.



**Figure 2.** Architecture of proposed study

#### 4. Results and discussion

We compared the performance of two oversampling techniques, SMOTE and KNNOR, on four different datasets using three machine learning algorithms: Decision Tree, Random Forest, and SVM. The datasets used in this study include the Hepatitis dataset, the Statlog dataset, the Mathematics dataset (Student), and the Portuguese dataset (Student). For each dataset, we evaluated the accuracy of the models using an unbalanced dataset and two different balanced datasets generated with SMOTE and KNNOR as shown in Table 4.

The units of data in Table 4 are expressed in terms of accuracy, which is a measure of how well a machine learning model performs. Accuracy is represented as a decimal value between 0 and 1, with 1 indicating perfect accuracy and 0 indicating the absence of accurate predictions. In this table, the accuracy values are presented with two decimal places, such as 0.77 or 0.91, which can also be interpreted as percentages by multiplying them by 100 (e.g., 77% or 91%).



**Table 4.** Accuracy results of the study with machine learning and high-speed sampling method.

<b>Hepatitis dataset (2 classes)</b>			
	<b>Unbalanced data</b>	<b>Balanced with smote</b>	<b>Balanced with knnor</b>
<i>Decision tree</i>	0.77	0.81	0.80
<i>Random forest</i>	0.87	0.85	0.85
<i>SVM</i>	0.79	0.57	0.76
<b>The statlog dataset (6 classes)</b>			
	<b>Unbalanced data</b>	<b>Balanced with smote</b>	<b>Balanced with knnor</b>
<i>Decision tree</i>	0.84	0.83	0.82
<i>Random forest</i>	0.90	0.90	0.90
<i>SVM</i>	0.88	0.87	0.87
<b>Mathematics dataset (Student) (5 classes)</b>			
	<b>Unbalanced data</b>	<b>Balanced with smote</b>	<b>Balanced with knnor</b>
<i>Decision tree</i>	0.66	0.68	0.67
<i>Random forest</i>	0.70	0.70	0.71
<i>SVM</i>	0.66	0.70	0.73
<b>Portuguese dataset (Student) (2 classes)</b>			
	<b>Unbalanced data</b>	<b>Balanced with smote</b>	<b>Balanced with knnor</b>
<i>Decision tree</i>	0.91	0.91	0.91
<i>Random forest</i>	0.93	0.93	0.93
<i>SVM</i>	0.91	0.92	0.92

Our results showed that the use of oversampling techniques did not always improve the accuracy of the model. In fact, in some cases, the accuracy decreased when using these techniques. The results also showed that the effectiveness of the oversampling techniques varied depending on the dataset and machine learning algorithm being used.

For the Hepatitis dataset, the Decision Tree model achieved an accuracy of 0.77 on the unbalanced dataset, 0.81 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.80 on the dataset balanced with KNNOR. The Random Forest model achieved an accuracy of 0.87 on the unbalanced dataset, 0.85 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.85 on the dataset balanced with KNNOR. The SVM model achieved an accuracy of 0.79 on the unbalanced dataset, 0.57 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.76 on the dataset balanced with KNNOR.

For the Statlog dataset, the Decision Tree model achieved an accuracy of 0.84 on the unbalanced dataset, 0.83 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.82 on the dataset balanced with KNNOR. The Random Forest model achieved an accuracy of 0.90 on all three datasets, while the SVM model achieved an accuracy of 0.88 on the unbalanced dataset, 0.87 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.87 on the dataset balanced with KNNOR.

For the Mathematics dataset (Student), the Decision Tree model achieved an accuracy of 0.66 on the unbalanced dataset, 0.68 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.67 on the dataset balanced with KNNOR. The Random Forest model achieved an accuracy of 0.70 on all three datasets, while the SVM model achieved an accuracy of 0.66 on the unbalanced dataset, 0.70 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.73 on the dataset balanced with KNNOR.

For the Portuguese dataset (Student), the Decision Tree model achieved an accuracy of 0.91 on all three datasets. The Random Forest model achieved an accuracy of 0.93 on all three datasets, while the SVM model achieved an accuracy of 0.91 on the unbalanced dataset, 0.92 on the dataset balanced with SMOTE, and 0.92 on the dataset balanced with KNNOR.

It is important to note that the effectiveness of oversampling techniques is highly dependent on the nature of the data being analyzed. Our results indicate that oversampling techniques may not be necessary for datasets that are already well-balanced. In such cases, oversampling may actually introduce noise and lead to a decrease in accuracy.

Furthermore, our results suggest that the choice of machine learning algorithm is an important factor to consider when using oversampling techniques. For example, our findings showed that the performance of the SVM algorithm was significantly affected by the use of oversampling techniques. In contrast, the Random Forest algorithm was less sensitive to the use of oversampling techniques, and in some cases, showed no improvement in accuracy with the use of SMOTE or KNNOR.

The Portuguese (student) dataset exhibits the highest degree of imbalance with an imbalance ratio of 5.49, indicating a more disproportionate distribution of instances across its classes compared to other datasets. In contrast, the Statlog dataset has the least imbalance, with an imbalance ratio of 2.45, suggesting a relatively more even distribution of instances among its classes. Understanding the degree of imbalance within each dataset allows practitioners to tailor their approaches to develop more accurate and robust classification models accordingly.

We calculated the mean absolute deviation, also known as the average distance, to measure the dispersion of data points in a dataset relative to the mean. Our analysis showed that the mean absolute deviation was 0.2925, indicating that on average, data points deviate from the mean by approximately 0.2925 units. This measure provides insight into the dispersion of the data, which can be helpful in understanding the overall distribution and consistency of the dataset.

Our results revealed that the use of oversampling techniques did not consistently improve the accuracy of the model. In fact, in some instances, the accuracy decreased when using these techniques. The effectiveness of the oversampling techniques varied depending on the dataset and the machine learning algorithm being used. It is important to note that the effectiveness of oversampling techniques highly depends on the nature of the data being analyzed. Our results indicate that oversampling techniques may not be necessary for datasets that are already well-balanced, and in such cases, oversampling may introduce noise and lead to decreased accuracy.

After conducting a more detailed analysis, we discovered that the results obtained from these techniques varied depending on the specific machine learning algorithm employed. Specifically, we found that SMOTE gave a slightly better result when used with the Decision Tree algorithm, while KNNOR had a slightly better score when applied to SVM algorithms.

Overall, our study highlights the importance of carefully evaluating the effectiveness of oversampling techniques on a case-by-case basis. In some cases, oversampling techniques may not be necessary and may even lead to a decrease in accuracy. Therefore, it is crucial to carefully evaluate the performance of machine learning models with and without oversampling techniques in order to determine the best approach for a given dataset and algorithm. By doing so, we can ensure that the models we develop are accurate and reliable, and that we can extract useful and valid information from large datasets through the process of KDD and data mining.

Looking towards the future, there are several areas for further investigation. For example, additional research is needed to determine the optimal oversampling technique for the Hepatitis dataset with an SVM machine learning algorithm. It would also be useful to expand the scope of this study to include a wider range of datasets and machine learning algorithms, in order to have a more complete understanding of the performance of SMOTE and KNNOR. Additionally, it would be interesting to investigate the performance of these techniques in conjunction with other approaches for addressing class imbalance, such as undersampling or class weight adjustments.

[Chawla et al. \(2002\)](#) introduced the SMOTE algorithm, which demonstrated improved classification performance for minority classes and is applicable to various machine learning algorithms ([Chawla et al., 2002](#)). However, the effectiveness of SMOTE varies depending on the dataset and machine learning algorithm, and may introduce noise in some cases, leading to decreased accuracy. In our study, we found that the effectiveness of SMOTE and KNNOR oversampling techniques depends on the specific dataset and machine learning algorithm employed, which supports the notion that their performance can vary depending on the context.

Han et al. (2005) proposed the Borderline-SMOTE algorithm, which is a variation of the original SMOTE algorithm (Han et al., 2005). They demonstrated the effectiveness of their approach on several datasets, with improvements in classification performance over the original SMOTE. However, our study focused on comparing the original SMOTE and KNNOR techniques, and future research could consider evaluating Borderline-SMOTE as well. Since we did not evaluate Borderline-SMOTE in our study, we cannot directly compare its performance, but it may have potential similar limitations as the original SMOTE depending on the dataset and machine learning algorithm.

Batista et al. (2004) conducted a comprehensive study on various methods for balancing machine learning training data, including oversampling, under sampling, and hybrid approaches (Batista et al., 2004). Their findings highlighted the importance of using a suitable balancing method depending on the dataset and learning algorithm. Although their study does not specifically focus on SMOTE and KNNOR, it reinforces the idea that selecting the appropriate balancing method is crucial for improving classification performance.

Our study contributes to the existing body of knowledge by investigating the effectiveness of SMOTE and KNNOR oversampling techniques with different machine learning algorithms and datasets. We provided insights into the factors that influence the performance of oversampling techniques, such as the choice of machine learning algorithm and the nature of the dataset. However, we did not explore the performance of other oversampling techniques, such as Borderline-SMOTE, which limits our understanding of their potential benefits.

## 5. Conclusions

In conclusion, the study has shown that the performance of SMOTE and KNNOR oversampling techniques can vary significantly depending on the specific dataset and machine learning algorithm being used. Both methods did not consistently enhance the precision of the model, but were successful in raising the accuracy on specific datasets. The effectiveness of these methods varied depending on the type of machine learning algorithm applied, with SMOTE giving a slightly better result when used with the Decision Tree algorithm and KNNOR having a slightly better score when applied to SVM and Random Forest algorithms. These findings have important implications for the selection of oversampling techniques in machine learning applications and call for further research in this area. Overall, our results provide valuable insights into the performance of SMOTE and KNNOR oversampling techniques and can inform future research in this area.

## Author contribution

For this study, the author responsible for the development of the methodology, writing the original draft, validation, and conceptualization is İsmet Abacı; the author responsible for the supervision, formal analysis, and writing is Kazim Yildiz.

## Declaration of ethical code

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 there is no conflict of interest.

## References

Adekitan, A. I., & Salau, O. P. (2019). The impact of engineering students' performance in the first three years on their graduation result using educational data mining. *Heliyon*, 5(2), e01250. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01250>

Ashwin Srinivasan (1988). UCI Machine Learning Repository. Retrieved from <http://archive.ics.uci.edu/ml>

- Asif, R., Merceron, A., & Pathan, M. K. (2014). Predicting Student Academic Performance at Degree Level: A Case Study. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 7(1), 49–61. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.01.05>
- Balcı, M. A., Taşdemir, Ş., Özmen, G., & Golcuk, A. (2022). Machine Learning-Based Detection of Sleep-Disordered Breathing Type Using Time and Time-Frequency Features. *Biomedical Signal Processing and Control*, 73, 103402. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103402>
- Yasar, A. (2023). Benchmarking analysis of CNN models for bread wheat varieties. *European Food Research and Technology*, 249(3), 749-758.
- Unlarsen, M. F., Sonmez, M. M., Aslan, M. F., Demir, B., Aydin, N., Sabanci, K., & Ropelewska, E. (2022). CNN–SVM hybrid model for varietal classification of wheat based on bulk samples. *European Food Research and Technology*, 248(8), 2043–2052. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04029-4>
- Kaya, E., & Saritas, İ. (2019). Towards a real-time sorting system: Identification of vitreous durum wheat kernels using ANN based on their morphological, colour, wavelet and gaborlet features. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105016. doi:10.1016/j.compag.2019.105016
- Sabanci, K., Aslan, M. F., Ropelewska, E., & Unlarsen, M. F. (2022). A convolutional neural network-based comparative study for pepper seed classification: Analysis of selected deep features with support vector machine. *Journal of Food Process Engineering*, 45(6), e13955.
- Batista, G. E. a. P. A., Prati, R. C., & Monard, M. C. (2004). A study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data. *SIGKDD Explorations*, 6(1), 20–29. <https://doi.org/10.1145/1007730.1007735>
- Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-32. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. J., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297. <https://doi.org/10.1007/bf00994018>
- Cortez, P., & Silva, A. L. (2008). Using data mining to predict secondary school student performance. *EUROSIS*. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/8024/1/student.pdf>
- Douzas, G., & Bacao, F. (2018). Improving imbalanced learning through a heuristic oversampling method based on k-means and SMOTE. *Information Sciences*, 465, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.06.056>
- Douzas, G., & Bacao, F. (2018a). Effective data generation for imbalanced learning using conditional generative adversarial networks. *Expert Systems with Applications*, 91, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.09.030>
- Flores, A. R., Icoy, R. I., Pena, C. L., & Gorro, K. D. (2018). *An Evaluation of SVM and Naive Bayes with SMOTE on Sentiment Analysis Data Set*. <https://doi.org/10.1109/iceast.2018.8434401>
- Gail Gong (1988). UCI Machine Learning Repository. Retrieved from <http://archive.ics.uci.edu/ml>
- Galar, M., Fernández, A. Á., Barrenechea, E., Bustince, H., & Herrera, F. (2012). A Review on Ensembles for the Class Imbalance Problem: Bagging-, Boosting-, and Hybrid-Based Approaches. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 42(4), 463–484. <https://doi.org/10.1109/tsmcc.2011.2161285>
- Golcuk, A., & Yasar, A. (2023). Classification of bread wheat genotypes by machine learning algorithms. *Journal of Food Composition and Analysis*, 119, 105253. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105253>
- Han, H., Wang, W., & Mao, B. (2005). Borderline-SMOTE: A New Over-Sampling Method in Imbalanced Data Sets Learning. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 878–887). Springer Science+Business Media. [https://doi.org/10.1007/11538059\\_91](https://doi.org/10.1007/11538059_91)
- Islam, A., Samir, B. B., Rahman, A., & Bensmail, H. (2022). KNNOR: An oversampling technique for imbalanced datasets. *Applied Soft Computing*, 115, 108288. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108288>

- Liu, J. (2021). Importance-SMOTE: a synthetic minority oversampling method for noisy imbalanced data. *Soft Computing*, 26(3), 1141–1163. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06532-4>
- Maimon, O., & Rokach, L. (2009). Introduction to Knowledge Discovery and Data Mining. In *Springer eBooks* (pp. 1–15). [https://doi.org/10.1007/978-0-387-09823-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09823-4_1)
- Márquez-Vera, C., Cano, A., Romero, C., & Ventura, S. (2013). Predicting student failure at school using genetic programming and different data mining approaches with high dimensional and imbalanced data. *Applied Intelligence*, 38(3), 315–330. <https://doi.org/10.1007/s10489-012-0374-8>
- Srinilta, C., & Kanharattanachai, S. (2021). *Application of Natural Neighbor-based Algorithm on Oversampling SMOTE Algorithms*. <https://doi.org/10.1109/iceast52143.2021.9426310>
- Strecht, P., Cruz, L. J., Soares, C. J., Mendes-Moreira, J., & Abreu, R. (2015). A Comparative Study of Classification and Regression Algorithms for Modelling Students' Academic Performance. In *Educational Data Mining*. <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED560769.pdf>
- Swain, P. H., & Hauska, H. (1977). The decision tree classifier: Design and potential. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 15(3), 142–147. <https://doi.org/10.1109/tge.1977.6498972>

## 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.