



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdergisi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdergisi
Cilt: 15, Sayı: 2, Haziran 2024 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Mehmet Sıraç ÖZERDEM
Senem YILMAZ ÇETİN
Muhammet Ali ARSERİM
Abdulnasır YILDIZ
Mustafa CANSIZ
Mehmet NERGİZ
Askeri KARAKUŞ
Bilal GÜMÜŞ
Abdulkadir ALBAYRAK
Felat DURSUN
Atilla Gencer DEVECİOĞLU
Hüseyin ACAR
Abidin ÇALIŞKAN
İdris BEDİRHANOĞLU
Fevzi ÖNEN

Tasarım-Dizgi / Designing-Editing
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır
Telefon : +90-412 241 10 00 (Dahili: 3637)
Elektronik posta : muhendislikdergisi@dicle.edu.tr
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>, <https://duje.dicle.edu.tr/journal/>

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309-8640
Online ISSN: 2146-4391

Hakem Listesi / Reviewers List

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.

- Bülent Tavlı (ITU)
Buket Kaya (Fırat Üniversitesi)
Mehmet Kaya (Fırat Üniversitesi)
Murat Doğruyel (Siirt Üniversitesi)
Merve Şahin Yön (Munzur Üniversitesi)
Hakan Çelik (Fırat Üniversitesi)
Davut İzci (Batman Üniversitesi)
Zehra Kadiroğlu (Fırat Üniversitesi)
Ahmet Çelik (Kütahya Dumlupınar Üniversitesi)
Elife Öztürk Kıyak (Dokuz Eylül Üniversitesi)
İpek Atık (Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)
Leyla Akbulut (Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi)
Kerim Karadağ (Harran Üniversitesi)
Hasan Polat (Bingöl Üniversitesi)
Mesut Şeker (Dicle Üniversitesi)
Kazım Hanbay (İnönü Üniversitesi)
Cem Korkmaz (Çukurova Üniversitesi)
Onur Erdem Korkmaz (Atatürk Üniversitesi)
Emrullah Acar (Batman Üniversitesi)
Ömer Türk (Mardin Artuklu Üniversitesi)
Deniz Akbay (Çanakkale 18 Mart Üniversitesi)
Gökhan Ekincioğlu (Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi)
Onur Silahtar (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)
Pınar Cihan (Tekirdağ Namık Kemal University)
Ahmet Elbir (YTU)
Alican Aktaş (Munzur Üniversitesi)
Tamer Rızaoğlu (Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi)
Yavuz Ateş (YTU)
Faruk Erken (Kastamonu Üniversitesi)
Taner Göktaş (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Yusuf Özçatalbaş (Gazi Üniversitesi)
Aydın Tahmasebifar (Sağlık Bilimleri Üniversitesi)

Ali Mardani (Uludağ Üniversitesi)
Süleyman Özen (Bursa Teknik Üniversitesi)
Ömer Ali Karaman (Batman Üniversitesi)
Kadriye Kızılbay (Acıbadem Üniversitesi)
Nuray Beköz Üllen (İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa)
İbrahim Karaağaç (Gazi Üniversitesi)
İlke Ciritci (İstanbul Gelişim Üniversitesi)
Muhammet Kurucu (Fırat Üniversitesi)
Ayşe Bilhan (Nevşehir Üniversitesi)
Muhammed Yıldırım (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)
Sercan Yalçın (Adıyaman Üniversitesi)
Ercan Işık (Bitlis Eren Üniversitesi)
Murat Dal (Munzur Üniversitesi)
Ertuğrul Gül (Hakkari Üniversitesi)
İbrahim Uyanık (Erciyes Üniversitesi)
Seda Tözüm Akgül (Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi)
Fevzi Sarıtaş (ITU)
İdris Bedirhanoglu (DU)
Mehmet Emin Asker (DU)
Yurdagül Benteşen Yakut (DU)
Emrah Aslan (DU)
Cem Haydaroglu (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- Bölümleyici Kümeleme için Doğru Merkezi Noktaların Tayini (Araştırma Makalesi)
Determining Accurate Centroids in Partitional Clustering (Research Article)
Sibel Tariyan Özyer 277
- Design and Simulation of the Guidance and Control System for Gliding Munitions
(Research Article)
Muhammed Alaçam, Osman Çiçek 285
- A Novel Chemometric Learning Of Virgin And Deep Frying Olive-Oil By Fourier Transform
Infrared Spectroscopy (FTIR) (Research Article)
Kerim Karadağ, Gizem Yücegönül, Stephen Steve Kelley, Eyyüp Karaoğul 293
- Aritma tesislerinde enerji tasarrufu için alınabilecek önlemler, maliyet analizi ve
amortisman süreleri (Research Article)
*Precautions That Can Be Taken for Energy Saving in Treatment Facilities, Cost Analysis
and Amortization Periods (Research Article)*
Bayram Durmuş, Mustafa Mikail Özçiloğlu 301
- Derin Öğrenme (1D-CNN, RNN, LSTM, BiLSTM) ile Enerji Tüketim Tahmini: Diyarbakır
AVM Örneği (Research Article)
*Energy Consumption Forecasting with Deep Learning (1D-CNN, RNN, LSTM, BiLSTM):
Diyarbakır Shopping Mall Example (Research Article)*
Yusuf Berus, Yurdağül Bentesen Yakut 311
- Transfer Öğrenme Yaklaşımı Kullanılarak İzolatör Kusurlarının Tespiti
(Araştırma Makalesi)
Detection of Insulator Defects Using Transfer Learning Approach (Research Article)
Muhammed Buğracan Özküçük, Ömer Faruk Alçın, Muhsin Tunay Gençoğlu 323
- Çiğ Sütün Yağlılık Oranının Yakın Kızılötesi Spektroskopisi Sinyalleri ile Tespit
Edilmesi (Araştırma Makalesi)
*Determining the Fatty Rate of Raw Milk with Near Infrared Spectroscopy Signals
(Research Article)*
Tuğba Aydemir 331
- DoS and DDoS Attacks on Internet of Things and Their Detection by Machine
Learning Algorithms (Research Article)
Mustafa Muhammed Şimşek, Emrah Atılğan 341
- PSO ile Optimize Edilen Bulanık Mantık Kontrolörü ile LabVIEW Platformunda
DA Motor Kontrolü (Araştırma Makalesi)
*DC Motor Control on LabVIEW Platform with Fuzzy Logic Controller Optimized
with PSO (Research Article)*
Hakan Çelik, Hasan Güler 355

Hiyerarşik Bölücü Kümeleme ile Çok Sınıflı Sınıflandırma Performansının Geliştirilmesi: Kümeleme Algoritmaları Üzerine Karşılaştırmalı Bir Analiz (Araştırma Makalesi) <i>Improving Multiclass Classification Performance with Hierarchical Divisive Clustering: A Comparative Analysis on Clustering Algorithms (Research Article)</i> Celal Alagöz	363
V2G Uygulamalarında Elektrikli Araçların Dağıtım Şebekesine Optimum Entegrasyonunun Analizi İçin Newton Raphson Temelli Yeni Bir Model (Araştırma Makalesi) <i>A New Newton Raphson Based Model For Analysis Of Optimum Integration Of Electric Vehicles Into The Distribution Network In V2G Applications (Research Article)</i> Bünyamin Kuzu, Ozan Akdağ, Mustafa Nurmuhammed, Teoman Karadağ	375
Bulanık Mantık Tabanlı Rogers ve IEC metotlar Kullanarak Güç Transformatör Arızalarının Belirlenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Determination of Power Transformer Faults Using Fuzzy Logic Based Rogers and IEC Methods (Research Article)</i> Abdurrahim Turan, Abuzer Çalışkan	387
Geleneksel Makine Öğrenmesi Yöntemleri ve Metasezgisel Yöntemlerle Öznitelik Seçim Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Araştırma Makalesi) <i>Comparison of Traditional Machine Learning Methods and Metaheuristic Methods for Attribute Selection (Research Article)</i> İsmail Açar, İbrahim Berkan Aydilek	397
Doyum ve Histerezis Etkilerini İçeren Tek Fazlı Transformatörün Modellenmesi ve Nonlineer Yük Etkilerinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Modeling of a Single Phase Transformer Including Saturation and Hysteresis Effects and Examining Nonlinear Load Effects (Research Article)</i> Şilan Çalışkan, Hüseyin Altun	411
Derin Öğrenme ve Özellik Seçimi Yaklaşımları Kullanılarak Göz Hastalıkları Tespiti (Araştırma Makalesi) <i>Eye Disease Detection Using Deep Learning and Feature Selection Approaches (Research Article)</i> Ahmet Ciran, Erdal Özbay	421

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

3U ve 12U küp uyduların fırlatma ve uzay koşullarındaki yapısal davranışlarının incelenmesi (Research Article) <i>Investigation of structural behaviors of 3U and 12U cube satellites under launch and space conditions (Research Article)</i> Ahmet Özdemir, Şakir Altınsoy, Nuray Beköz Üllen, M. Hüsnü Dirikolu	435
Farklı soğutma ortamları kullanılarak ısıl işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının SBF ve Hank solüsyonlarında biyokorozyon davranışının incelenmesi (Research Article) <i>Investigation of biocorrosion behavior of heat-treated Ti6Al4V alloy in SBF and Hank solutions using different cooling environments (Research Article)</i> Şakir Altınsoy, Rezzan Yardımcı, Fatma Zehra Köse, Gökçe Koç	453

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

- Preparation and Performance Comparison of Autoclaved Aerated Concrete by Using Ceramic and Glass Wastes Instead of Silica (Research Article)
Nilgün Kızılkaya, Didem Eren Sarıcı 463
- Çarpışma sonrası oluşan sub-litosferik manto kökenli alkalin lavlar: Elazığ volkanitleri (Araştırma Makalesi)
Sub-lithospheric mantle-derived alkaline lavas formed after the collision: Elazığ volcanics (Research Article)
Sevcan Kürüm, Safiye Aydemir, Abdullah Sar, İsmail Yıldırım 481

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- Van-Süphan Dağı bölgesinde bulunan bazalt kayaların demiryolunda balast malzemesi olarak kullanımının değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)
Evaluation of the use of basalt rocks in Van-Süphan mountain region as ballast material in railway (Research Article)
Fırat Kıpçak 495
- Deep Learning Approaches for Autonomous Crack Detection in Concrete Wall, Brick Deck and Pavement (Research Article)
Fethi Şermet, İshak Paçal 503
- Diyarbakır Meryem Ana Kilisesi'nin Yapım Teknikleri (Araştırma Makalesi)
Construction Techniques of Diyarbakır Virgin Mary Church (Research Article)
Sultan Saylık, Neslihan Dalkılıç 515
- Atık Taşıt Lastik Çelik Lifinin Beton Davranışına Etkisi (Araştırma Makalesi)
Effect of Waste Vehicle Tire Steel Fiber on Concrete Behavior (Research Article)
Ersin Ayhan, Murat Doğruyol, Fırat Kıpçak, Abdulhalim Karşın 525
- Treatment of Vegetable Oil Industry Wastewaters with Coagulation-flocculation Methods (Research Article)
Talip Turna, Yalçın Şevki Yıldız 533
- Lefkoşa Selimiye Camii Yapısal Özellikleri ve İyileştirilmiş Deprem Performansı İçin Bir Ön Çalışma (Araştırma Makalesi)
Structural Properties of Nicosia Selimiye Mosque and Preliminary Intervention Recommendations for Improved Seismic Performance (Research Article)
Tuğçe Alan, Alper İlki 541

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılabilirliği konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.



Design and Simulation of the Guidance and Control System for Gliding Munitions

Muhammed ALAÇAM^{1*}, Osman ÇİÇEK²

¹ Kastamonu University, Electrical-Electronics Engineering Department, muhammedalacam99@gmail.com, Orcid No: 0009-0005-8163-7592

² Kastamonu University, Electrical-Electronics Engineering Department, ocicek@kastamonu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-2765-4165

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 October 2023
Received in revised form 25 March 2024
Accepted 29 March 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Gliding munition, HITL, SITL, Line of Sight, XPLANE 11.

Doi: 10.24012/dumf.1378130

* Corresponding author

ABSTRACT

In this paper, a fixed wing, tail fin controlled gliding munition has been designed. A guidance and control system is developed for the designed model and the glide towards the target is tested in the XPLANE 11 flight simulator environment. The simulation was carried out in two stages, both in the software loop and in the hardware loop. After the munition system is released from the aircraft, it measures the angles that will enable gliding to the target coordinates with the guidance system and starts to control fin movements. It compares the instantaneous position data received from GPS with the target position data. With the LOS method, the pitch angle is found by comparing the heading angle required to reach the target and the instantaneous altitude information with the target altitude information. The angles found are compared with the information from the IMU sensor and the errors are processed in the PID controller. The output of the PID controller is converted as a PWM signal to the tail fins in accordance with the munition dynamics. The system was transferred to XPLANE 11 and scenarios with different initial conditions were tested.

Introduction

With the advancements in technology, military operations have seen the use of various weapon systems. Guided bombs, also known as aerial guided munitions, are one such system that can strike land and sea-based targets from a distance with air strikes [1, 2, 3, 4]. However, the fact that these systems do not have any propulsion engine causes their range and maneuverability to be limited [1]. Hence, the aircraft carrying the munitions has to come close to the target to execute the operation, increasing the risk of approaching enemy defense systems [5]. To minimize risk and ensure accuracy, the munition system's range, maneuverability, guidance, and control system must be designed accordingly.

The gliding munition is designed to precisely hit the target by gliding towards the target coordinates after being released from the aircraft [6, 7]. Since it doesn't have its own propulsion system, it must be released in the direction of the target coordinates with the initial speed and altitude. Figure 1 shows that the released ammunition goes through two stages. The first stage aims to maximize the glide ratio, while the second stage involves the diving phase of the munition when it gets close enough to the target.

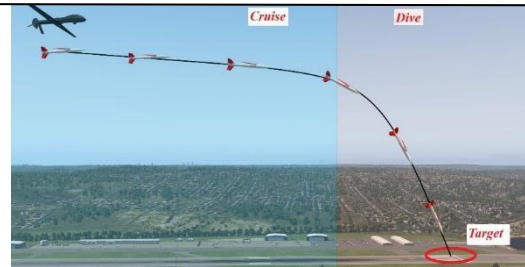


Figure 1. Release of gliding munitions from the aircraft towards the target.

The aim of this study was to design an efficient guidance and control system (GNC) that directs munitions towards their targets, while also contributing to the literature by testing the system in an alternative simulation environment. A conceptual munition model was developed to analyze and optimize the guidance and control system. The design of gliding munitions is influenced by various internal and external factors, as they are designed for a specific mission [8]. Additionally, hardware or software related problems may arise in guidance and control systems [9]. To address the complexity of the design process, a test setup was created, which involved real-time testing of a conceptual model for the software in the loop (sitr) and hardware in the loop (hitl) forms of the guidance and control system design. For this test setup, the XPLANE 11 flight simulator application developed by Laminar

Research was chosen, which allows for custom aircraft designs, real-time simulations, and data transfer [10].

Material and Method

This section addresses the theoretical foundation and essential components required to develop a Guidance and Control System (GNC) that effectively directs munitions towards their targets. The study elaborates on the integration of subsystems that form the basis of the GNC system, how these subsystems come together to create the main system, the critical electronic components necessary for the system's functionality, and the design of the conceptual model. This approach aims to thoroughly examine the aspects of the munition guidance process, thereby maximizing the designed system's capability to reach its targets.

Guidance

In order for gliding munitions to hit their target accurately, an accurate guidance angle and pitch angle are required. The Line of Sight method can be used to determine these angles.

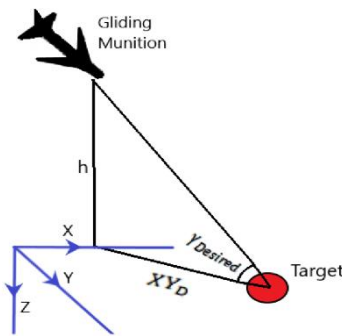


Figure 2. Desired yaw and flight path angle [11].

In Figure 2, XYD represents the distance between the aircraft and the target in the XY plane of the Earth's fixed frame. The variable h indicates the height of the missile relative to the target. According to the figure, the desired flight path angle, as determined by Equation (1), is needed for ensuring optimal trajectory alignment and effective target engagement [11].

$$\gamma_{Desired} = \text{atan} \frac{h}{XY_D} \tag{1}$$

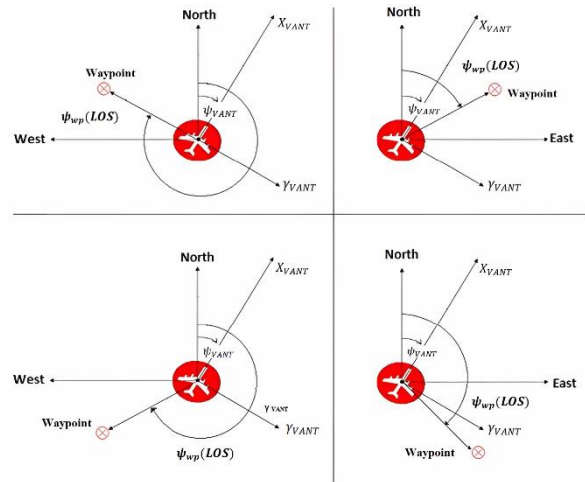


Figure 3. Line of Sight [9-10].

Equation (2) calculates the direction angle, which provides the output in an angle format ranging between 0 and 360 degrees. However, it is necessary to convert these angles between -180 and +180 degrees while determining the trajectory of the gliding munition [12].

$$LoS = \text{atan2} \left[\frac{Lon_{Target} - Lon_{aircraft}}{Lat_{Target} - Lat_{aircraft}} \right] \tag{2}$$

Direction and flight angle values are inputted into the control system to glide towards the target.

Control

To ensure the aircraft maintains the desired roll and pitch values, the instantaneous data is compared to them. Any deviation from these values is processed using PID control. The output generated by this process is then used to control the motors of the tail flaps. The control system schematic is shown in figure 3. [13].

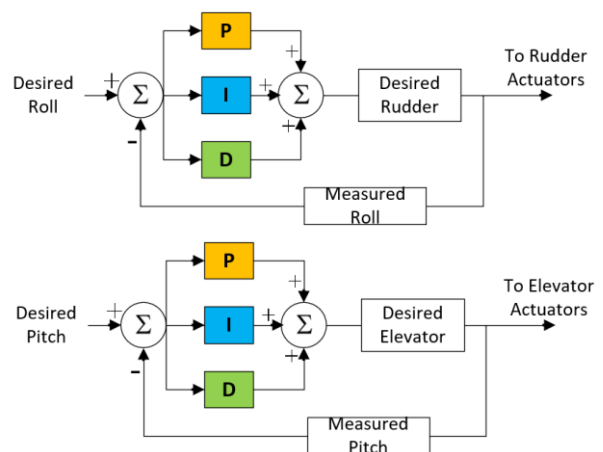


Figure 3. Block Diagram of PID Control System on UAV.

The control system shown in Figure 3 is critically important for ensuring the gliding munition progresses

towards the target effectively and accurately. It corrects deviations in the munition's roll and pitch by detecting them and adjusting through a Proportional-Integral-Derivative (PID) control loop. Proportional control responds proportionally to the difference between the munition's current state and the desired target, while integral control balances cumulative errors over time, ensuring long-term accuracy. Derivative control mitigates sudden changes, contributing to system stability. Correction signals are transmitted to the fin actuators, adjusting the movements of the munition's control surfaces to achieve the desired trajectory. The accurate setting of PID control constants—Proportional (Kp), Integral (Ki), and Derivative (Kd)—balances the system response speed and stability necessary for the munition to progress towards the target in a stable and controlled manner [6, 14, 15]. The PID control system was utilized in the X study, and parameter optimization was experimentally updated. In this study, PID parameters will be experimentally determined within the simulation environment to achieve the desired performance criteria.

Guidance Navigation Control System Design

To ensure that the gliding munition reaches its target, it needs to follow a specific path while controlling its fins. To achieve this, a Guidance Navigation Control (GNC) system was developed that is based on navigation, guidance, control systems [16]. Figure 4 displays the blocks for navigation, guidance, control, flight mode selection, and data transfer of the designed GNC system.

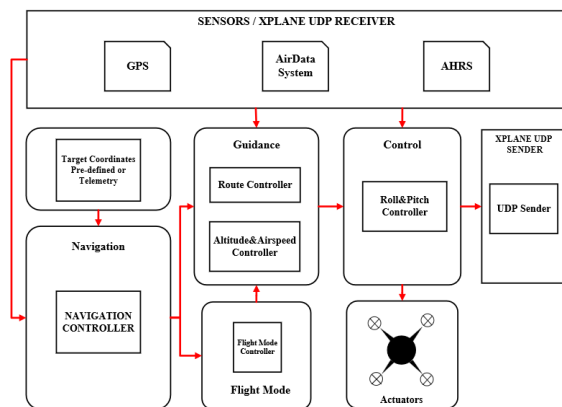


Figure 4. The GNC system architecture.

The data shown in Figure 4 is obtained through sensors or the XPLANE 11 UDP Receiver block. The system outputs are sent to the aileron actuators or the XPLANE 11 Sender block. In the Navigation block, GPS data is received instantly and compared with the target coordinates. The desired heading angle value is then found and sent to the route controller, while the distance to the target value is sent to the flight mode selector. The flight mode is selected based on the distance to the target, speed, and altitude. When the munition enters the area determined by its location and condition, the transition from the first phase, where the glide rate is kept at maximum, to the second phase, involving diving to the target, is realized.

The Guidance block consists of two subsystems - the Route Controller and the Altitude&Speed Control block. The desired heading parameter is the input to the Route Controller, which calculates the roll angle required to achieve the desired heading angle and transmits its output to the main control block. The Altitude&Speed control block receives speed, altitude, and flight mode as input. When operating under the first mode, it sends the required pitch value to the main control block to ensure minimum altitude loss by maintaining the altitude and speed ratio. When operating under the second mode, it sends the required pitch value to the main control block according to the distance and altitude to the target to perform the dive. The Roll&Pitch control block processes the required flight angles provided as input by the PID controller and generates outputs. The fin actuators of the munition or the XPLANE 11 UDP Sender block receives PWM signals as output. This structure allows for sitl and hitl simulations, ensuring the gliding of the ammunition system to the target.

Electronics

A gliding ammunition electronic system has been designed to ensure gliding, route creation, and tracking. The STM32F407VGTX board was preferred as the main controller due to its easy accessibility, low cost, and high number of ports that enable modifications to be made in future studies [17]. For target and instantaneous coordinate calculations, Radiolink SE100 GPS was chosen, while Waveshare 10 DOF IMU Sensor was preferred to calculate the angular and speed states of the aircraft [18, 19]. The smart munition has four servo motors for the rear fins and one servo motor for the front wing. The tail servos ensure that the gliding munition stays on the flight path to reach the target coordinate, while the front wing's servo is used to open the initially closed wing after it is released from the aircraft. For aircraft-ground station communication, the LORA SX1278 telemetry model was preferred. Figure 5 shows the electronic schematic of the gliding ammunition [20].

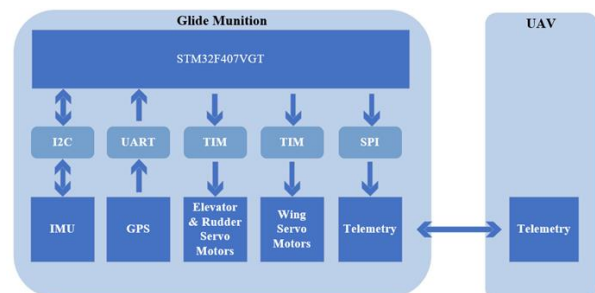


Figure 5. Electronic schematic of gliding ammunition.

Munition Model

A design concept was developed for an ammunition structure that could accommodate the guidance and control system. The design takes into consideration the containment of both the electronics and the warhead, as well as the range and glide rate parameters. Despite the complexity of the control mechanism associated with the x

configuration for the tail fin design, it is preferred due to its high lift-to-drag ratio [21], which is crucial for gliding systems. Figure 6 shows the 3D design of the structure.

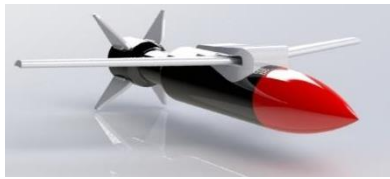


Figure 6. Gliding munition Model.

Simulation

This article reports on a simulation experiment that was conducted using the XPLANE 11 flight simulator application. The GNC system was tested using MATLAB SIMULINK's SITL function. The communication between the Simulink-created system and the XPLANE 11 application is shown in Figure 7, which utilizes the XPLANE fixed wing UDP Sender & Receiver blocks [10].

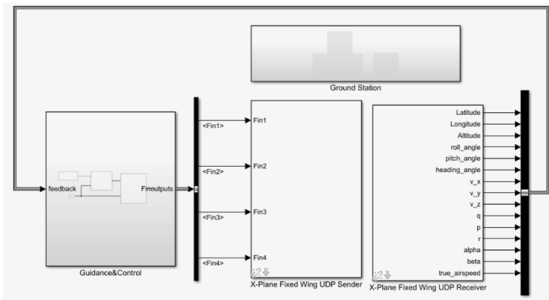


Figure 7. XPLANE 11 Sender&Receiver Blocks and GNC system.

To simulate the HITL (Hardware-in-the-Loop) scenario, a prototype was created using a 3D printer, and the necessary electronics were installed. The electronic system and the computer were connected via USB TTL for serial communication. Furthermore, the Plane Maker tool was utilized to create the ammunition structure in the XPLANE 11 simulation environment. Figure 8 illustrates the experimental setup formed by the SITL and HITL systems.

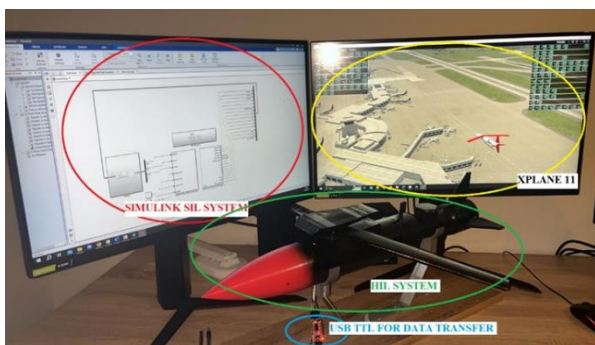


Figure 8. Experimental setup.

After several rounds of testing, the PID parameters were experimentally established as indicated in the table below:

Table 1. PID Parameters

Controller	K_p	K_i	K_d
Roll Controller	1.6	0.02	0.05
Pitch Controller	1.5	0.1	0.01

The simulation phase began with setting up the experimental environment and creating a flight application model. Figure 9 displays the flight control screen and a simulation sample output.

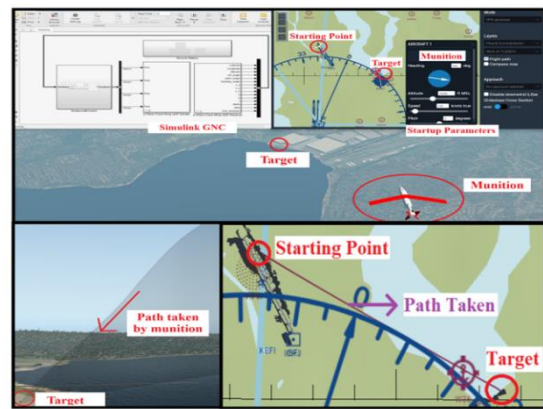


Figure 9. Flight display and munition trajectory.

Figure 9 illustrates the release of the gliding munition towards the target at a particular altitude and speed as specified in the mission description. The release scenario were tested in 2000 m and 150 heading degree with 60 knot releasing speed.

Simulation Results

The simulation test conducted reveals the glide path of the munition released from an altitude of 3600 meters and a heading angle of 150 degrees, as visualized in Figure 10. In the scenario, the trajectory followed by the gliding munition is depicted with a black-purple line to enhance visibility. This graphical representation not only highlights the precise route taken by the munition towards its target but also underscores the importance of visibility in tracking and analyzing the effectiveness of the munition's glide path. The use of a distinct color scheme aids in clearly distinguishing the trajectory amidst various environmental and operational variables, facilitating a more intuitive understanding of the munition's performance throughout its descent.



Figure 10. Glide path of munition released at 3600 m and 150 Heading Degree.

Figure 10 shows the glide path of the gliding munition towards the target point when released from an altitude of 3600 metres and a heading angle of 150 degrees.

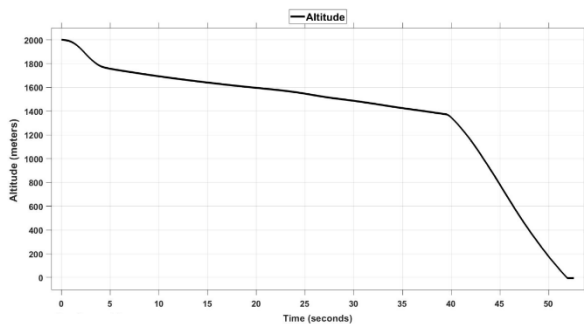


Figure 11. Altitude graph of munition released at 2000 m.

Figure 11 displays in detail the altitude profile of the gliding munition released from 3600 meters during its operation. This graph demonstrates how the munition loses altitude in response to air conditions and aerodynamic effects and how altitude control is achieved while it glides towards the target.

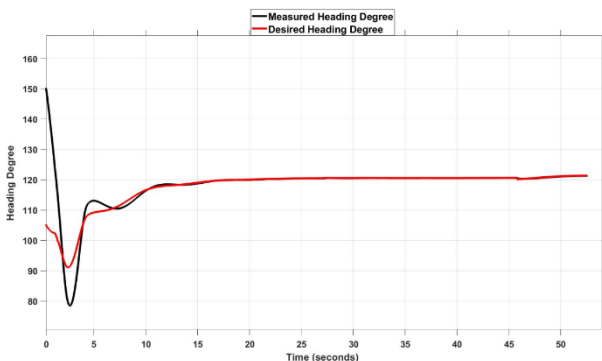


Figure 12. Heading degree graph of munition.

Figure 12 shows the changes in heading angles that a gliding munition, released with a 150-degree initial

heading angle, needs to achieve and actually achieves throughout its mission to accurately reach the target. This graph helps to understand which angular adjustments are applied to direct the munition towards the target and how accurately this process is managed.

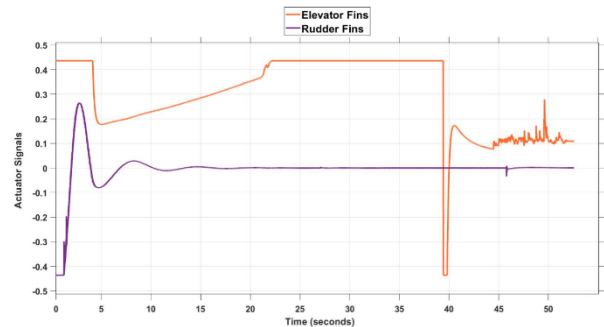


Figure 13. Elevator and Rudder Fin Actuator Signals.

Figure 13 focuses on the actuator signals for the elevator and rudder fins, integral components that facilitate the munition's maneuvering capabilities. The control mechanism receives these fundamental signals and converts them into appropriate motion commands for the munition's complex control surfaces in the 'X' configuration, namely the elevons and ruddervators. This conversion process is carefully calibrated according to the munition's aerodynamic profile and the maneuvering requirements of the mission scenario, ensuring that the munition can be precisely directed towards its target.

Findings

During the experimental phase, the munition was analyzed in a scenario. The result demonstrated that the munition accurately hit the target in test scenario. In particular, the munition successfully hit the target at an altitude of 3600 metres and with a heading difference of approximately 30 degrees, demonstrating that the GNC system provides the desired results in this area and that the XPLANE 11 application can be used to develop and test this system. These results show that the guidance and control system design is effective and suitable for various operational scenarios, and that the XPLANE 11 application can continue to be used in future studies during the simulation phase.

Conclusions

This study tests a GNC system operating on a gliding munition. Specifically, a PID controller based on the Line of Sight theory is tested in a simulation environment. The testing is performed as SITL between the GNC system developed in the SIMULINK environment and the XPLANE 11 application.

The results of the simulation tests indicate that the gliding munition system can hit the target with a high degree of accuracy, as long as it has sufficient altitude and is operating in suitable weather conditions. The lack of an engine on gliding munition systems means that they must

exhibit efficient control behavior, which was demonstrated in this study through the designed GNC system.

In addition to the simulation testing, the prototype production of the gliding munition was completed, and its electronic systems were integrated. A communication link was established using serial communication between the prototype's electronic system and XPLANE 11, facilitating tests on the electronic hardware in SIMULINK and guiding future research. The tests were conducted to determine if communication and control could be effectively maintained through the Hardware in the Loop (HITL) format during simulation, and successful results were obtained. Future studies will implement the full scenario over the hardware to further validate the system's capabilities.

Future studies should focus on optimizing the conceptual design of the model for the mission and improving the response of the controller to ensure precise hits even in harsh weather conditions. Overall, this study represents an important step towards the design and performance improvement of gliding munition systems. A new GNC system has been designed and demonstrated to be testable in Xplane 11. Further studies will be conducted to meet the requirements of the defense industry and to improve operational effectiveness.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

Acknowledgement

This research was supported by Kastamonu University Scientific Research Projects Coordination Department under the Grant No. KÜ-ÖOP/2022-07.

References

- [1] A. Attallah, A. Hafez, and A. Mohammady, "Attitude Control of Gliding Bomb using Classical PID and Modified PI-D Controllers," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, vol. 3, pp. 2458–9403, 2016, Accessed: Oct. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42351489.pdf>
- [2] I. H. Elandy, A. N. Ouda, A. Kamel, and Y. Z. Elhalwagy, "Modeling and Simulation of an Aerial Gliding Body in Free-Fall," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 7, no. 08, Aug. 2018.
- [3] S. Theodoulis and P. Wernert, "Flight Dynamics & Control for Smart Munition: The ISL Contribution," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 15512–15517, Jul. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2127>.
- [4] T. R. Yechout, *Introduction to Aircraft Flight Mechanics*. AIAA, 2003.
- [5] A. Mahmood, F. ur Rehman, and A. I. Bhatti, "Trajectory Optimization of a Subsonic Unpowered Gliding Vehicle Using Control Vector Parameterization," *Drones*, vol. 6, no. 11, p. 360, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/drones6110360>.
- [6] Lim, S., Pak, C., Cho, C., & Bang, H. (2014). Development of Flight Control System for Gliding Guided Artillery Munition-Part II: Guidance and Control. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 42(3), 229-236.
- [7] Seung-Han Lim, Jang-Ho Park, Chang-Yeon Cho, & Hyo-Chung Bang. (2014). Güdümlü süzülme mühimmatı uçuş kontrol sisteminin geliştirilmesi BölümII: Güdüm ve kontrol. *Kore Havacılık ve Uzay Topluluğu Dergisi*, 42(3), 229-236.
- [8] A. S. Atallah, G. A. El-Sheikh, A. E.-D. S. Mohamedy, and A. T. Hafez, "Modeling and Simulation for Free Fall Bomb Dynamics in Windy Environment," *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology*, vol. 16, no. AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT - 16 – May 26 - 28, 2015, pp. 1–12, May 2015, doi: <https://doi.org/10.21608/asat.2015.23009>.
- [9] X. Li, Daobo Wang and Qi Wang, "Design and Realization of a Hardware-in-the-Loop Simulation System for Aerial Guided Bombs," 2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, Shenzhen, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISSCAA.2008.4776203.
- [10] A. I. Hentati, L. Krichen, M. Fourati and L. C. Fourati, "Simulation Tools, Environments and Frameworks for UAV Systems Performance Analysis," 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Limassol, Cyprus, 2018, pp. 1495-1500, doi: 10.1109/IWCMC.2018.8450505.
- [11] Y. Günbatar, "Varying mass missile dynamics, guidance & control," open.metu.edu.tr, 2007. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/16983> (accessed Oct. 16, 2023).
- [12] A. Bittar, H. V. Figueiredo, P. A. Guimaraes, and A. C. Mendes, "Guidance Software-In-the-Loop simulation using X-Plane and Simulink for UAVs," 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014, Accessed: Dec. 06, 2022. [Online]. Available: https://www.academia.edu/32831263/Guidance_Software_In_the_Loop_simulation_using_X_Plane_and_Simulink_for_UAVs
- [13] Susanto, T., Setiawan, M. B., Jayadi, A., Rossi, F., Hamdhi, A., & Sembiring, J. P. (2021, October). Application of Unmanned Aircraft PID Control System for Roll, Pitch and Yaw Stability on Fixed Wings. In 2021 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE) (pp. 186-190). IEEE.
- [14] Arindya, R. (2016, April). Penalaan Kendali PID untuk pengendali proses. In PROSIDING SEMINAR NASIONAL CENDEKIAWAN.
- [15] Lim, S., Pak, C., Cho, C., & Bang, H. (2014). Development of Flight Control System for Gliding Guided Artillery Munition-Part I: Operational Concept and Navigation. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 42(3), 221-228.

- [16] West, K., Al-Nimer, S., Goel, V. R., Yanof, J. H., Hanlon, A. T., Weunski, C. J., ... & Farivar, B. S. (2021). Three-dimensional holographic guidance, navigation, and control (3D-GNC) for endograft positioning in porcine aorta: feasibility comparison with 2-dimensional x-ray fluoroscopy. *Journal of Endovascular Therapy*, 28(5), 796-803.
- [17] URL-1: STMicroelectronics STM32F407VG Microcontroller Documentation <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407vg.html> [Accessed: 12.03.2024]
- [18] URL-2: Radiolink SE100 User Manual <https://radiolink.com.cn/doce/UploadFile/ProductFile/SE100Manual.pdf> [Accessed: 12.03.2024]
- [19] URL-3: Waveshare 10 DOF IMU Sensor Documentation [https://www.waveshare.com/wiki/10_DOF_IMU_Sensor_\(D\)](https://www.waveshare.com/wiki/10_DOF_IMU_Sensor_(D)) [Accessed: 12.03.2024]
- [20] URL-4: Dorji DRF1278DM Data Sheet <http://www.dorji.com/docs/data/DRF1278DM.pdf> [Accessed: 12.03.2024]
- [21] M. Gün, "External configuration design and aerodynamic optimization of modular guided munitions," *open.metu.edu.tr*, 2019. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/44560>



Research Article

A Novel Chemometric Learning Of Virgin And Deep Frying Olive-Oil By Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Kerim KARADAĞ¹, Gizem YÜCEGÖNÜL², Stephen Steve KELLEY³, Eyyüp KARAOĞUL^{4*}

¹ Harran University, Electrical-Electronics Engineering Department, k.karadag@harran.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-5167-4054

² Harran University, Food Engineering Department, gzymcgnl@gmail.com, Orcid No 0000-0001-5802-4011

³ North Caroline State University, Department of Forest Biomaterials, sskelley@ncsu.edu, Orcid No 0000-0002-5048-3560

⁴ Harran University, Food Engineering Department, gzymcgnl@gmail.com, Orcid No 0000-0001-8162-6838

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 December 2023
Received in revised form 9 April 2024
Accepted 7 May 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

FT-IR, Chemometrik Method, Olive Oil, Deep Frying Oil.

Doi: 10.24012/dumf.1407248

* Corresponding author

ABSTRACT

Olive oil is a very valuable product with its unique flavor, taste, aroma and bioactive components. It is an oil obtained by squeezing the olive with its pit and can be consumed in its natural form without any chemical treatment. It is well valuable thanks to its features such as helping healthy nutrition, contributing to economic and agricultural areas and being environmentally friendly. It is one of the most adulterated products today. So oil quality and content have to be determined properly. The aim of this study is to examine the machine learning of chemometrically fried oils in virgin olive oil and eight times used olive oil compared using Fourier Transform Infrared spectroscopy. Deep-Frying Oils (DFO) was carried out 8 times for 20 minutes. Because of chemical quality of oils, Cis, Trans, Ester, Methyl, Carbonyl, peroxide, unsaturated peroxide and ether groups were used in These results were evaluated by classification and regression using machine learning methods. For these evaluations, firstly classification and regression were made using all properties of these index. In classification models, Linear Discriminant Analysis, Naïve Bayesian and Ensemble Tree were used. The evaluation was carried out in two stages. In the first stage, half of the dataset was used for training and the other half for testing. In the second stage, all data was used for training and testing using cross validation method. The success results obtained using the all data set was 100% with naïve Bayesian method. According to chemometric strategy, differences between virgin olive oils and DFO were found by high accuracy in this study. This phenomenon also could be possible for other oil types and degrees of purity. Results illustrated that the method is very suitable and exact for detection deterioration of olive oil.

Introduction

Olive oils (OO) are the product prepared from the olive of cultivated from olive trees (*Olea europaea* L.) Consumption of OO, which is the product of *Olea europaea* L., dates back to antiquity [1]. It has internationally accepted characteristic smell and taste [2]. On the other hand, OO is high cost product compared to other vegetable oils (sunflower oils, soy oils, corn oils, nut oils, peanut oils, hazelnut oils etc) [3].

Chemometry is defined as a multivariate data analysis method. It is used together with data-rich instrumental methods such as vibrational spectroscopic methods. These methods used to detect food trick and used for reducing data size, grouping samples qualitatively or classifying unknown samples and quantitatively detecting adulteration in sample [4]. Thanks to chemometric methods, scientific research will reach more accurate and faster results.

On the basis of machine learning (ML) algorithms, artificial intelligence applications are used efficiently in many sectors [5]. When the studies on the subject are examined;

Bellou et al. used ML methods in OO classification in their study [6]. Stefan et al. used ML methods to determine the quality of extra virgin olive oil (EVOO) in different olive varieties obtained by Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and absorption spectroscopy [7]. Gyftokostas et al. aimed to classify 36 OO varieties obtained using LIBS from different parts of Crete, Greece, according to their geographical origin by using ML algorithms [8]. Yakar and Karadağ aimed to use different learning algorithms to identify adulterated OO in which olive oil is blended with different vegetable oils [9]. Drakopoulou et al. conducted a comparative study to evaluate the quality and authentication of Greek olive oils using ML methods [10]. Gonzalez Viejo and Fuentes used ML methods to evaluate the level of odor and aroma in commercial extra virgin olive oils by examining four different varieties using near infrared spectroscopy (NIR) and an e-nose [11]. Venturiini et al. used fluorescence spectroscopy to evaluate three different grades of olive oils using different ML methods [12]. Hou et al. investigated the feasibility of rapidly identifying adulterated EVOO using low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) relaxation

measurement and ML approaches [13]. Gazeli et al. used ML methods to extract the information contained in the LIBS spectrum to classify olive oils according to their acidity [14]. Zhao et al. generated Raman spectra for ten commercial edible oils from various brands and analyzed them with supervised ML algorithms and then compared them with a principal component analysis (PCA) model [15]. Skiada et al. aimed to develop a classification model capable of olive variety identification based on olive oil chemistry [16]. Vega-marquez et al. combined chemical techniques and Deep Learning approaches to automatically classify three groups of olive oils corresponding to olive oil samples from two different harvests [17]. Gumus et al. evaluated different classification algorithms to reveal the most accurate one for authentication of Turkish olive oil [18].

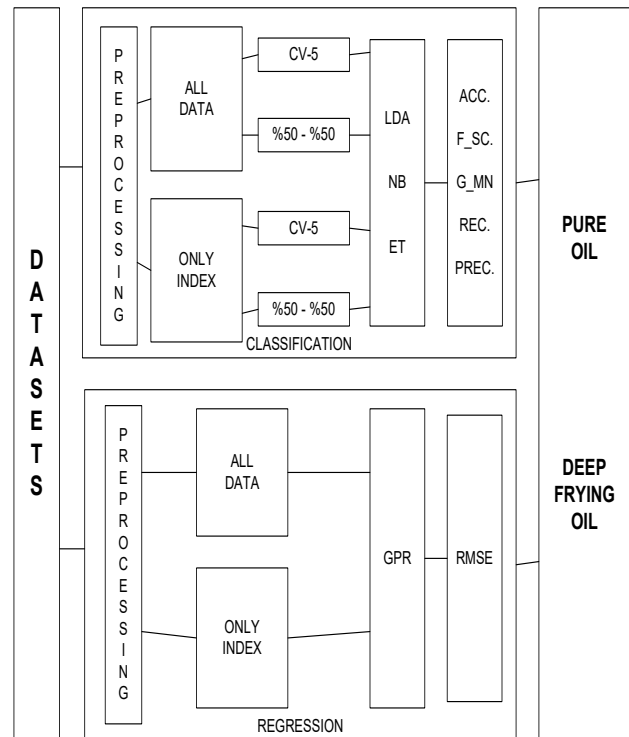
The aim of the present work is to develop a novel application of the chemometric methods thanks to rapid, cheaper and nondestructive authenticity measuring tool, beneficial to determine the adulteration of virgin olive oils and 8 times deep frying olive oil by Transform Infrared spectroscopy (FTIR). This approach could be potential represents a quickly and more correct method.

Materials and Methods

Datasets

DFO data was used from research of Karaogul et al. [19]. The dataset consisted of 18x2384 samples of pure olive oil and 8 times fried olive oil obtained by FTIR. The distribution of samples was equal for both classes. In the first application, the entire dataset was used for classification and regression, while in the subsequent application only the 18x8 samples containing the index features were used. The dataset was evaluated in two different ways for training and testing. In the first application, training and test data were taken half and half (Training 50% - Test 50%). In the second application, training and test data were separated by cross validation. The data obtained was evaluated using MATLAB R2018a software on a computer with Windows 10 Pro operating system with CPU (Intel Core i5-7400) 3.00GHz, 8GB RAM and 1TB hard disk. The working flow chart is given in figure 1.

The obtaining dataset was preprocessed and made suitable for classification and regression. First, classification and regression were performed using all values of the dataset. Then, classification and regression were performed using only index values. The dataset is separated in two ways for training and testing; First, the training and test values were separated 50%-50%, the CV-5 separation process was used for the other application. Linear Discriminant Analysis (LDA), Naïve Bayesian (NB) and Ensemble Tree (ET) were used as classification methods. Accuracy, F score, G_mean, Recall and Precision were used as performance measures. Gaussian Process Regression (GPR) was used as the regression method and root score mean error (RMSE) was



used as the performance measure. As an output estimate; 8 times fried olive oil and pure olive oil were analysed.

Figure 1. The working flow chart

Fourier Transform Infrared Spectroscopy

According to FTIR data obtained by Karaogul et al., The FTIR spectra acquired on a SHIMADZU-FTIR Spirit spectrometer technology with single reflection ATR accessory (Kyoto, Japan) over the wave number (400 cm⁻¹ to 4000 cm⁻¹) using the attenuated total reflection technique. The FTIR analysis technique was used to investigate the chemical compositions of fried oils in virgin olive oil and eight times used olive oil. The results were calculated with using Cis Index (Cs-Inx), Trans Index (Trs-Inx), Ester Index (Est-Inx), Methyl Index (Mt-Inx), Peroxide Index (Prx-Inx) and Ether Index (Et-Inx)'s equations 1-6, respectively [19-21].

$$\text{Cis Inx} = \frac{I_{722}}{I_{2854}} \quad (1) \quad \text{Trs Inx} = \frac{I_{913}}{I_{1460}} \quad (2) \quad \text{Est Inx} = \frac{I_{1743}}{I_{1460}} \quad (3)$$

$$\text{Et Inx} = \frac{I_{1159} + I_{1096}}{I_{1460}} \quad (4) \quad \text{Mt Inx} = \frac{I_{1363}}{I_{1460}} \quad (5) \quad \text{Prx Inx} = \frac{I_{3650}}{I_{1460}} \quad (6)$$

Classification and Regression

Classification and regression procedures were performed in the determination of purity of olive oil. LDA, NB and ET) were used as classification methods. LDA aims to find the projection hyperplane by minimizing the variance between classes and maximizing the distance between classes. This

hyperplane can be used for classification, dimensionality reduction, and interpretation of the importance of given features. NB is a simple and fast supervised machine learning method that uses Bayes theorem to obtain results with strong independent assumptions among the features of the data [22]. The ET enables training multiple decision tree models using the same algorithm by generating different training datasets. DT constructs a decision tree with branches and nodes based on the feature vector set. GPR method was used for regression. GPR is a non-parametric technique that occurs using a dataset to create an estimated distribution, which can average the impact of all mathematical functions that can define the phenomenon of predicting missing data points without making a predictive calculation. It requires a covariance distribution or "core function" that takes information from input data to produce accurate estimations. Core functions have hyperparameters that must be adjusted according to the properties of the input dataset [23].

Performance Evaluation

Accuracy, F score, G mean, Recall and Precision were used as success criteria for classification (eq. 7-11) [24]. Explanation of real and estimated values used in classification was shown in Table 1. For regression, RMSE success criteria were used (eq 12) [25].

Table 1. Representation of real and estimated values used in classification

		Prediction Value	
		True (1)	False (0)
Actual Value	True (1)	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	False (0)	False Positive (FP)	True Negative (TN)

$$\text{Acc} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}, \quad (7)$$

$$\text{F - Score} = 2 \times \frac{\left(\frac{TP}{FP+TN}\right) \times \left(\frac{TP}{TP+FN}\right)}{\left(\frac{TP}{FP+TN}\right) + \left(\frac{TP}{TP+FN}\right)}, \quad (8)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (9) \quad \text{Precision} = \frac{TP}{FP+TP}, \quad (10)$$

$$\text{G - Mean} = \sqrt{\left(\frac{TP}{TP+FN}\right) + \left(\frac{TN}{FP+TN}\right)}, \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Predicted} - \text{Actual})^2}{N}, \quad (12)$$

Understanding of the values given in Table 1 and Eq. 7-12; TP refers to accurately guessing the truth. (i.e. it estimated virgin olive oil as virgin olive oil). FP refers to falsely guessing the truth (Meaning that it has estimated virgin olive oil as fried olive oil). TN refers to truth guessing

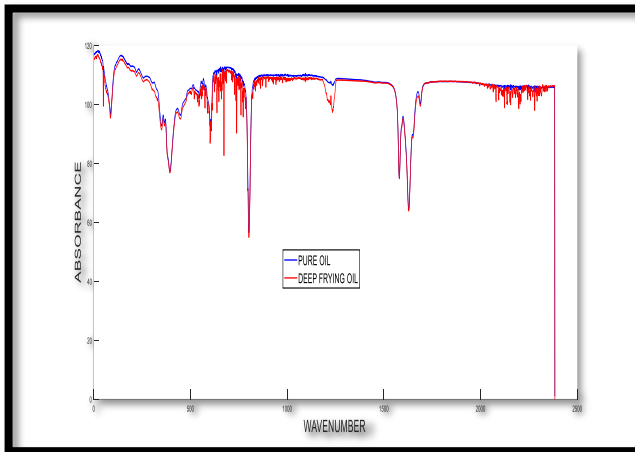
falsely. (i.e. it estimated fried olive oil as fried olive oil). The FN refers to truth predicting falses (On contrary to the previous outcome, meaning that it has estimated fried olive oil as virgin olive oil). Since the goal here is to predict virgin olive oil, virgin olive oils are expressed correctly and fried olive oils are incorrectly expressed. Accuracy, the ratio between correct predictions and total number of records. Recall, the number of positive patterns that are correctly classified. Precision, the number of positive patterns correctly predicted from the total predicted patterns in a positive class. [26].

Result and Discussions

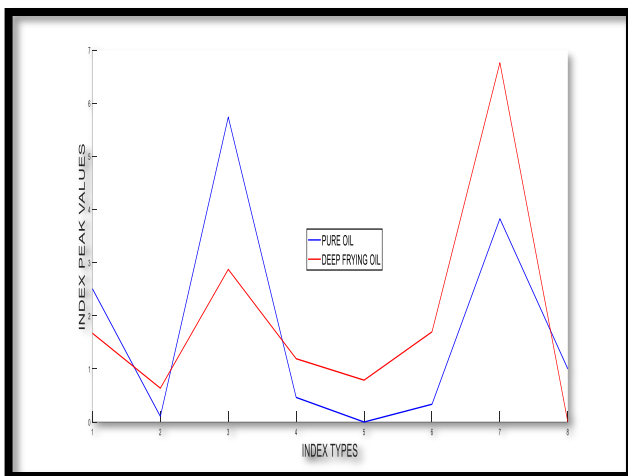
Since the raw spectra obtained as a result of spectroscopic analyzes are too complex to be evaluated visually, they can only be evaluated using chemometric data analysis methods. Chemometric models extract the information that distinguishes different groups from each other and simplify the evaluation process by excluding needless data [4]. In the study, all of the data were classified (LDA, NB and ET) in the chemometric identification method. Then, accuracy, F-score, G-mean, Recall and Precision were used as success criteria. Half of the whole data were used for training and the remaining part was used for testing. The easiest defined components were in the classification are Carbonyl peroxide, Cs-Inx, Trs-Inx, Est-Inx, Mt-Inx, Prx-Inx and Et-Inx respectively. Same dataset was used for regression. Here, the values closest to 1 could be defined more accurately and easily.

In this study, the data records of virgin olive oil and 8 times fried olive oil obtained by FTIR device were used [18]. The records obtained were evaluated by classification and regression using machine learning methods. For the evaluations and comparing for chemometric, classification and regression were made using all features in the data set. Then, the same procedures were performed using Cs-Inx, Trs-Inx, Est-Inx, Mt-Inx, Prx-Inx and Et-Inx for deep machine learning of chemical properties. In Figure 1 (a), when all properties were processed, absorbance and wavelength values of virgin and fried olive oil were given. In Figure 2 (b), index peak values and Index values of the values obtained by processing the properties that are effective in distinguishing between virgin and fried olive oil are given.

In Figure 2, the graphs shown in blue refer to virgin olive oil, while the graphs shown in red represent deep-frying oils. In Figure 2a), absorbance (y coordinate) and wavelength (x coordinate) values of virgin and deep-frying olive oils where all properties have been processed were given. In Figure 2b), Index peak values (y coordinate) and Index types (x coordinate) were given for the values obtained by processing only the properties that are effective in distinguishing between virgin and deep-frying olive oils. When the graphs were examined, it was observed that the values of virgin and deep-frying olive oils differed.



(a)



(b)

Figure 2. (a) All values of absorbance and wave number
(b) For index values and index peak values

Initially, all the data were processed and the success results were compared with LDA, NB and ET from classification methods. The evaluation was performed in two stages. In the initially phase half of the dataset was used for training and the other half for testing. In the next phase, all data was used for training and testing using with CV method. The CV was divided into a data set, k discrete parts, with a total of n examples. Each time, a different set of data was allocated for testing, and the remaining $k-1$ data set was used for training. Each time, the test set was modified and the classifier is trained twice. The average and classifying performance of the k errors obtained in this way is estimated [26]. In this study, $k=5$ and $n: 5768$ were taken. The scores obtained are given in Table 2.

The success rates obtained using all features were compared, the values closest to 1 were expressed as the most successful scores. It was found to be the very high value for machine learning and chemometric. This means that olive oils and DFO could be successfully interpreted by chemometric.

Table 2. All value of olive oil

Methods Used		LDA	NB	ET	
Performance Evaluation	CV-5	Acc.	0,888	0,944	0,944
		F_Sc	0,875	0,941	0,947
		G_M	0,882	0,942	0,942
		Prec	1	1	0,9
		Rec	0,777	0,888	1
	%50- %50	Acc.	0,555	0,888	0,77
		F_Sc	0,5	0,888	0,75
		G_M	0,547	0,894	0,774
		Prec	0,666	1	1
		Rec	0,4	0,8	0,6

Another classification process was done using the indexes of virgin olive oil and eight times fried olive oil. The obtained scores are given in Table 3.

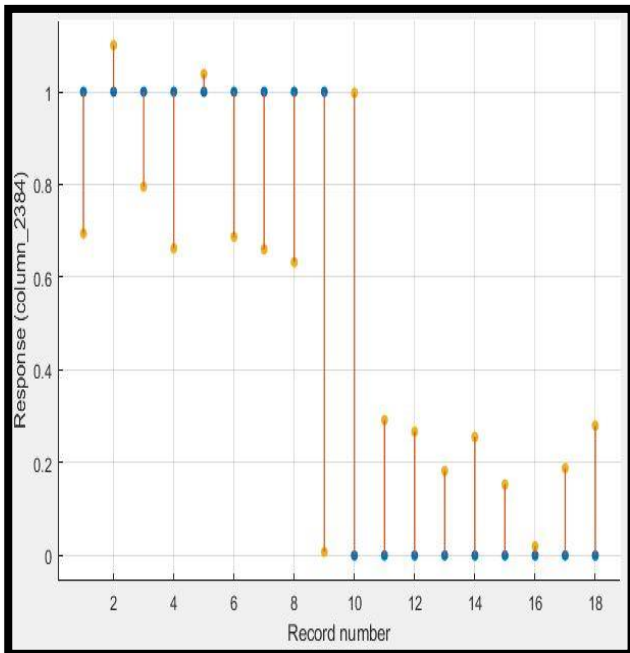
Table 3. For features of all index value

Methods Used		LDA	NB	ET	
Performance Evaluation	CV-5	Acc.	0,944	1	0,944
		F_Sc	0,941	1	0,941
		G_M	0,942	1	0,942
		Prec	1	1	1
		Rec	0,888	1	0,888
	%50- %50	Acc.	0,666	0,888	0,777
		F_Sc	0,727	0,888	0,75
		G_M	0,632	0,894	0,774
		Prec	0,571	0,8	0,75
		Rec	1	1	0,75

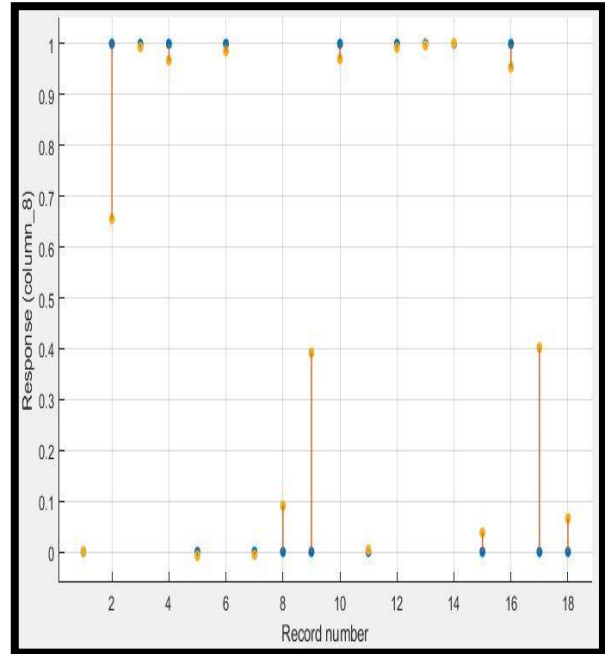
When the results obtained in the tables are examined, the success rates obtained in the classification process using only index features were higher than in the classification process using all data. When all FTIR data were applied chemometrically, the results showed sharp differences in both virgin oil and DFO. When index data features are applied to the data set used for chemometric analysis, differences and changes in the chemical properties of oils can be observed. In addition, the efficiency rating of the index values used in the classification was made using the

relief method. The most effective features in distinguishing virgin olive oil and deep-fried olive oil was respectively carbonyl peroxide, Trs-Inx, Mt-Inx, Et-Inx, Cs-Inx and Prx-Inx.

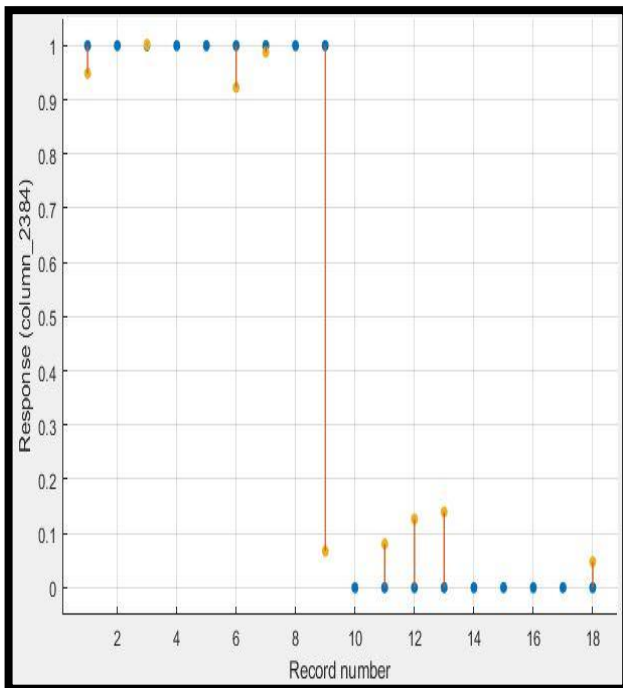
separation process for training and testing of the dataset. When the training and test data are equally separated, the RMSE value obtained is 0.320. For RMSE values, the values closest to 0 were expressed as the best performance. In Figure 3, response of the regression results in all features are given.



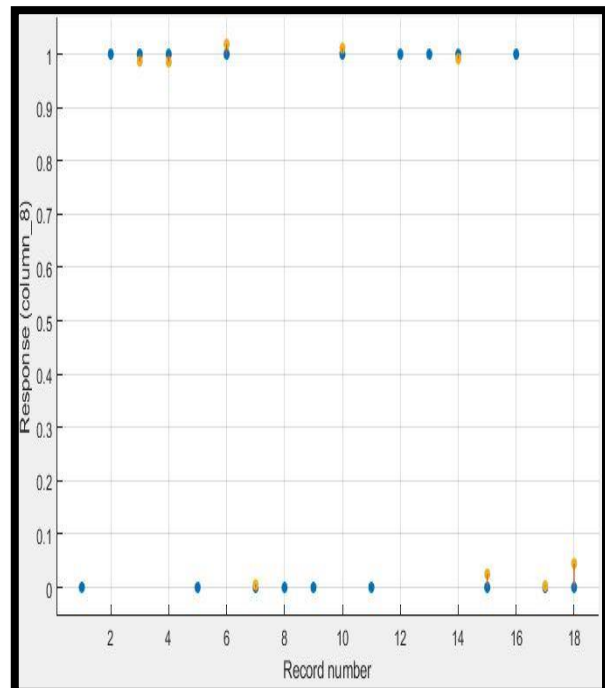
(a)



(a)



(b)



(b)

Figure 3. (a) All features CV Response (b) All features 50%-50% Response

Figure 4. (a) Features of index value CV Response (b) Features of index value 50%-50% Response

The dataset used in the classification was also used for regression. GPR was used as a regression method and RMSE was preferred as a measure of performance. The RMSE value obtained was 0.407 when CV was used as the

Table 4. Literature Review

Techniques/ Algorithms	Performance Evaluation	Authors
Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Principal Components Analysis (PCA) with Linear Discriminant Analysis (LDA) as a machine learning	Olive oil was classified 100% accurately with machine learning technique.	Bellou et al.[6]
Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Absorption Spectroscopy with Linear Discriminant Analysis (LDA) and Gradient Boosting Classifier machine learning algorithms	Virgin olive oil was classified 90% accurately with machine learning technique.	Stefas et al.[7]
Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Absorption Spectroscopy with Principal Component Analysis (PCA), the Linear Discriminant Analysis (LDA), the k-Nearest Neighbors (k-NN) and the Support Vector Classifiers (SVC) machine learning algorithms	Olive oil was classified 94% accurately with machine learning technique.	Gyftokostas et al.[8]
Liquid Chromatography Coupled to High Resolution Mass Spectrometry (LC-HRMS) methodology and optical Spectrometry (Visible Absorption, Fluorescence and Raman) with Time aligned Region complete eXtraction (T-ReX) algorithm.	Greece virgin olive oil was classified high accuracy.	Drakopoulou et al.[10]
Gas-Chromatography-Mass-Spectroscopy, Near-Infrared Spectroscopy, a Low-Cost Electronic Nose and Machine Learning Modelling	The results showed high accuracy.	Gonzalez Viejo and Fuentes[11]
Fluorescence Spectroscopy data with Artificial Neural Networks machine learning modelling	Olive oil's quality classified 94% accurately.	Venturini et al.[12]
Gas Chromatography (GC) with Relief Method, classified with the Support Vector Machine (SVM) and the k-Nearest Neighbor (k-NN) and Decision Tree (DT) algorithms,	The highest accuracy value for classification was calculated as 0.982 %.	Yakar and Karadağ[9]
Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (LF-NMR) data with machine learning approaches (Decision Tree, k-Nearest Neighbor, Linear Discriminant Analysis, Support Vector Machines And Convolutional Neural Network (CNN))	Degree of purity of Olive oil was classified with 89.29% accurately.	Hou et al.[13]
Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) is used assisted by machine learning algorithms	Classification rates resulting in accuracies ranging between 90 and 99.2 %	Gazeli et al.[14]
Raman Spectroscopy, Principal Component Analysis (PCA), machine learning	Accuracy of 96.7% in detecting oil type	Zhao et al.[15]
Principal Component Analysis, Artificial intelligence model of the XGBoost machine learning algorithm	The highest balanced accuracy value was calculated as 99 %.	Skiada et al.[16]
Gas Chromatography, Deep Learning techniques	Accuracy value was calculated as 95 %	Vega-Marquez et al.[17]
BayesNet, Naive Bayes, Multilayer Perception, IBK, Kstar, SMO, Random Forest, J48, LWL, Logistic Regression, Simple Logistic, LogitBoost algorithms	Accuracy value was calculated as 93.88 %	Gumus et al.[18]
Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR), Linear Discriminant Analysis, Naïve Bayesian and Ensemble Tree	Olive oil was classified 100% accurately.	In this work

Using the indexed features of the same data set, regression was performed with the GPR method. The success rate of all performance criteria for GPR methods was obtained as 1 at the highest level. The RMSE obtained, when the data set was parsed with CV, was 0.158 and when half of the dataset was parsed for training and half of the dataset was tested, the obtained RMSE value was 0.031. The response and predict graphs of the regression results of the indexed features are given in Figure 4.

In the graphs shown in Figures 3 and 4, the expressions shown with the blue dots show the places where they should be (ie, the lines), and the expressions with the yellow dots show the predicted places. The lines drawn between the blue and yellow dots are drawn to visualize how far the predicted values are from the actual values. As a result of comparing the results obtained and examining the graphs, it was observed that the results using indexed features were higher when the regression results using all features and indexed features were compared.

Similar studies on olive oil, the methods used and the success results obtained are given in Table 4.

Comparison of similar studies on the subject and the applied methods with this study showed that the results obtained were usable.

Conclusions

In this study, the chemical differences of virgin oil and DFO were investigated by chemometric methods. The all wave length data of FTIR spectra and the characteristic index values of oil were checked to machine for chemometric. The chemometric methods were easier and more convenient and faster to separate of component of virgin oil and DFO with classification using machine learning methods. The multivariate method was used as a powerful tool for monitoring the samples. Chemometric models were constructed with carbonyl, peroxide, trans, methyl, ether, ester, unsaturated peroxide and cis indicex. The described calibration models were linear, suitable and precise when the contents of all index were assayed in samples. Quantification model showed high accuracy and stability. The obtained results also approve that the method is exceedingly convenient for the intended purpose. The high results obtained by the classification methods used indicate that all the indexes obtained from the FTIR right parameters and could be distinguish easily between virgin oils and DFO. This approach could be potential represents a quickly and more correct for laboratory study. Finally, enrichment of the present work with samples from more OO cultivars is a promising near-term research prospect that will permit the generalization of the current model.

Ethics Committee Approval

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

Authors' Contributions

The contribution of the authors is equal.

Acknowledgement

Thanks to all authors included in the article.

References

- [1] V. R. Preedy and R. R. Watson, "Olives and olive oil in health and disease prevention," Academic Press is an imprint of Elsevier, London, United Kingdom, 2021, pp. 125.
- [2] R. Maggio, L. Cerretani, E. Chiavaro, T. Kaufman and A. Bendini, "A novel chemometric strategy for the estimation of extra virgin olive oil adulteration with edible oils," *Food Control*, vol. 21, no. 6, pp. 890-895, Jun. 2010.
- [3] D. Firestone, "Assuring the integrity of olive oil products," *Journal of AOAC International*, vol. 84, no. 1, pp. 176-180, Jan. 1, 2001.
- [4] H. T. Temiz, "Kemometrik yaklaşımlarla gıda tağşişlerinin belirlenmesinde spektroskopik yöntemlerin kullanılması," *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara*, 2019.
- [5] A. Çelik, "Using machine learning algorithms to detect milk quality," *Eurasian Journal of Food Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 76-87, 2022.
- [6] E. Bellou, N. Gyftokostas, D. Stefanos, O. Gazeli, and S. Couris, "Laser-induced breakdown spectroscopy assisted by machine learning for olive oils classification: The effect of the experimental parameters," *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 163, no. 1, p. 105746, 2020.
- [7] D. Stefanos, N. Gyftokostas, P. Kourelis, E. Nanou, V. Kokkinos, C. Bouras, and S. Couris, "Discrimination of olive oils based on the olive cultivar origin by machine learning employing the fusion of emission and absorption spectroscopic data," *Food Control*, vol. 130, no.1, p. 108318, 2021.
- [8] N. Gyftokostas, D. Stefanos, and S. Couris, "Olive oils classification via laser-induced breakdown spectroscopy," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 10, p. 3462, 2020.
- [9] Y. Yakar, and K. Karadağ, "Identifying olive oil fraud and adulteration using machine learning algorithms," *Química Nova*, vol. 45, no. 10, pp. 1245-1250, 2022.
- [10] S. Drakopoulou, E. Orfanakis, L. Karagiannaki, F. Gaitis, S. Skoulika, A. Papaioannou, and M. Velegrakis, "Comparative evaluation of different targeted and untargeted analytical approaches to assess Greek extra virgin olive oil quality and authentication," *Molecules*, vol. 27, no. 4, p. 1350, 2022.
- [11] C. G. Viejo, and S. Fuentes, "Digital detection of olive oil rancidity levels and aroma profiles using near-infrared spectroscopy, a low-cost electronic nose and machine learning modelling," *Chemosensors*, vol. 10, no. 5, p.159, 2022.
- [12] F. Venturini, M. Sperti, U. Michelucci, I. Herzig, M. Baumgartner, J. P. Caballero, and M. A. Deriu, "Exploration of spanish olive oil quality with a miniaturized low-cost fluorescence sensor and machine learning techniques," *Foods*, vol. 10, no. 5, pp.1010, 2021.
- [13] X. Hou, G. Wang, X. Wang, X. Ge, Y. Fan, R. Jiang, and S. Nie, "Rapid screening for hazelnut oil and high-oleic sunflower oil in extra virgin olive oil using low-field nuclear magnetic resonance relaxometry and machine learning," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 101, no. 6, pp. 2389-2397, 2021.

- [14] O. Gazeli, E. Bellou, D. Stefas, and S. Couris, "Laser-based classification of olive oils assisted by machine learning," *Food chemistry*, vol. 302, no. 1, p. 125329, 2020.
- [15] H. Zhao, Y. Zhan, Z. Xu, J. J. Nduwamungu, Y. Zhou, R. Powers, and C. Xu, "The application of machine-learning and Raman spectroscopy for the rapid detection of edible oils type and adulteration", *Food chemistry*, vol. 373, no. 1, p. 131471, 2022.
- [16] V. Skiada, P. Katsaris, M. E. Kambouris, V. Gkisakis, and Y. Manoussopoulos, "Classification of olive cultivars by machine learning based on olive oil chemical composition", *Food chemistry*, vol. 429, no.1, p. 136793, 2023.
- [17] B. Vega-Márquez, L. Nepomuceno-Chamorro, N. Jurado-Campos, and C. Rubio-Escudero, "Deep learning techniques to improve the performance of olive oil classification," *Frontiers in chemistry*, vol. 7, 929, 2020.
- [18] O. Gumus, E. Yasar, Z. P. Gumus, and H. Ertas, "Comparison of different classification algorithms to identify geographic origins of olive oils," *Journal of food science and technology*, vol. 57, no. 1, pp. 1535-1543, 2020.
- [19] E. Karaogul, S. Al, M. S. Karakus, A. F. Atasoy and M. H. Alma, "Novel analyzing approaches for chemical characterization of sunflower oils during deep-frying by FT-IR," *Fresenius Environmental Bulletin and Advances in Food Sciences*, vol. 29, no. 9, pp. 7847-7853, 2020.
- [20] E. Karaogul, "Effects of asphodel tuber and dolomite on the properties of bio-hybrid films processed by a twin screw extruder," *Bioresources Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 4473-4488, April 22, 2019.
- [21] E. Karaogul, and M. H. Alma, "Effects of eremurus tuber and dolomite filler on several properties of poly(vinylalcohol) bio-films," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 28, no. 10, pp. 7108-7118, Nov. 10, 2019.
- [22] M. Cihan, and M. Ceylan, "Comparison of Linear Discriminant Analysis, Support Vector Machines and Naive Bayes Methods in the Classification of Neonatal Hyperspectral Signatures," *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Istanbul, Turkey, 2021.
- [23] A. Andreta, Y. Lembeye, L. L. Villa and J. C. Crébier, "Statistical modelling method for active power components based on datasheet information," *International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg, Germany, Jun. 1-7, 2018.
- [24] S. A. Josephine, "Predictive Accuracy: A misleading performance measure for highly imbalanced data classified negative," *In SAS Global Forum*, pp. 942-954, 2017.
- [25] M. Steurer, R. Hill and N. Pfeifer, "Metrics for evaluating the performance of machine learning based automated valuation models," *Journal of Property Research*, vol. 38, no. 2, pp. 99-129, April 17, 2021.
- [26] C. Ricciardi, A. S. Valente, K. Edmund, V. Cantoni, R. Green, A. Fiorillo, and M. Cesarelli, "Linear discriminant analysis and principal component analysis to predict coronary artery disease", *Health informatics journal*, vol. 26, no. 3, pp. 2181-2192, 2020.
- [27] A. Narin, Y. İşler and M. Özer, "Konjestif kalp yetmezliği teşhisinde kullanılan çapraz doğrulama yöntemlerinin sınıflandırıcı performanslarının belirlenmesine olan etkilerinin karşılaştırılması," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 16, no. 48, pp. 1-8, Sep.1, 2014.



Arıtma tesislerinde enerji tasarrufu için alınabilecek önlemler, maliyet analizi ve amortisman süreleri

Precautions That Can Be Taken for Energy Saving in Treatment Facilities, Cost Analysis and Amortization Periods

Bayram Durmuş¹, Mustafa Mikail Özçiloğlu^{2*}

¹ Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, bayramdurmus2@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3482-3545>

² Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, mozciloglu@kilis.edu.tr,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6775-9092>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 27 Aralık 2023
Revizyon 27 Şubat 2024
Kabul 28 Mart 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

*Atık su arıtma tesisleri,
İleri biyolojik arıtma,
Mikro hidroelektrik santralleri,
Enerji verimliliği analizi,
LED aydınlatma teknolojisi.*

21. Yüzyıl itibarıyla dünya üzerinde bulunan enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde tüketilmesi ve kaynakların azalması nedeniyle ülkeler çapında birtakım önlemler alınmaktadır. Bu önlemlerin başında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim gelmekte ve bu yönde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalara katkı sağlamak amacıyla atık su arıtma tesislerinde yapılacak olan mikro ölçekli hidroelektrik santrali kurulumu, anaerobik çamur çürütme yönteminin kullanılması ve LED aydınlatma dönüşümünün birlikte sağlayacağı faydalar araştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde kurulacak mikro ölçekli hidroelektrik santralinin 8.14 kWh enerji potansiyeline sahip olacağı ve yıllık 70,332 kWh enerji sağlayacağına ulaşılmıştır. Bununla birlikte LED aydınlatma dönüşümünün ise yıllık 71,678 kWh enerji tasarrufu sağlayacağı tespit edilmiştir. Yapılacak toplam yatırım tutarının 2,347,550 TL olacağı yapılan detaylı hesaplamalar sonucunda bulunmuş ve bu yatırım karşılığında yıllık 142,010 kWh enerji tasarrufu sağlanarak, yıllık 438,810 TL tasarruf elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 27 December 2023
Received in revised form 27 February 2024
Accepted 28 March 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

*Wastewater treatment plants,
Advanced biological treatment,
Micro hydroelectric power stations,
Energy efficiency analysis,
LED lighting technology*

As of the 21st century, due to the rapid consumption of energy resources in the world and the decrease in resources, a number of measures are taken across countries. At the beginning of these measures is the orientation towards renewable energy sources and important studies are carried out in this direction. In order to contribute to these studies, the benefits of micro-scale hydroelectric power plant installation to be made in wastewater treatment plants, the use of anaerobic sludge digestion method and LED lighting conversion together were investigated. As a result of the study, it has been reached that the micro-scale hydroelectric power plant to be established will have an energy potential of 8.14 kWh and provide 70,332 kWh of energy annually. In addition, it has been determined that the LED lighting conversion will provide an annual energy saving of 71,678 kWh. As a result of the detailed calculations, it was found that the total investment amount to be made would be 2,347,550 TL and it was concluded that an annual energy saving of 142,010 kWh would be achieved in return for this investment, and an annual savings of 438,810 TL would be achieved.

Doi: 10.24012/dumf.1410601

* Sorumlu Yazar

Giriş

Günümüzde enerji ihtiyacının %50'den fazlası doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. [1] Her daim azalan ve bir süre sonra yok olacak olan bu enerji kaynakları için hidroelektrik, güneş ve rüzgâr enerjileri gibi alternatifler yenilenebilir enerji kaynakları bulunsu da günümüzde ihtiyaç duyulan enerjinin yarısı dahi bu yenilenebilir enerji kaynakları üzerinden sağlanamamaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde toplam üretilen elektrik enerjisinin %2'si atık su arıtma tesislerinde kullanılmakta iken [2] Dünya üzerinde bu oranın yaklaşık olarak %0,1 ile %0,4 arasında olduğu bilinmektedir.

Fosil yakıt kaynaklarının giderek azalması, fosil yakıt bakımından zengin olan ülkeleri dahi harekete geçirerek yenilenebilir enerji kaynakları bakımından çalışmalar yapmaya sürüklemiştir. Enerji verimliliği konusunda ülkemizde de alınan kararlar göz önüne alındığında hızlı bir şekilde LED aydınlatma dönüşümünün planlandığı "Ulusal Enerji Verimliliği Planı" ile görülmektedir. Bu planda 2023 yılı içerisinde toplam yol aydınlatmalarının %30'unun LED aydınlatma dönüşümünün yapılması planlanmaktadır. [3]

Atık su arıtma tarihçesi

İnsanlar yerleşik hayata geçmeye başladıkları ilk dönemlerde daha az topluluklardan oluşmaktaydı. Bu topluluklar ise temiz su kaynaklarına yakın bölgelerde yaşardı. Toplulukların küçük ve topluluk dışına ulaşmanın kolay olması nedeniyle insani atıklar genellikle toplum içerisinde olmaz ve dolayısıyla insanların atıklardan kurtulmak gibi planları olmazdı. İnsanlar yerleşik yaşam biçimini benimsemeye başladıktan sonra oluşan atıkların fazla olması nedeniyle çevre kirliliği sorunları baş göstermeye başladı. Oluşan bu çevre sorunları ile baş edebilmek amacıyla su mühendisliği alanına ilgi başladı. Su mühendisliği alanındaki ilk gelişmeler ise M.Ö 4000. yıllara dayanmaktadır. Hindistan'da bulunan Mohenco Daro kentinde ise tarihleri M.Ö 4500'lere dayanan kanalizasyon şebekesi, hamam ve helalara rastlanmaktadır. Nippur ve Roma'da bulunan drenaj kanalları ise antik devirde yapılmış büyük yapılar arasında yer almaktadır. [4] Ülkemiz sınırları içerisinde bulunan Efes ve Bergama antik kentlerinde ise yine milattan öncesine dayanan temiz su temini ve atık su bertaraf yöntemlerine dayanan yapılara rastlamak mümkündür.

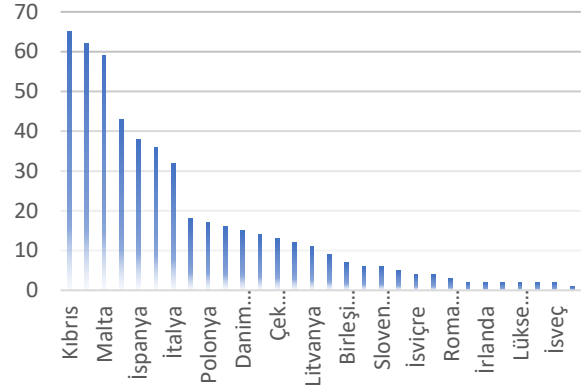
19. Yüzyılda atık suların ve çevre kirliliğinin incelenmesi için İngiltere'de bir komisyon oluşturuldu ve atık suların kirlenmesi yasaklandı. 1861 yılında ise atık su arıtma sistemlerinin ilerlemesini sağlayacak bir kanun yürürlüğe girdi ve bu suların kirlenmesi kanunen yasak oldu. 19. Yüzyılın sonlarına doğru Almanya'da bulunan Emscher nehrinin etrafı atıkların bu nehre akıtılmasından dolayı son derece kötü bir duruma gelmişti. Bu kötü durum ile baş edebilmek için 1904 yılında Almanya'da bir birlik kuruldu ve bu birliğe ise "Emscher Atık su Birliği" adı verildi. Türkiye'ye ise 1970'li yıllardan itibaren yurtdışı kaynaklı çeşitli arıtma sistemleri giriş yapmaya başladı. Sistemin anlaşılması, yerli çalışmalar ve çıkan çevre koruma kanunları ile kısa sürede atık su arıtma sistemlerinde önemli mesafeler kat edildi. [5]

Su stresi endeksi

Dünya üzerinde Avrupa bölgesi, diğer bölgelere kıyasla çok büyük su kaynaklarını bünyesinde barındırır. Fakat

günümüzde suyun kalitesinde olan bozulmalar ve suyun hızlı bir şekilde azalması nedeniyle Avrupa ülkeleri de su stresine sahip ülkeler arasında yerini almaya başlamıştır.

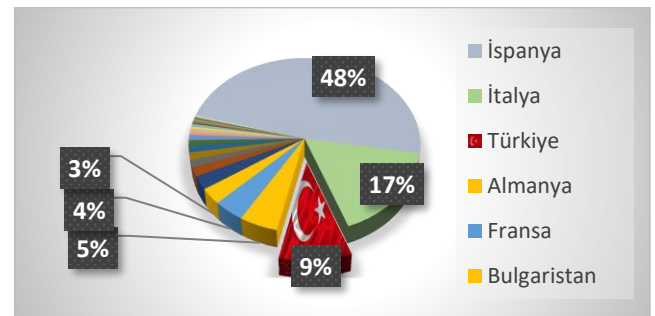
Dünya üzerindeki nüfusun %70'inden fazlasının yaşadığı Avrupa ülkelerinde, nüfusun yarısına yakını su stresi ile karşı karşıyadır. 2025 yılına gelindiğinde Dünya üzerinde 1.8 milyar insanın suya ulaşım sıkıntısı yaşayacağı öngörülmektedir. [6]



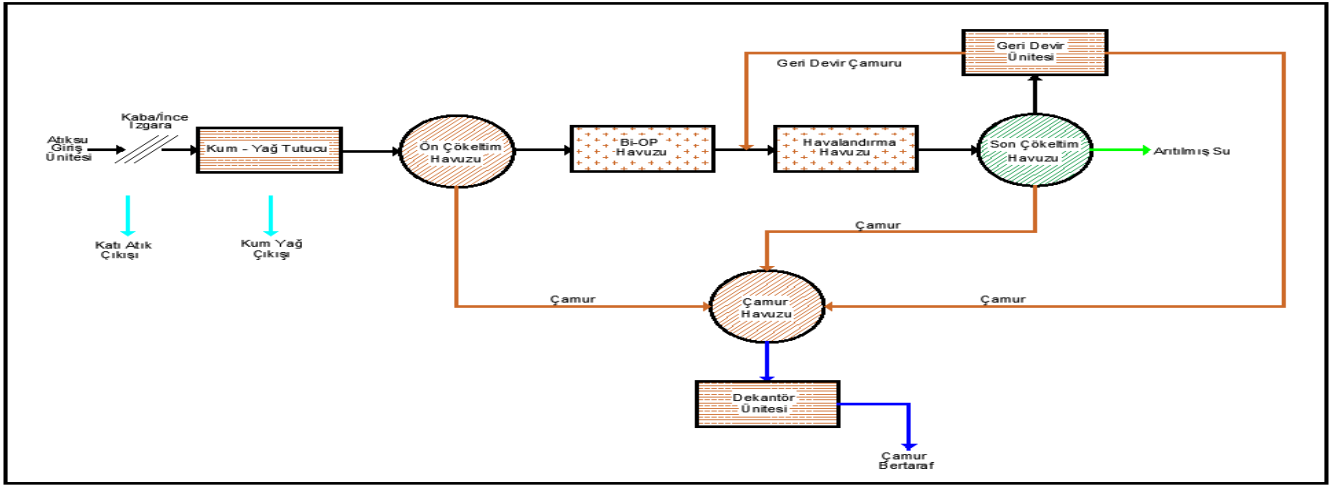
Şekil 1. Avrupa ülkelerinin su stresi endeksi

Avrupa ülkelerinin yaşadığı su stresi endeksi oranları Şekil 1'de görülmektedir. Su stresi indeksinin %0 - %10 arasında olması ülkenin su kıtlığı anlamında iyi durumda olduğunu göstermekte iken %10 - %20 arasında olması su tüketiminde gerekli önlemlerin alınması gerektiğini, bu oranın %20'den fazla olmasında ise alınacak önlemlerin çok daha acil olduğunu göstermektedir. [7] Yapılmış olan bu çalışmada ülkemizin durumu incelendiğinde Türkiye bu endeks çalışmasında %10 - %20 aralığında kalmaktadır.

Kullanılmış bir suyu arıtma işleminden geçirerek yeniden kullanılabilir duruma getirilmesi birçok yerel yönetimin tercih ettiği bir durumdur. Fakat geri kazanılmış atık suların bir daha kullanım potansiyel yoktur. Bazı denklemler yardımıyla 2025 yılındaki atık suyun tekrardan kullanılabilirlik oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan birçok Avrupa ülkesinin yüksek bir potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir. Bu potansiyele en yüksek olduğu ülke 1,213 Mm³/yıl ile İspanya olmuştur. İspanya'yı yılda 418 Mm³/yıl ile İtalya 2. Sırada takip ederken, 234 Mm³/yıl ile ülkemiz Türkiye 3. Sırada yer almıştır. Daha sonra ise sırasıyla, Almanya 126 Mm³/yıl, Fransa 102 Mm³/yıl, Bulgaristan 74 Mm³/yıl ve Portekiz 64 Mm³/yıl ile takip etmektedir. Avrupa'da ülkelerinde 2025 yılında toplamda 2,516 Mm³/yıl atık suyun tekrardan kullanılabilirliği düşünülmektedir. Bu suyun ülkeler bazındaki oranları ise Şekil 2'de verilmiştir. [8]



Şekil 2. 2025 yılı için tahmin edilen atık su potansiyeli



Şekil 3. Atık su arıtma tesisinin genel çalışma prensibi

Atık su arıtma tesislerinin genel çalışma prensibi

Evsel veya endüstriyel ortamlarda oluşan atık sular genel olarak arıtma işlemine tabi tutulduğu gibi herhangi bir arıtma işlemine uğramadan da deniz, göl, nehir vb. su kaynaklarına verilebilmektedir. Arıtma işlemine tabi tutulmayan atık suların çevre ile etkileşimi oldukça büyük tehlike arz etmektedir. Bu nedenle atık sular öncelikle atık su arıtma tesislerine gelerek belirli arıtma proseslerinden geçtikten sonra doğaya verilmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmalarda anaerobik çamur çürütme ünitesi bulunan tesislerde açığa çıkan metan gazı ile tesisin ihtiyaç duyduğu enerjinin %25 ile %50 arasındaki bir kısmının karşılanabildiği gözlemlenebilmektedir. [9] Yapılan başka araştırmada ise karşılanabilecek enerji miktarının tesis yapısına göre değişebilmekle birlikte %2 ile %60 arasında olduğu tespit edilmiştir. [10]

Atık su arıtma tesisine giriş yapan ham su ilk olarak kaba ve ince ızgara ile içerisinde bulunan ve ızgaraya takılacak olan katı atıklarından arındırılır. Atık su buradan kum yağ tutucu ünitesine geçer, kum yağ tutucu ünite ünitenin fiziksel yapısı gereği kum tanecikçi, küçük çakıl taşları vb. maddeler ünitenin tabanına çökerken atık su içerisinde bulunan yağ su yüzeyine çıkmaktadır. Burada bir pompa yardımıyla tabanda bulunan kum tanecikleri sudan uzaklaştırılırken, ünite üzerinde bulunan bir sıyrıcı kol yardımıyla da su yüzeyinde bulunan yağ tabakası sudan uzaklaştırılmış olur. Bundan sonra ise atık su ön çökeltim havuzuna geçmekte ve burada çöken çamur, çamur havuzuna bir kademe daha arıtılmış olan atık su ise bi-op havuzlarına geçmiş olur. Bu havuzda gerekli biyolojik ve kimyasal proseslerini tamamlayan atık su uzun havalandırılmalı havuzlara geçer ve yine buradaki proseslerden sonra ise son çökeltim havuzuna geçmektedir. Son çökeltim havuzunda atık su içerisinde bulunan çamur, çamur havuzuna yönlendirilirken, arıtma işlemini tamamlayan arıtılmış su alıcı ortama deşarj edilir. Bir atık su arıtma tesisinin genel çalışma prensibini özetleyen görsel Şekil 3'de verilmiştir.

Atık su arıtma çeşitleri

Kirletilmiş bir atık suyun niteliği evsel veya kimyasal olsun alıcı ortamlara bırakılmadan önce mutlaka arıtma işleminden geçirilmelidir. Önceden detaylı araştırmalar yapılarak ortaya çıkan veya çıkacak olan atık suyun özellikleri belirlenmeli buna göre yapılacak olan arıtma işleminin özellikleri

belirlenmelidir. Burada bilinmelidir ki evsel nitelikli atık su arıtma işlemleri ile kimyasal nitelikli atık su arıtma prosesleri ve kullanılan ekipmanları birbirinden farklıdır. Evlerden gelen biyolojik atıklardan oluşan suların arıtılmasında 4 ayrı yöntem uygulanmaktadır. Bunlar;

- Doğal Arıtma Yöntemi
- Fiziksel Arıtma Yöntemi
- Biyolojik Arıtma Yöntemi
- İleri Biyolojik Arıtma Yöntemi

Burada bulunan 4 arıtma yöntemi ile atık sular çevreye zarar vermeyecek hale getirilerek daha güvenli bir şekilde doğaya verilmektedir. Bu 4 arıtma sistemi içerisinde bulunan fiziksel arıtma, biyolojik arıtma ve ileri biyolojik arıtma sistemlerine ait teknikler Tablo 1'de verilmiştir.

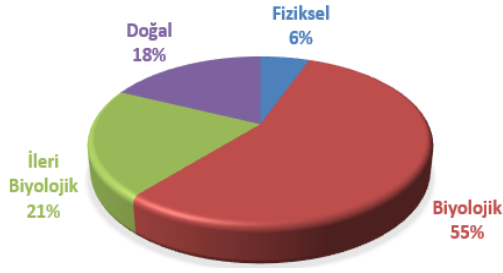
Tablo 1. Atık su arıtmada kullanılan sistem ve teknikler

Fiziksel Arıtma	Biyolojik Arıtma	İleri Biyolojik Arıtma
İnce ve Kaba Izgara	Aktif Çamur	Nitriikasyon + Denitrifikasyon
Elek	Damlatmalı Filtre	Yumaklaştırma + Çökeltme
Kum Yağ Tutucu	Biyodiskler	Filtrasyon
Filtreler	Havalandırılmalı Lagünler	MBR
Çökeltme Havuzu	Stabilizasyon Havuzları	Karbon Adsorpsiyonu
Dengeleme	Anaerobik Arıtma Doğal Arıtma	İyon Değişirme

Türkiye'de atık su tesislerinin durumu

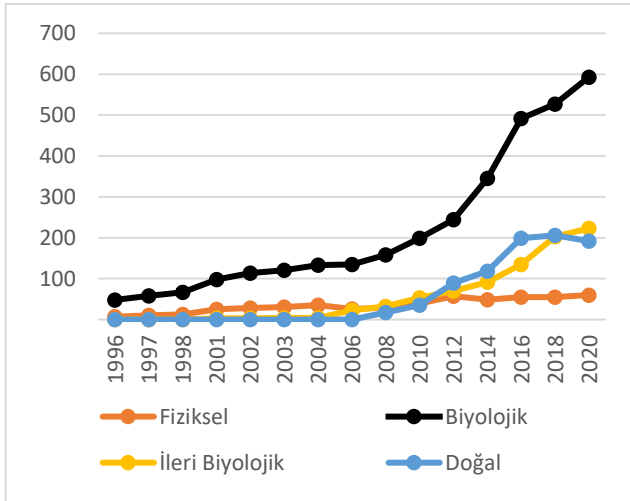
Türkiye'nin atık su arıtma tesisleri konusundaki son durumu, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından 2021 yılı sonunda açıklanmıştır. Burada bulunan verilere göre

ülkemizde güncel olarak 1,068 adet atık su arıtma tesisi bulunmaktadır. Bu arıtma tesislerinden 60 adedi fiziksel, 593 adedi biyolojik, 223 adedi ileri biyolojik ve 192 adedi ise doğal arıtma tesisidir. Bu tesislerin yüzdelik dağılımdaki oranları Şekil 4’de verilmiştir. [11]



Şekil 4. Atık su arıtma tesisi çeşitleri dağılımı

Ülkemizde bulunan fiziksel, biyolojik, ileri biyolojik ve doğal arıtma tesislerinin 1996-2020 yılları arasındaki değişimi Şekil 5’de görülmektedir. Burada ileri biyolojik atık su arıtma tesisleri 2000’li yıllardan sonra başlasa da sağladığı fayda ve işletme kolaylığı açısından kısa sürede sayıları artmış ve mevcut durumda toplam arıtma tesisleri içerisinde oranı %21’e kavuşmuştur.



Şekil 5. Yıllara göre arıtma tesisi çeşitleri ve sayısı

Materyal ve Metot

Çalışma boyunca yapılan araştırma ve incelemeler Gaziantep ili, Şahinbey ilçesinde bulunan Gaziantep merkez ileri biyolojik atık su arıtma tesisinde yapılmıştır. Bu tesis 2 etaptan oluşmakta olup 1. etap 200,000 m³/gün debisiyle 1999 yılı Kasım ayında devreye alınan biyolojik atık su arıtma tesisidir. 2. Etap ise 2020 yılında devreye alınan ve yine 200,000 m³/gün debisiyle hizmet veren ileri biyolojik atık su arıtma tesisidir. Tesise ait giriş debimetresinde anlık 7,000 – 8,500 m³ /h arasında atık su girişi olduğu görülmektedir. Tesis günlük olarak yaklaşık 1,000,000 kişinin üretebileceği atık su miktarını artabilecek kapasitededir. Tesis ileri biyolojik arıtma tesisi olduğundan dolayı tesiste azot ve fosfor giderimi yapılan prosesler mevcuttur. Tesisin görseli Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Gaziantep ileri biyolojik atık su arıtma tesisi

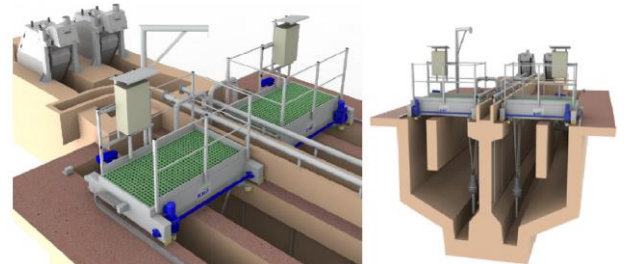
Araştırma sürecinde tesisin bütün ünitelerinin çalışma sistemleri incelenmiş ve enerji tasarrufu için yapılabilecek önlemler analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda tasarruf yöntemleri belirlenmiştir.

Tesis içerisinde 10 ayrı üniteden bulunmakta olup bunlar: giriş yapısı, kaba-ince ızgara, kum yağ tutucu havuzu, kum yağ tutucu blower, ön-son çöktürme havuzu, bio-p havuzu, havalandırma havuzu, havalandırma blower, geri devir ve dekantör üniteleridir. Bu üniteler ve işlevleri aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

Giriş yapısı, atık su arıtma tesisine suyun giriş yaptığı ünite. Bu ünite üzerinde 4 adet elektrikli vana ile kontrol edilen kapaklar ve giriş suyu debi ölçümü için kullanılan ultrasonik debimetre bulunmaktadır.

Kaba-ince ızgaralar, atık suyun tesise giriş yaptıktan sonra fiziksel arıtma işleminin başladığı ilk ünite. Kaba ızgarada 10-15 cm arasında olan katı cisimler sudan ayrıştırılırken, ince ızgarada 2-10 cm arasında olan katı cisimler atık sudan ayrıştırılmaktadır. Örneğin bu cisimler cam parçaları ve cam şişeler, metal parçaları ve metal kutular, tahta ve ağaç parçaları, poşetler, vb. olmaktadır. Bu ünite üzerinde 3 adet kaba ve 5 adet ince ızgara bulunmaktadır.

Kum yağ tutucu ünite, kaba ve ince ızgaralar ile büyük katı atıklardan ayrıştırılan suyun içerisinde bulunan küçük parçacıklı katı maddelerin ve su içerisindeki yağın ayrıştırıldığı bölümdür. Ünite üzerinde 2 adet gezer köprü vardır ve bu her bir köprünün üzerinde 2 adet yağ sıyrıcı kol ile 2 adet kum pompası bulunur. Ünitenin yapısı gereği yağ burada yüzeyde kalırken, kum ünitenin tabanına çökmektedir. Gezer köprü üzerinde bulunan sıyrıcı kol ile sudaki yağ, yağ çukuruna dökülerek bertaraf edilirken, taban kısmındaki kum taneleri ise kum pompası yardımıyla sudan ayrıştırılır. Bu ünitenin genel yapısı Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Kum yağ tutucu ünite genel yapısı

Kum yağ tutucu blower, bina içerisinde kum yağ tutucu ünitenin oksijen ihtiyacını karşılamak üzere blower cihazları bulunmaktadır. Burada 4 adet asil ve 1 adet yedek olmak üzere toplamda 5 adet 18.5 kW gücünde blower bulunmaktadır. Kaba-ince ızgara, kum-yağ tutucu ünite ve kum yağ tutucu blower için görseller Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Kaba-ince ızgara, kum yağ tutucu ünite ve kum yağ tutucu blower üniteleri

Ön çökeltme havuzu fiziksel arıtma işleminin son basamağı olup burada atık su dinlendirilerek içerisinde bulunan çamurun tabana çökmesi ve buradan çamur havuzuna gönderilmesi adımları gerçekleşir. Çamurdan ayrıştırılan atık su ise bio-p havuzuna geçerek biyolojik arıtma işlemine tabi tutulur. Son çökeltme havuzunda ise biyolojik arıtma porselerini tamamlayan atık su içerisinde bulunan çamur, çamur havuzuna gönderilir. Çamurdan ayrıştırılan atık su ise alıcı ortama vermek üzere çıkış ünitesine gönderilir. Şekil 9’de ön çökeltme havuzu ünitesi verilmiştir.



Şekil 9. Ön çökeltme havuzu

Bio-p havuzu ileri arıtma prosesinin uygulandığı ileri biyolojik atık su arıtma tesislerinde bulunan bir ünite olup azot ve fosfor giderimi yapan bir ünedir. Bu üniteler tesis içerisinde 2 adet bulunmakta ve her ünite içerisinde 5.5 kW gücünde 3 karıştırıcı mikser bulunmaktadır.

Havalandırma havuzları oksijenli ve oksijensiz havalandırma havuzları olarak ikiye ayrılmaktadır. İncelenen tesiste 2 adet oksijenli havalandırma havuzu bulunmakta ve her havalandırma havuzunun içerisinde 7.5 kW gücünde 8 adet karıştırıcı mikser bulunmaktadır. Atık su içerisinde bulunan askıda katı madde, biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) gibi maddelerin giderimi havalandırma havuzu aracılığıyla yapılmaktadır. Havalandırma havuzundaki bakteriler için oksijen ihtiyacı blower ünitesi tarafından karşılanmaktadır. Tesis içerisinde toplamda 2 ayrı blower ünitesi bulunmakta ve her bir ünite içerisinde 4 asil, 1 yedek olmak üzere toplamda 5 adet 450

kW gücüne sahip blower bulunmaktadır. Bu ünite tesis içerisinde en fazla güç sarfiyatı yapan bölümdür. Şekil 10’de blower üniteleri verilmiştir.



Şekil 10. Havalandırma havuzu mikseri ve havalandırma havuzu blower üniteleri

Geri devir ünitesi, atık su arıtma tesisi prosesinde bulunan ve son çökeltme havuzları vasıtasıyla çökeltilecek çamurun bio-p ve havalandırma havuzlarında tekrardan işlenmesi için gönderen pompaların bulunduğu bir bölümdür. Bu bölüm içerisinde ayrıca, son çökeltme havuzlarından gelen fazla çamur, fazla çamur pompaları yardımıyla çamur havuzuna gönderilmektedir. Bu ünite içerisinde 125 kW gücünde 5 adet geri devir pompası ve 15 kW gücünde 3 adet fazla çamur pompası bulunmaktadır.

Dekantör ünitesinde, sıvı kıvamında bulunan çamurun özel katkı maddeleri ile birleştirilerek dekantör içerisinde susuzlaştırma işlemi yapılmaktadır. Bu işlemler için dekantör ünitesinde 5 asil, 1 yedek olmak üzere toplamda 6 adet ünite bulunmaktadır. Her bir ünite ise 55 kW ve 18.5 kW gücünde 2 adet asenkron motor bulunmaktadır.

Mikro Hidroelektrik Santrali

Bu bölümde tesis içerisine kurulması planlanan mikro ölçekli hidroelektrik santrali için gerekli hesaplamalar yapılacaktır. Öncelikle tesis kapasitesini belirlemek amacıyla debi ve düşü hesaplamaları yapılacak olup sonrasında cebri boru, enerji potansiyeli ve türbin seçim hesaplamaları yapılacaktır.

Debi ve düşü hesaplaması için Şekil 11’de görülen ve tesisin giriş debimetresi değeri baz alınacaktır. Burada tesisin saatlik debisinin 7,065 m³/h olduğu görülmekte ve bu oranla günlük debi 169,577 m³/gün olmaktadır.



Şekil 11. Tesisin saat bazlı giriş debisi

Tesisin anlık debisi ise Denklem (1) ile hesaplanarak bulunmuştur.

$$s = \frac{Qd}{84.400} = \frac{170.000}{86.400} = 1,97 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$

Tesiste düşü ölçümü ise nivo yardımı ile yapılmış olup, cebri boru planlamasının yapıldığı son çökeltim havuzlarının üst kotu ile cebri boru bitiş noktası arasındaki yükseklik ise 0.62 metre olarak elde edilmiştir. Bu nedenle yapılacak araştırmalarda tesis düşü miktarı 0.62 metre olarak kabul edilmiştir.

Cebri boru hesaplamaları

Cebri boru et kalınlığı hesabı yapılırken ilk önce cebri boru içerisinde olması istenen maksimum hız olan 5 m/s değerinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Bu kontrol için Denklem (2) kullanılacaktır.

$$V = 0.125\sqrt{2gHg} = 0.125\sqrt{2 \times 9,81 \times 0,62} = 0,43 \text{ m/s} \quad (2)$$

Bulunan değer 5 m/s değerinden düşük olduğu için cebri boru içerisinde istenen hız uygundur. Cebri boru et kalınlığı hesaplamak için ise Denklem (3) kullanılacaktır.

$$e = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4 \times 1,97}{3,14 \times 0,43}} = 2,41 \text{ mm} \quad (3)$$

2014 yılında yapılmış bir araştırmada Amerikan Makine Mühendisleri Birliği (ASME) tarafından son hesaplanan et kalınlığının Denklem (4) gibi düzenlenmesinin cebri borularda oluşacak deformasyonlara karşı direncin daha yüksek olacağı belirtilmiştir.[12]

$$e_{net} = (e \times 2,5) + 1,2 = (2,41 \times 2,5) + 1,2 = 7,22 \text{ mm} \quad (4)$$

Cebri boru çapının hesaplanması için ise Denklem (5) kullanılmış ve cebri boru yarıçapı belirlenmiştir.

$$D = \sqrt[7]{0,05 \times Q^3} = \sqrt[7]{0,05 \times 1,97^3} = 0,871 \text{ mm} \quad (5)$$

Mikro HES için enerji potansiyeli hesaplamaları

Hidroelektrik santrallerinin teorik olarak yapılan enerji potansiyeli hesaplamaları için öncelikle suyun spesifik yoğunluğu, düşü ve debi miktarlarının bilinmesi gerekmektedir. Suyun spesifik yoğunluğu (ρ) 998.21 kg/m³, yer çekimi ivmesi (g) 9.82 m/s² kabul edilerek Denklem (6) ile yerine yazıldığında enerji potansiyeli bulunacaktır.

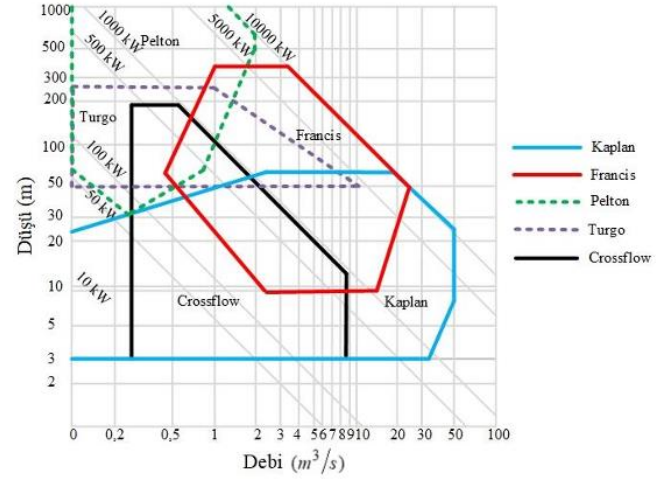
$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q = 998,21 \times 9,82 \times 0,62 \times 1,97 = 11.972 \text{ W} \quad (6)$$

Burada elde edilen değer türbin ve generatör verimi %100 kabul edildiğinde geçerlidir. Mikro ölçekli hidroelektrik santrallerinde kullanılan türbinlerde kayıp oranı %20 mertebelerinde generatörlerde ise kayıp oranı %15 mertebelerinde olduğundan bu hesaplama %20 türbin ve %15 generatör kayıpları düşüldüğünde net enerji potansiyelinin 8,140,96 W/sa olduğu hesaplanmaktadır. Tesisin net enerji potansiyeli günlük 195.38 kW, aylık 5,861 kW ve yıllık 70,332 kW olmaktadır.

Türbin seçim hesaplamaları

Yıllık Türbin seçimindeki en önemli kriterler düşü ve debi miktarlarıdır. Araştırma ve inceleme yapılan tesis olan Gaziantep ileri biyolojik atık su arıtma tesisinde planlaması

yapılan mikro ölçekli hidroelektrik santrali için düşü miktarı 0.62 metre ve debi miktarı 1.97 m³/s olarak daha önceki hesaplamalarda tespit edilmişti. Bu değerler dikkate alınarak Şekil 12'de incelenecektir.

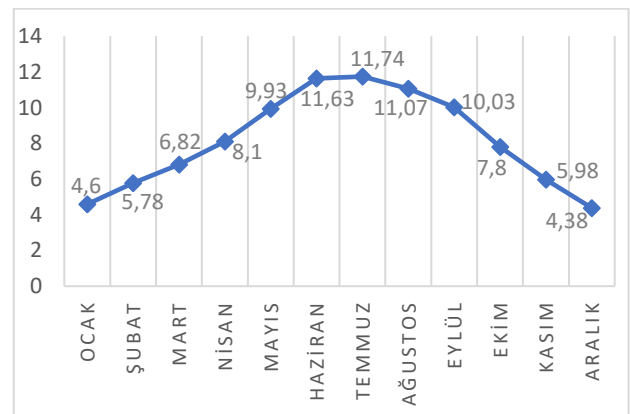


Şekil 12. Debi ve düşü miktarına göre türbin seçim grafiği (13)

Şekil 10'da verilen grafik detaylı olarak incelendiğinde en az düşü ile çalışmaya uygun olan Kaplan tip türbinlerin 3 metre ile 60 metre aralığında, Banki türbinlerin 3 metre ile 200 metre aralığında, Francis tip türbinlerin 10 ile 400 metre aralığında, Pelton tip türbinlerin 30 metre ile 1300 metre aralığında ve Turgo tip türbinlerin ise 50 ile 280 metre aralığında ki düşü miktarlarında çalışmaya uygun olduğu görülmektedir. İnceleme yapılan tesisin düşü miktarı ve debisi dikkate alındığında Kaplan ve Francis tip türbinlerin kullanımının uygun olduğu görülmektedir. Hesaplamalar bu 2 türbin üzerinden yapılacaktır.

Aydınlatma sistemi

Gaziantep ileri biyolojik atık su arıtma tesisinde yapılan incelemede yüksek bina yapıları ve geniş alanlar nedeniyle yüksek basınçlı sodyum buharlı armatürler kullanıldığı görülmüştür. Tesiste bulunan armatürlerin enerji hesaplamalarının yapılması için öncelikle Gaziantep ilinin yıllık ortalama güneş alma saatinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Gaziantep ili güneşlenme süreleri Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Debi ve düşü miktarına göre türbin seçim grafiği [13]

Şekil 12’de ki grafikten Gaziantep ilinin günlük ortalama güneşlenme süresinin 8.155 saat olduğu bulunmaktadır. Tesiste günde yaklaşık olarak 16 saat aydınlatma armatürlerinin açık olması gerekmektedir. Hesaplamalar 16 saat üzerinden yapılacaktır. Tesiste bulunan armatür tipleri, sayıları ve güçleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tesiste kullanılan armatür tipleri ve sayıları

Bina	Armatür Tipi	Armatür Sayısı	Armatür Gücü(W)	Yıllık Sarfiyat (kWh)
Kum Yağ Tutucu Blower	HDK	6	250	8.760
Havalandırma Blower A	HDK	8	250	11.680
Havalandırma Blower A	U	38	36	7.989
Havalandırma Blower B	HDK	8	250	11.680
Havalandırma Blower B	U	38	36	7.989
Geri Devir	HDK	6	250	8.760
Geri Devir	U	10	36	2.102
Dekantör	HDK	6	250	8.760
Yol Aydınlatma	YBSB	132	150	115.632
Toplam			183.352	

Tesiste bulunan HDK ve YBSB armatürler gece saatlerinden itibaren sürekli çalışmakta iken U tipi armatürler sadece çalışma ihtiyaç anında devreye alınmaktadır. Bu nedenle U tipi armatürlerin kullanımı yaklaşık olarak %30 civarındadır. Bu nedenle tesisin yıllık enerji sarfiyatı 170,696 kWh olmaktadır.

Tesis içerisinde 150 W gücünde YBSB armatürden 132 adet, 36 W U tipi armatürden 86 adet ve 250 W HDK tip armatürden 34 adet bulunduğu görülmektedir. Bu armatür tipleri için 3 farklı üretim firması verilerinin ortalaması alınarak Tablo 3 elde edilmiştir.

Tablo 3. YBSB ve U Tipi Armatürlerin Ortalama Bilgileri

Armatür	Güç (W)	Işık Akısı (Lm)	Balast Kaybı (W)	Etkinlik Faktörü (Lm/W)	Kullanım Ömrü (h)
150 W YBSB	150	12.333	22	71,81	26.500
250 W YBSB	250	24.000	31	86,41	26.500
36 W U Tipi	36	2.467	4	61,67	11.000

LED armatür analizi

Bu bölümde arıtma tesisinde mevcutta kullanılan 150 W ve 250 W yüksek basınçlı sodyum buharlı armatürler ile 36 W

floresan armatürlerin ışık akısı karşılaştırması yapılmıştır ve mevcut sistemde kullanılan armatürler LED armatür ile değiştirildiğinde hangi güçte bir LED armatür kullanılacağı tespiti yapılmıştır. Yapılan bu tespitler yine 3 farklı firmanın ürettiği LED armatür verilerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Tablo 4’de mevcut armatürlerin LED armatür karşılıkları verilmiş ve bu değişimin yapılması sonucu elde edilecek enerji verimliliği tespiti bulunmaktadır.

Tablo 4. 150 W, 250 W ve 36 W Armatür Eşdeğeri LED Armatür Bilgileri

Armatür Tipi	Etken	YBSB	LED	Enerji Verimliliği
150 W YBSB Armatür İçin	Güç	172	106,67	37,98%
	Işık Akısı Etkinlik Faktörü	12.333	11.700	-5,13%
	Kullanım Ömrü	71,81	109,78	52,88%
250 W YBSB Armatür İçin	Güç	281	180	35,94%
	Işık Akısı Etkinlik Faktörü	24.000	23.387	-2,55%
	Kullanım Ömrü	86,41	129,93	50,36%
36 W U Tipi Armatür İçin	Güç	40	25	37,50%
	Işık Akısı Etkinlik Faktörü	2.467	2.433	-1,38%
	Kullanım Ömrü	61,67	97,33	57,82%
		11.000	54.000	390,91%

Tablodan yorumlandığı üzere ışık akısındaki önemsenmeyecek düzeyde olan %1-5 arasındaki bir düşüş göze alındığında güç olarak %35-38 arasında, kullanım ömrü olarak ise %103 ile %390 arasında bir enerji verimliliği elde edileceği görülmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Atık su arıtma tesisine yapılacak olan mikro HES ve tesis içerisinde bulunan aydınlatma elemanlarının günümüz teknolojisinin en tasarruflu yöntemi olan LED aydınlatma armatürlerini ile değiştirilmesinden elde edilecek olan enerji verimliliği, maliyet analizi ve amortisman süreleri tespiti yapılmıştır.

Mikro hidroelektrik santrali

Cebri boru yatırım maliyeti hesaplamalarındaki en büyük etken cebri borunun et kalınlığı ve çapıdır. Yapılan hesaplamalarda cebri boru et kalınlığının 7.22 mm ve çapının ise 1174 metreden az olmaması gerektiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Cebri boru kilogram hesabı için Denklem (7) ve Denklem (8) kullanılacaktır.

$$sG = (D - e_{net})x e_{net}x 0,0246615 \quad (7)$$

$$G = (1740 - 7,22)x 7,22 x 0,0246615 = 191,28 \text{ kg} \quad (8)$$

Denklem (7) ve Denklem (8) ile 1 metre cebri borunun 191.28 kilogram olduğu ve toplam kullanılacak olan 13.02 metre cebri boru için ise 2,490,47 kilogram cebri boru kullanılacağı

tespit edilmiştir. Cebri boru maliyet hesabı için Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yayımlanan birim fiyat tablosu analiz edilmiş ve burada 55.230.1029 poz numaralı “açıktaki cebri boru ve çelik mesnetleri” baz alınarak kilogram fiyatı 93.99 TL olduğu görülmektedir. Bu durumda cebri boru toplam maliyeti 234,079 TL olmaktadır.

Türbin yatırım maliyeti için kaplan ve francis tip türbinlerin tesis için uygun olduğu belirlenmiştir. Kaplan tip türbin için Denklem (9) ve francis tip türbin için ise Denklem (10) kullanılarak türbin maliyeti hesaplamaları yapılmıştır.

$$GC_{pr} = 31196 \times \frac{p_m^{0,42}}{h^{0,11}} = 31196 \times \frac{8,14^{0,42}}{0,62^{0,11}} = 79.332 \text{ €} \quad (9)$$

$$C_{pr} = 25698 \times \frac{p_m^{0,44}}{h^{0,18}} = 25698 \times \frac{8,14^{0,44}}{0,62^{0,18}} = 70.456 \text{ €} \quad (10)$$

Döviz kuru, Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası efektif satışı baz alınarak 1 Euro = 21.28 TL kabul edilmiştir. Bu durumda kaplan tip türbin için 1,688,185 TL, francis tip türbin için ise 1,499,303 TL yatırım maliyeti olduğu tespit edilmektedir.

Mikro ölçekli hidroelektrik santrali kurulumu için kontrol ve kumanda panoları, bakım ve onarım giderleri ve tesisi işletmek için kullanılacak malzemeler için işletme giderleri bulunmaktadır. Bu giderler ise Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Diğer maliyetler

Gider Kalemleri	Aylık Maliyet (TL)	Yıllık Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
Kontrol ve Kumanda Panoları	2.200	26.400	264.000
Bakım Onarım Gideri	1.250	15.000	150.000
İşletme Maliyeti	1.050	12.600	126.000

Tablo 8. Değişim Sonucu LED armatür kar/zarar analizi

Parametre	150W YBSB	250W YBSB	36W Floresan	106,67 W LED	180 W LED	25 W LED
Kullanılan Güç (W)	150	250	36	106,67	180	25
Kullanım Bedeli (TL)	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09
Kullanılan Saat	58.000	54.000	54.000	58.000	54.000	54.000
Toplam Güç Bedeli (TL)	26.883	41.715	6.007	19.117	30.035	4.172
Değişim/Alım Adedi	2,19	2,04	4,91	1	1	1
Değişim/Alım Ücreti (TL)	208,67	227	57,33	1.332	4.085	91,33
Toplam Değişim/Alım Bedeli (TL)	456,99	463,08	281,49	1.332	4.085	91,33
Genel Maliyet Toplamı (TL)	27.340	42.178	6.288	20.509	34.120	4.263

Elde edilen tüm bu veriler ile mikro ölçekli hidroelektrik santralinin kaplan ve francis tip türbinler kullanılarak oluşan kurulum maliyeti ve 10 yıl içerisinde oluşacak diğer giderleri bulunmuştur. Bütün bu maliyetlerin amortisman süreleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Kaplan ve francis tip türbin ile amortisman süreleri

Türbin Tipi	Yıllık Enerji Pot. (kWh)	Enerji Birim Fiyatı (TL)	Yıllık Enerji Verimliliği Tutarı (TL)	Kurulum Maliyeti (TL)	Amortisman Süresi (Yıl)
Kaplan Tip	70.332	3,09	217.325,9	2.213.864	10,19
Francis Tip	70.332	3,09	217.325,9	2.024.984	9,32

Tablo 6’da görüleceği üzere atık su arıtma tesisinin çıkış bölgesinde bulunan parshall savağı üzerine kurulacak olan mikro HES toplam maliyeti yaklaşık 2,024,984 TL olmakta ve kurulan bu hidroelektrik santralinden yıl içerisinde 217,325,9 TL kar edilmektedir. Yaklaşık olarak 9 yıl gibi bir süre içerisinde ise kurulan hidroelektrik santrali kendisini amorti etmektedir. Yapılacak olan tesisin kullanım ömrü en az 50 yıl olarak kabul edilmekte olup, geriye kalan 41 yıl tesis kendisini amorti etmiş şekilde çalışacaktır.

LED Dönüşüm

LED dönüşüm yatırım maliyeti için öncelikle 150 W ve 250 W YBSB armatürler ile 36 W floresan armatürlerin eşdeğeri olan LED armatür araştırması yapılmıştır. Bu armatür tipleri için 3 farklı üretim firmasından fiyat alınmış ve bunların ortalaması ile hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 7. LED armatür ömründe değişim yapılacak diğer armatür adetleri

Armatür Tipi	LED Kullanım Ömrü	YBSB Armatür Kullanım Ömrü	Değişim Adedi
150 W YBSB	58.000	26.500	2,19
250 W YBSB	54.000	26.500	2,04
36 W Floresan	54.000	11.000	4,91

Ortalama fiyatlar sırasıyla 150 W, 250 W ve 36 W armatürler için 1,332 TL, 4,085 TL ve 91,33 TL’dir. Yine aynı armatürlerin ampul fiyatları ise aynı yöntemle hesaplanmış ve onlar ise yine sırasıyla 208,67 TL, 227 TL ve 57,33 TL olarak tespit edilmiştir.

LED armatür kullanım ömürleri içerisinde kaç adet yüksek basınçlı sodyum buharlı armatürlerin ve floresan armatürlerin değiştirileceği Tablo 7’de verilmiştir.

LED armatür ortalama fiyatları, yüksek basınçlı sodyum buharlı armatürlerin değişim ücretleri ve değişim adetleri bulunduktan sonra LED dönüşümün kullanım ömrü boyunca elde edilecek fayda zarar hesaplaması Tablo 8’da gösterilmiştir. Bu hesaplama ilk defa alınacak olan LED armatürler değişim/alım adedi, değişim/alım ücreti ve toplam değişim/alım bedeli satırlarına eklenerek toplam maliyete dahil edilmiştir.

Tablo 8’de 250 W gücündeki YBSB armatürün ömründeki toplam maliyeti 42,178 TL olmakta iken, 180 W gücündeki bir LED ile değiştirilmesi durumunda değişim maliyeti dahil toplam ömür maliyeti 34,120 TL olduğu görülmektedir. Bu hesaplamalar bütün armatür adetleri için yapıldığında bütün armatürler LED armatüre dönüştürülürse alım maliyeti dahil edilmesine rağmen LED ömrü sonunda 1,349,814 TL fayda sağlayacağı tespit edilmiştir. İlk değişim maliyeti ise Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. LED armatür ilk değişim maliyeti

Armatür Tipi	Adet	LED Armatür Birim Fiyatı (TL)	Toplam Dönüşüm Maliyeti (TL)
150 W YBSB	132	1.332	175.824
250 W YBSB	34	4.085	138.890
36 W U Tipi	86	91,33	7.854
Genel Toplam		322.568 TL	

LED aydınlatma dönüşümünün genel maliyeti 322,568 TL olarak hesaplanmıştır. Tablo 10’da ise LED aydınlatma dönüşümünün aylık sağlayacağı enerji tasarrufunun tutarı için gerekli çalışmalar yapılmıştır. Burada güncel enerji birim fiyatı 3.09 TL olarak kullanılmış olup daha önce ki hesaplamalarda sabit tutulan YBSB armatürler için kullanım süresi günlük 16 saat, U tipi armatürler için 16 saatlik gece süresinin %30’u alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 10. LED dönüşümün aylık net kar göstergesi

Armatür Tipi	Adet	YBSB&U Tipi Gücü (W)	LED Dönüşüm Gücü (W)	Güç Verimi (W)	Günlük Güç Verimi (W)	Aylık Güç Verimi (kW)	Enerji Birim Fiyatı (TL)	Aylık Enerji Tasarrufu Tutarı(TL)
150 W	132	172	106,6	65,33	137,98	4.139,4	3,09	12.791
250 W	34	281	180	101	54,94	1.648	3,09	5.092
36 W	86	40	25	15	6,19	185,76	3,09	574
Genel Toplam								18.457 TL

Tablo 10’dan ise LED dönüşümünün aylık net enerji tasarrufu 18,457 TL olduğu görülmektedir. Özet olarak 322,568 TL yatırım yapılarak aylık 18,457 TL tasarruf elde edilecektir. Yani 18 ay gibi bir süre içerisinde kendisini amorti edecektir. Kurulacak olan sistemin ömrü 9 yıl civarında olduğundan ulaşılan netice oldukça verimlidir.

Sonuçlar

Enerji verimliliğinin belirlenmesi aşamasında ilk olarak tesis çıkış suyunun debisi 1.97 m³/s ve düşü miktarının 0.62 m olduğu belirlenerek diğer hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar ile mikro ölçekli hidroelektrik santralinde kullanılacak olan cebri boru çapı 0.871 m olmuş ve tesiste kaplan ve francis tip türbin kullanılmasının uygun olduğunun tespiti sağlanmıştır. Tüm bu veriler ile tesisin 8.14 kW/h bir elektrik enerjisi potansiyeline sahip olduğu bunun yıllık elektrik üretiminin ise 70,332 kW/yıl olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu elektrik üretiminin ise yıllık 217,825,9 TL getirisi olmaktadır. Kurulum maliyetleri ise cebri boru için 234.079 TL, kaplan tip türbin kullanılacaksa 1,688,185 TL, francis tip türbin kullanılacaksa 1,499,303 TL olduğu belirlenmiştir. Bunlara ilave olarak, kontrol ve kumanda panolarının imalatı ile bakım, onarım ve işletme maliyetleri hesaba katıldığında kaplan tip türbin için 2,213,864 TL ilk yatırım ve 1 yıllık bakım onarım ve işletme maliyeti ortaya çıkarırken francis tip türbin için 2,024,982 TL ilk yatırım ve 1 yıllık bakım onarım ve işletme maliyeti ortaya çıkmaktadır. İlk kurulum ve yıllık giderler hesaba katıldığında francis tip türbin kullanımının yaklaşık 9 yıl gibi bir sürede kendisini amorti edeceğine ulaşılmıştır. Hidroelektrik santrallerinin ortalama kullanım ömrü 50 yıl olarak bilindiğinden ulaşılan neticede yüksek dereceden enerji verimliliği sağlanmış olur.

Tesis içerisinde kullanılan ve LED dönüşümü planlanan yüksek basınçlı sodyum buharlı armatürler ve floresan armatürler için öncelikle eşdeğer ışık akısına sahip LED armatür araştırması yapılmıştır. Burada 150 W, 250 W yüksek basınçlı sodyum buharlı armatür ve 36 W floresan armatürlerin eşdeğer ışık akısına sahip LED armatürler ile değiştirilmesinin toplam maliyetinin 322.568 TL olduğu tespit edilmiştir. Bu dönüşümün aylık getirisinin 18.457 TL olduğu yapılan hesaplamalarla tespit edilmiş ve yapılacak yatırıma 18 ay gibi bir sürede amorti edileceği ve ortalama LED kullanım ömrü 9 yıl olarak bilindiğinden ulaşılan neticede yüksek dereceden enerji verimliliği sağlanmış olur.

Anaerobik çamur çürütme için yapılan araştırmalar neticesinde tesis içerisinde yeterli alanın bulunmadığı, ilk yatırım ve işletme giderlerinin çok yüksek olduğu tespit

edilmiştir. Bu nedenle tesis içerisine ekstra anaerobik çamur çürütme prosesi için herhangi bir çalışma yapılmasına gerek duyulmadığı tespit edilmiştir. Anaerobik çamur çürütme ünitelerinin atık su arıtma tesisi planlama aşamasında iken karar verilerek ilk tesis kurulum anında kurulması daha uygun olacaktır.

Yapılan bütün araştırmalar neticesinde Gaziantep ileri biyolojik atık su arıtma tesisi için yapılacak olan enerji verimliliği çalışmaları neticesinde yıllık 142,010 kWh enerji tasarrufu sağlanacağı tespit edilmiştir. Bu tasarruf için yaklaşık kurulum maliyeti 2,347,550 TL olarak hesaplanmış ve bu yatırım ile yıllık 438,810 TL gelir elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Araştırmacılarından Bayram DURMUŞ, makaleye konu olan proje fikrinin bulunmasında, gerekli saha analizlerinin ve ölçümlerinin yapılmasında ve makale yazım ile düzeninde görev almıştır. Araştırmacılarından Mustafa Mikail ÖZÇİLOĞLU, başta danışmanlık hizmeti olmak üzere makaleye konu projenin araştırılmasında ve makale yazım ile düzeninde görev almıştır.

Kaynaklar

- [1] İ. Gülsoy and İ. Kılıçaslan, “Kentsel atık su arıtma tesisinde tüketilen enerjinin kirlilik giderimine bağlı olarak incelenmesi,” *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (035), 29-46, 2018.
- [2] Ö. Özdemir, “İleri biyolojik atıksu arıtma tesisinde sürdürülebilir işletme için revizyon ve enerji verimliliği: Malatya örneği.” *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (5), 9-20, 2016.
- [3] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ulusal enerji verimliliği eylem planı, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-verimliliği-ulusal-enerji-verimliliği-eylem-planı>, Erişim 20 Kasım 2023
- [4] S. Yıldız, O. Ö. Namal and M. Çekim, “Atık su arıtma teknolojilerindeki tarihsel gelişimler.” *Selçuk*

Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 1(1), 55-67,2013.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/sujest/issue/23221/247958>

- [5] Anonim, “*Mikroorganizmalar ve atık su teknolojisine genel bir bakış.*” 1–30, 2018.
- [6] A. Gezer and A. Erdem, “Su stresi, su kıtlığı ve su tasarrufu hakkında halkın farkındalığının belirlenmesi: Akdeniz üniversitesi örnek çalışması.” *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4 (2), 113-122, 2018.
- [7] T. Wintgens, D. Bixio, C. Thoeye, P. Jeffrey, R. Hochstrat and T. Melin, “Reclamation and reuse of municipal wastewater in Europe.” *Aquarec*, 2006.
- [8] P. L. McCarty, J. Bae and J. Kim, “Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved.” *Environmental science and technology*, 45(17), 7100–7106, 2011.
- [9] D. Erkan, T. Yılmaz, A. Yücel, A. Yılmaz, A. Tel and D. Uçar, “Atık su arıtma tesislerinde enerji kazanımı için mikro ölçekte hidroelektrik santrallerin uygulanabilirliği.” *Harran üniversitesi mühendislik dergisi*, 3 (2), 1-6, 2018.
- [10] B.M. Karagözoğlu and Z. Yılmaz, “Atık su arıtma tesislerinde enerji tüketimiyle ilgili araştırma bulguları.” *Uluslararası kentsel su ve atıksu yönetimi sempozyumu*, Denizli, Türkiye 25-27 Ekim 2018.
- [11] Türkiye istatistik kurumu, Su ve atık su istatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atıksu-Istatistikleri-2020-37197/>, Erişim 13 Kasım 2023.
- [12] E. Alimoğlu, Z. Bozkuş and A. M. Yanmaz, “Nehir tipi hidroelektrik santrallerin bilgisayar destekli ön tasarımı.” *Teknik Dergi*, 25(124), 2014.
- [13] M. S. Özdemir, A. Dalcı and C. Ocak, “Akarsu tipi hidroelektrik santraller ve bu santrallerde kullanılan türbin-generatörler.” *Mühendislik bilimleri ve araştırmaları dergisi*, 2(2), 69-75, 2020.
<https://doi.org/10.46387/bjesr.798387>



Derin Öğrenme (1D-CNN, RNN, LSTM, BiLSTM) ile Enerji Tüketim Tahmini: Diyarbakır AVM Örneği

Energy Consumption Forecasting with Deep Learning (1D-CNN, RNN, LSTM, BiLSTM): Diyarbakır Shopping Mall Example

Yusuf Berus¹, Yurdağül Benteşen Yakut^{2*}

¹ Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, yusufberus@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3471-9892>

² Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, bentesen@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3236-213X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 05/01/2024
Revizyon 10/02/2024
Kabul 22/02/2024
Online 30/06/2024

Anahtar Kelimeler:

Enerji tüketim tahmini,
CNN, RNN, LSTM, BiLSTM

ÖZ

Bu makale çalışmada, Diyarbakır il merkezinde yer alan bir alışveriş merkezinin toplam 2027 günlük (5 yıl, 6 ay, 19 gün) aktif tüketim verileri kullanılarak, makine öğrenmesi yöntemleri ile enerji tüketim değişiminin tahmini amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan aktif tüketim miktarı saatlik ölçülerek 2027x24=48648 boyutunda veri seti elde edilmiş olup, gerekli onaylar Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.' den alınmıştır. Enerji aktif tüketiminin tahmini için 1D-CNN, RNN, LSTM ve BiLSTM olmak üzere dört farklı derin ağ modeli geliştirilmiştir. Söz konusu geliştirilen modellerin özellikle tekrarlayan sinir ağları yapısındaki modeller aynı ölçütlerde eğitime tabi tutularak, birbirleri arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. Tüm uygulamalar 10 kez tekrar edilerek en yüksek performansa sahip olan değerler kayda alınmıştır. Önerilen modellerin performansı RMSE, MAE ve R^2 ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Farklı mimarilerin önerildiği çalışmada, test veri setine göre determinasyon katsayısı dikkate alındığında Tekrarlayan sinir ağlarının başarımlarının performans aralığının [%92.17, %93.63] bant aralığında olduğu ve önerilen modeller ile belirli düzeyde başarımların elde edildiği gözlemlenmiştir. Tekrarlayan sinir ağlarında başarımların birbirine yakın performans sergiledikleri ve bunların içinde en iyi performansın BiLSTM modelinde ünite-düğüm sayısı 100 olan mimaride elde edildiği görülmüştür. Önerilen mimarilere göre 1D-CNN'in tekrarlayan sinir ağlara göre daha düşük bir performans sergilediği görülmüştür. 1D-CNN mimarisinin geliştirilerek, başarımlarının artırılacağı düşünülmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 05/01/2024
Received in revised form 10/02/2024
Accepted 22/02/2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Energy consumption forecast,
CNN, RNN, LSTM, BiLSTM

ABSTRACT

This paper estimates the change in energy use using machine learning algorithms on a total of 2027 days (5 years, 6 months, and 19 days) of active consumption data from a mall center in Diyarbakır province. Hourly measurements of the active consumption amount were used in this investigation, and a data set of 2027x24 = 48648 was acquired along with the required clearances from Dicle Electricity Distribution Inc. For the purpose of predicting energy active consumption, four distinct deep network models—1D-CNN, RNN, LSTM, and BiLSTM—have been constructed. The created models under consideration, specifically those with a recurrent neural network topology, underwent training using identical criteria, and their performance values were subsequently compared. The values demonstrating the best performance were noted following 10 iterations of each program. The suggested models' performance was assessed using the R^2 , MAE, and RMSE criteria. The performance range of recurrent neural networks was determined to be in the band range of [92.17%, 93.63%] in the study where different designs were provided, when the coefficient of determination was taken into account in line with the test data set. Indeed, it has been observed that a certain level of performance has been achieved with the proposed models. The results of recurrent neural networks have demonstrated a degree of mutual similarity, with the Unit = 100 architecture in the BiLSTM model demonstrating the highest performance. Based on the proposed topologies, recurrent neural networks are found to outperform 1D-CNN. Performance may be increased by fine-tuning the 1D-CNN architecture.

Doi: 10.24012/dumf.1415055

* Sorumlu Yazar

Giriş

Elektrik enerjisi ekonomik kalkınmanın en önemli motorlarından biridir ve günlük yaşam için vazgeçilmez olarak kabul edilir. Enerji tüketimi gelişmekte olan ülkelerde, dünya çapında sürekli bir şekilde artmaktadır. Enerjiye olan bu ihtiyaç değişimi; elektrik enerjisinin dağıtımının ve ölçümünü de içeren tüketiminin daha iyi planlanmasını gerektirir [1]. Elektrik enerjisinin doğru bir şekilde kullanılması için dağıtılmasının yanı sıra ihtiyaç olan miktarda üretilmesi de gerekmektedir. Bu yüzden enerji sektöründe planlama önemli bir yere sahip olmakta ve bunun temelini ise yük talep tahmini oluşturmaktadır. Enerji talebinin doğru bir şekilde tahmin edilememesi, arz ve buna bağlı olarak talep arasında oluşacak farklar ülke ekonomisi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir [2]. Değişen Enerji pazarlarının derecelendirilmesi, serbestleştirilmesi ve bir ülkenin sosyo-ekonomik gelişimine belirgin etkisi nedeniyle enerji analizi ile elektrik enerjisi tüketimi tahminleri daha da önemli hale gelmiştir [3]. Elektrik yükünün tahmin edilmesi, enerji üretim sistemlerinin planlanması ve modern elektrik tedarik ağlarının verimli çalışması ve sürdürülebilir büyümesi açısından çok önemli bir görevdir [4].

Enerjinin dağıtımının ay sonu değerlerinin bilinmesi için sayaçlar aracılığı ile doğrudan veya uzaktan okuma ile yapılabilmektedir. Ancak okumalar her zaman gerçek tüketim değerlerini yansıtamaya bilmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından ay sonu endeks değerlerinin tahmin yoluyla belirlenmesi için tahminleme yapılmaktadır. EPDK tahminleme yöntemine göre; tahmini yapılacak tarih ile en son okuma yapılan tarihin farkı alınmaktadır. Bu sonuç değeri güç değişim katsayısı, endeks ilerleme eğilimi ve mevsimsellik katsayısı ile çarpılarak, ilgili aya ait bir tahmini tüketim değeri hesaplanmış olur [5]. Ancak bu tahminleme yöntemi her zaman doğru olmayabilmektedir. Güç sistemlerindeki elektrik talep miktarını tahmin etmek birçok parametreye bağlıdır. Elektrik yükünün tahmini, karmaşık bir süreçtir ve gelecekteki taleplerin doğru bir şekilde öngörülmesi, enerji talep yönetimi tekniklerinin kullanılmasını gerektirir. Bu süreç, geçmiş verilerin analiziyle başlar ve ardından bu verilerin üzerine kurulmuş modellerin kullanılmasıyla devam eder. Makine öğrenimi yöntemleri, karmaşık doğrusal olmayan bağlantıları geçmiş veri modellerini içeren bir öğrenme süreci aracılığıyla modelleyebildiğinden, elektrik yükünün doğasına iyi bir şekilde uyarlanmıştır [4]. Geçmiş elektrik tüketim verilerinin analizi yapılarak gelecekteki elektrik tüketim miktarlarının tahmini için çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri etkili olabilmektedir. Makine öğrenmesi yöntemlerinde zaman serisine bağlı güç bilgisi verileri ile elektrik yükü tahmininde başarılı sonuçlar elde edilebilir. Makine öğrenmesi algoritmaları, veri analizi ile gelecekteki elektrik enerji taleplerini tahmin etme çalışmalarında kullanılabilir. Bu yaklaşım, geçmiş verilerin analizi ile gelecekteki enerji talebini daha doğru bir şekilde tahmin etmeye ve enerji tedarik zincirini daha etkin bir şekilde yönetmeye yardımcı olabilir. Makine öğrenmesi yapay zekanın bir dalıdır. Bilgisayarlara insanlar için doğal gelen bir şeyi yapmayı ve deneyimlerden öğrenmeyi öğreten bir yaklaşımdır. Öğrenme

için örnek sayısı arttıkça algoritmanın performansı uyarlanabilir şekilde artar [6]. Derin öğrenme, otonom sürüşten tıbbi cihazlara kadar pek çok sektöre uygulandığı gözlemlenmektedir [4].

Güç sistemlerinde enerji tahmini için makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı, birçok bilimsel çalışmada görülmektedir. Tablo 1'de enerji tahminleme ile ilgili çeşitli çalışmaların içeriği ve kullanılan yöntemler verilmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere geniş bir vizyonda çalışmaların yapıldığı görülmekte olup, makine öğrenmesi yöntemleri ile gerçekleştirilen çalışmaların bazıları; kısa-orta ve uzun vadeli elektrik tüketim tahmini, geçmiş elektrik enerjisi tüketimlerine bakılarak saatlik bazda elektrik tüketim tahmini, önceki dönem verileri ile birlikte güç sistemlerinde talep edilen güç miktarı ile kısa dönem için yük tahmini, güç sistemlerinde meydana gelen kayıp miktarı, belli bir pilot bölge için enerji talep miktarının tahmini, elektrik enerjisinin verimlilikle kullanılması için bir fabrikada çalışan elektrik motorlarının devreye alınmasıdır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde genel anlamda makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı ve elektrik tüketiminin tahmini çalışmalarında özellikle doğal dil işleme amacıyla geliştirilen Tekrarlayan sinir ağı (Recurrent Neural Network, RNN), Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları (Long Short-Term Memory, LSTM) ve çift yönlü geçitli yinelenen birim (Gated Recurrent Unit, GRU) yöntemlerinin tercih edildiği görülmektedir. Bu makale çalışmasında, Diyarbakır il merkezinde yer alan bir alışveriş merkezinin 5 yılı aşan aktif tüketim verileri kullanılarak, makine öğrenmesi yöntemleri ile enerji tüketim değişiminin tahmini amaçlanmıştır. Literatürdeki performanslarından kaynaklı olarak derin öğrenme yöntemlerinden Bir Boyutlu *Evrişimli Sinir Ağı* (1D-Convolutional neural network, 1D-CNN), RNN, LSTM ve Çift Yönlü LSTM (Bidirectional LSTM, BiLSTM) yöntemleri bu çalışmada tercih edilmiş ve elde edilen başarımları karşılaştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem

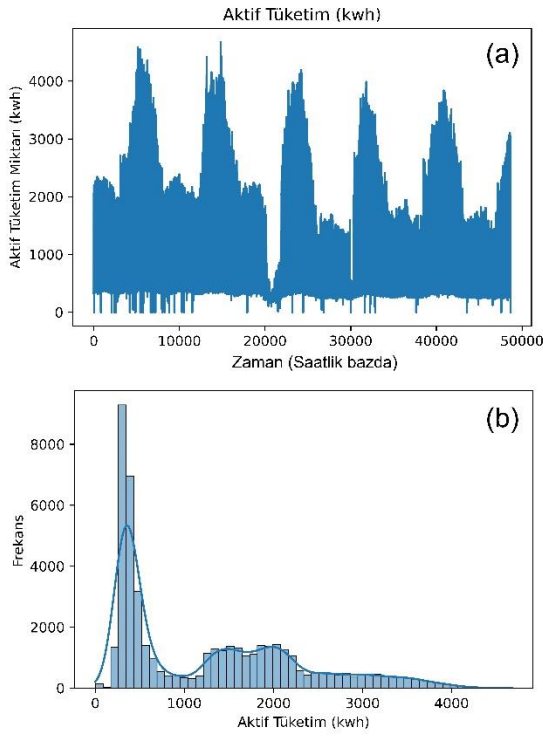
Veri Seti ve Uygulanan Ön İşlemler

Çalışma kapsamında kullanılan veri seti için Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş.' den temin edilmiş olup, firmanın merkezi Diyarbakır olmak üzere Şanlıurfa, Batman, Mardin, Siirt ve Şırnak illeri kapsamında hizmet verdiği görülmektedir.

Diyarbakır il merkezinde yer alan bir alışveriş merkezinin 01.12.2017-20.06.2023 tarihleri arasında toplam 2027 günlük (5 yıl, 6 ay, 19 gün) aktif tüketim verileri kullanılmıştır. Her saat başı tüketim miktarı ölçüldüğünden, veri seti boyutunun $2027 \times 24 = 48648$ olduğu görülmüştür. Enerji aktif tüketiminin saat çözünürlüğünde değişimi Şekil 1(a)'da ve veri setinde yer alan örneklerin hangi ölçüde tekrar ediyor olduğunu gösteren histogram değişimi Şekil 1(b)'de gösterilmiştir. Veri setinin bulunduğu uzaydaki dağılımının tespiti için istatistiksel değerler hesaplanmış ve elde edilen bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Güç sistemlerinde enerji tahmini için makine öğrenmesi tabanlı yapılan örnek çalışmalar

Kaynakça	Yöntem	Performans ölçütü / Başarımı	Çalışmanın içeriği
[7]	LSTM, GRU, RNN, Otot regresif entegre hareketli ortalama (ARIMA)	Gerçek ve tahmin arasındaki uyum oranı / %67.47 ile LSTM, %67.32 ile GRU, %66.17 ile RNN ve %19.48 ARIMA.	Tekstil endüstrisi makinelerinin bekleme durumunda aşırı kaynak tüketimini önlemek amacıyla Derin Öğrenme destekli bir elektrik tahmin modeli tasarlanmıştır.
[8]	Derin Kalıntı Ağları (Deep residual neural network, DRNN), KNN, SVR, Karar Ağacı, Lineer Regresyon, Gradient boosting, XGBoost, random forest	RMSE, MAE, R^2 / Tüm ölçütlere göre DRNN tabanlı model en iyi performansı sergilemiştir.	Slovenia Pecan Caddesi'nde evlerin yaklaşık dört yıllık elektrik enerjisi tüketimi verilerini içeren deneysel analizi ve değerlendirmesi derin öğrenme yöntemleri ile çalışılmıştır.
[9]	Linear Regression, Lasso, Ridge, Elastic Net, Extra Trees Regressor, Random forest, Ada Boost, Gradient boosting Support vector, K-Neighbours	Ort. MSE, Ort. RMSE, Ort. MAE, Ort. R^2 / en iyi performansın Extra Trees Regressor yöntemi ile elde edildiği tespit edilmiştir.	24 saat boyunca elektrik talebi profili tahmin etmek için on bir çevrimdışı öğrenme ve beş çevrimiçi öğrenme algoritmasının etkileri araştırılmıştır.
[10]	LSTM, CNN-RNN Yapay sinir ağları (ANN)	Doğruluk / İki uygulama yapılmış ve her iki uygulamada da sırasıyla %81 ve %78 doğruluk ile CNN-RNN'nin en iyi performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir.	Yunanistan'da gerçek yaşam ortamlarında oluşturulan gerçek yük ile tahmin edilen yük arasındaki farkın azaltılması için çalışılmıştır.
[11]	ANN, MLR, Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), SVM	RMSE / Uzun vadede her iki yıl için SVM, Kısa vadede ise her iki yıl için ANN'nin en iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.	Kıbrıs'ta 2016-2017 verileri ile yapay sinir ağı (ANN), çoklu doğrusal regresyon (MLR), uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ve destek vektör makinesini (SVM) içeren makine öğrenme stratejileri kullanılarak uzun/kısa vade için elektrik talebinin tahmini üzerine çalışılmıştır.
[12]	LSTM, Lineer Regresyon	MAE, MAPE, Relatif Performans / MAE=11.5, MAPE=%8.7 ve Relatif Performans=%40 ile LSTM en iyi performansı sergilenmiştir.	Finlandiya'da elektrik şebekesi kaybı tahmini için LSTM tekrarlayan sinir ağı modelini önermektedir.
[13]	BiLSTM, GRU, SVR, Deri Öğrenme Regresyon (DLR), XGBoost, AdaBoost, RF	MAPE, RMSE, MSE, R^2 / MAPE=%2.90, RMSE=50.3, MSE=2534.69, R^2 =-0.93 ile DLR en iyi performansı sergilemiştir.	Panama'da elektrik tahmini ile kısa vadeli yük tahmini 1 saat ila 24 saat önceden tahmin edilmesini hedeflemiştir.
[14]	LSTM	MAPE / Farklı makine öğrenmesi yöntemleri içinde en iyi performansı LSTM sağlamıştır (%1.4472).	Zaman serisi verileri gibi sıralı verilerle LSTM derin öğrenme yöntemi ile kısa vadede elektrik tüketimi tahmini yapılmıştır.
[15]	Yapay sinir ağları (ANN)	Korelasyon katsayısı, R^2 / Farklı ANN mimarisinde geliştirilen modeller karşılaştırılmıştır.	Türkiye'deki demiryolu taşıtlarının son 43 yıldaki hat uzunluğu, yolcu sayısı ve yük miktarı değerleri esas alınarak toplam enerji tüketim miktarları incelenmiştir.
[16]	Tam bağlı (Fully Connected) CW, CNN, LSTM	MAE, MAPE, MdAPE / Tüm ölçütlere göre LSTM tabanlı model en iyi performansı sergilemiştir.	Çalışmalarında kullanılan veriler San Antonio'daki dört konuttan toplandı. Derin öğrenme tekniklerini kullanarak aylık enerji tüketimini tahmin edecek bir sistem önerilmiştir.
Önerilen Çalışma	1D-CNN, RNN, LSTM, BiLSTM	RMSE, MAE ve R^2 / Determinasyon katsayısına göre önerilen modellerin başarımlarının performans aralığının [%92.17 %93.63] bant aralığında olduğu gözlemlenmiştir.	Enerji tüketiminden elde edilen saatlik bazda zaman dizisi kullanılarak, geçmiş 5 (lookback=5) değerden oluşan vektörden bir sonraki enerji tüketim değerinin tahmini



Şekil 1. (a) Diyarbakır il merkezinde yer alan bir alışveriş merkezinin 2027 günlük aktif tüketiminin zamanla değişimi (b) Veri setini oluşturan örneklerin histogram değişimi

Veri seti geliştirilen makine öğrenmesi modellerine uygulanmadan önce çeşitli ön işlem adımlarından geçirilmiştir. Bu adımlar aşağıda listelenmiştir.

a) Elektrik tüketimin ölçüm sürecinde veri setinde 17 adet boşluk tespit edilmiştir. Bu boşluklara bir önceki ve bir sonraki değerlerin ortalama değeri atanmıştır.

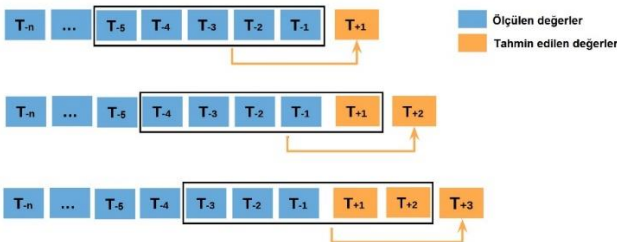
b) Bu çalışmada kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerinin veri ölçeğine bağımlı olmaları nedeniyle, veri seti normalizasyon işlemi ile değer aralığı $[0, 1]$ aralığına dönüştürülmüştür.

c) Veri setinin ilk %80'lik oranı eğitim için ve kalan %20'lik oran ise test veri seti olarak ayrılmıştır. Eğitim setinin ise %20'lik oranı ise çapraz doğrulama için validasyon kümesi olarak ayrılmıştır.

d) Bu çalışmada geri bakış (timestep) değeri farklı değerlerde denenmiş ve en iyi performansın 5 olduğu görülmüştür. Bundan dolayı 5 önceki değere bakılarak bir sonraki değer tahmini gerçekleştirilmiştir. Buna göre oluşturulan veri setinin zaman akışı şekil 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan veri setinin istatistiksel bilgileri.

Parametre	Değer
Veri setindeki örnek sayısı (Count)	48666
Ortalama (mean)	1250.57
Standart sapma (std)	1008.94
Minimum (min)	0.00
Seriye baştan %25, sondan %75 oranında iki kısma ayıran değer	358.80
Seriye baştan %50, sondan %50 oranında iki kısma ayıran değer (medyan)	883.20
Seriye baştan %75, sondan %25 oranında iki kısma ayıran değer	1959.60
Maksimum (max)	4678.20



Şekil 2. Oluşturulan veri setinin zaman akışı

Derin Öğrenme Modelleri

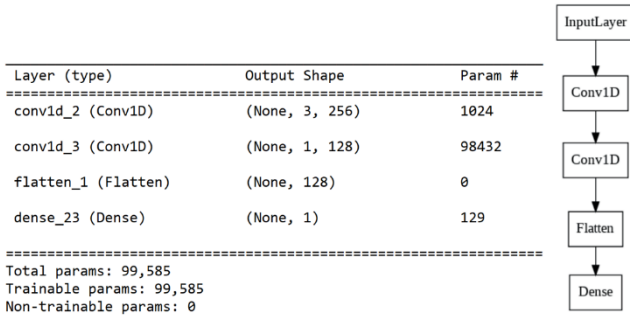
Bu çalışmada, enerji aktif tüketiminin tahmini için 1D-CNN, RNN, LSTM ve BiLSTM olmak üzere farklı derin öğrenme modelleri geliştirilmiştir. Dört farklı yaklaşımın kısa açıklamaları ve her dört yaklaşım için önerilen mimarileri bu bölümde açıklanmıştır.

a) CNN Modeli

CNN, bir derin öğrenme yaklaşımı olup, temel olarak iki boyutlu dizileri işleyebilmek amacıyla geliştirilmiştir. İki boyutlu olan bir imgenin kapsamındaki farklı özellikleri algılayabilmek amacıyla, mimariye birçok katman eklenebilmektedir [16]. İmgelerin farklı özellikleri farklı çözünürlüklerde evrişimli filtreler ile elde edilir ve elde edilen çıkış, bir sonraki katmanın girişi olarak uygulanır. CNN mimarisinin kapsamında; konvolüsyon katmanı, aktivasyon katmanı ve havuzlama (pooling) katmanı yer alır. Bu üç katman genel olarak bir grup katman olup, tekrarlanarak iki boyutlu dizilerin özellikleri elde edilmeye çalışılır. Regresyon problemlerindeki sürekli verileri tahmin edebilmek amacıyla, modelin sonuna regresyon katmanı eklenebilmektedir.

Enerji aktif tüketim verileri bir boyutlu olması nedeniyle çalışma kapsamında 1D-CNN ağı tercih edilmiştir.

Tasarlanan derin ağ modelinin detayları Şekil 3'de gösterilmiştir. Birinci CNN katmanında (3,) boyutunda 256 filtre ve aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. İkinci CNN katmanında ise yine (3,) boyutunda 128 filtre ve aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. Ardından verileri matris biçiminden vektör formuna dönüştürülen flatten katmanı gelir ve son olarak her iterasyonda 1 değer tahmin ettiğimiz için 1 nöron içeren bir katman (Dense) eklenmiştir.



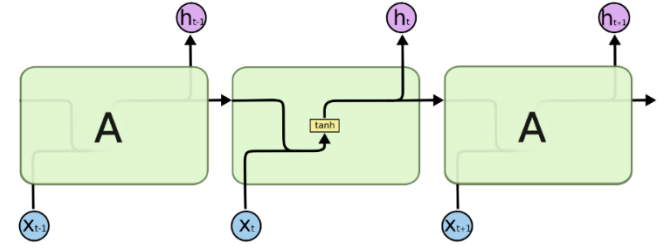
Şekil 3. Tasarlanan 1D-CNN model katmanları

b) RNN Modeli

Yinelemeli Sinir Ağları kullanılarak geliştirilen RNN'ler ardışıl verilerin veya zaman serilerinin tahmin edilmesinde kullanılan bir çeşit yapay sinir ağıdır. Yapay sinir ağlarında olduğu gibi RNN ağlarını eğitmek için de gradyan inişi (gradient descent) ve geri yayılım algoritması kullanılır. Şekil 4'de gösterilen bir RNN ünitesi için çıkış ifadesi denklem (1)'de verilmiştir.

$$h_t = f(W_h h_{t-1} + W_x x_t + b) \quad (1)$$

Denklemde yer alan W ağırlık, b bias, h_t hücrenin t zamanındaki çıktı verisi, x_t ise t zamanındaki girdi verisini ifade eder [16].



Şekil 4. RNN Ünitesi

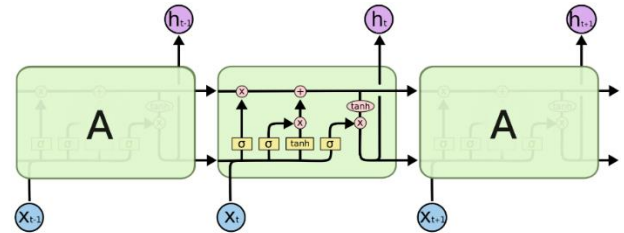
Çalışmada önerilen modelde tek bir RNN modeli kullanılmış ve ünite-düğüm sayısı 50, 100 ve 500 olarak alınmıştır. Ünite-düğüm sayısı, katmanın çıkış boyutu anlamına gelir ve dolayısıyla giriş örüntüsünün belirtilen çıkış boyutunda temsiline dönüştürülmesi sağlanır. Her üç mimari için tek çıkışlı bir katman (Dense) kullanılmıştır. Tek çıkış olmasının nedeni ise eğitim aşamasında tahmin edilmek istenen değer tek değerden oluşmasıdır (Şekil 2). Her 3 uygulama için oluşturulan mimaride eğitilebilir parametre sayısı Şekil 5'de gösterilmiştir. RNN katmanı için tanh ve Dense katmanı için ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

Mimari 1			Mimari 2		Mimari 3	
Layer (type)	Output Shape	Param #	Output Shape	Param #	Output Shape	Param #
simple_rnn_1 (SimpleRNN)	(None, 50)	2800	(None, 100)	10600	(None, 500)	253000
dense_1 (Dense)	(None, 1)	51	(None, 1)	101	(None, 1)	501
Total params: 2,851 Trainable params: 2,851 Non-trainable params: 0			Total params: 10,701 Trainable params: 10,701 Non-trainable params: 0		Total params: 253,501 Trainable params: 253,501 Non-trainable params: 0	

Şekil 5. Tasarlanan 3 farklı RNN model mimarisinin katmanları ve eğitilebilir parametre sayıları

c) LSTM Modeli

RNN hücrelerinde zamanda geri yayılım algoritması kullanıldığında, ünite sayısının fazla olması durumunda kaybolan veya patlayan gradyan problemlerine sebep olmaktadır. RNN'in eksikliği, kaybolan gradyan problemi nedeniyle uzun vadeli bağımlılıkları hatırlayamamalarıdır [17]. LSTM, uzun vadeli bağımlılık sorunlarına çözüm sunmak amacıyla geliştirilmiştir [18]. LSTM farklı fonksiyonlara sahip kapılardan oluşmaktadır. Örneğin LSTM, farklı zaman adımları arasındaki bilgi akışını kontrol etmek için bir unutmaya kapısına sahiptir. Giriş kapısı, hücreye gelen girdiden yeni bilgilerin öğrenmeye çalışıldığı birimdir ve diğer kapı olan Unutmaya kapısı ise önceki zaman damgasından gelen bilgilerin ilişkili veya unutulabilir olup olmadığına karar verir. Son olarak Çıkış kapısı ise hücredeki güncellenmiş bilgiyi mevcut zaman damgasından bir sonraki zaman damgasına iletir [19].



Şekil 6. LSTM Ünitesi [20]

Şekil 6'da gösterilen bir LSTM ünitesi için çıkış ifadesi denklem (2)'de verilmiştir.

$$\text{Giriş kapısı } i_t = \sigma(W_i * [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

$$\text{Unutmaya kapısı } f_t = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (3)$$

$$\text{Çıkış kapısı } o_t = \sigma(W_o * [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (4)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (5)$$

Hücre durumu

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tanh(W_C * [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (6)$$

Denklemlerde yer alan σ lojistik sigmoid fonksiyonunu ve W terimleri ise ağırlık matrislerini ifade etmektedir. Kapı olarak belirtilen vektörler, h gizli (hidden) vektörü ile aynı

boyuta sahiptir. LSTM ağında yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları sigmoid ve hiperbolik tanjanttır.

Çalışmada önerilen modelde tek bir LSTM modeli kullanılmış ve ünite-düğüm sayısı 50, 100 ve 500 olarak alınmıştır. Her üç mimari için tek çıkışlı bir Dense katmanı kullanılmıştır. Her 3 uygulama için oluşturulan mimaride eğitilebilir parametre sayısı Şekil 7'de gösterilmiştir. LSTM katmanında için tanh ve dense katmanı için ReLu aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

Mimari 1			Mimari 2		Mimari 3	
Layer (type)	Output Shape	Param #	Output Shape	Param #	Output Shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 50)	11200	(None, 100)	42400	(None, 500)	1012000
dense_3 (Dense)	(None, 1)	51	(None, 1)	101	(None, 1)	501
Total params: 11,251			Total params: 42,501		Total params: 1,012,501	
Trainable params: 11,251			Trainable params: 42,501		Trainable params: 1,012,501	
Non-trainable params: 0			Non-trainable params: 0		Non-trainable params: 0	

Şekil 7. Tasarlanan 3 farklı LSTM model mimarisinin katmanları ve eğitilebilir parametre sayıları

Mimari 1			Mimari 2		Mimari 3	
Layer (type)	Output Shape	Param #	Output Shape	Param #	Output Shape	Param #
bidirectional	(None, 100)	22400	(None, 200)	84800	(None, 1000)	2024000
dense_6 (Dense)	(None, 1)	101	(None, 1)	201	(None, 1)	1001
Total params: 22,501			Total params: 85,001		Total params: 2,025,001	
Trainable params: 22,501			Trainable params: 85,001		Trainable params: 2,025,001	
Non-trainable params: 0			Non-trainable params: 0		Non-trainable params: 0	

Şekil 9. Tasarlanan 3 farklı BiLSTM model mimarisinin katmanları ve eğitilebilir parametre sayıları

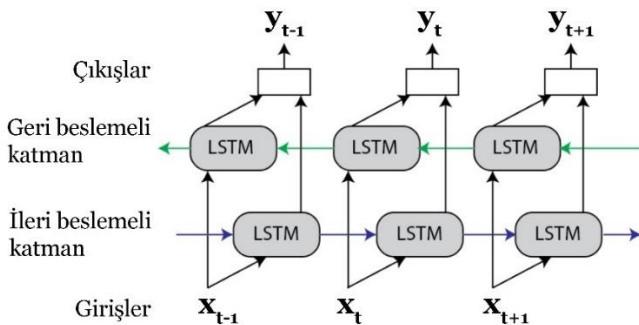
d) Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları (BiLSTM) Modeli

Hem RNN hem de LSTM modeli, bilginin yalnızca zaman içinde ileriye doğru yayılmasına izin verir [21]. Bağlam bilgisini geçmiş ve gelecek zamandan aynı anda yakalamak için çift yönlü RNN geliştirilmiştir. Bu aşamadan sonra şekil 8'de gösterildiği gibi geçmiş ve gelecek bilgilerin etkin kullanımını sağlamak için çift yönlü RNN ve LSTM birimleri birleştirilerek BiLSTM modeli geliştirilmiştir [22-23]. İleri ve geri katmanlardan gelen girdiler, çıktı katmanı tarafından eş zamanlı olarak işlenir [24].

Çalışmada önerilen modelde tek bir BiLSTM modeli kullanılmış ve ünite-düğüm sayısı 50, 100 ve 500 olarak alınmıştır. Çift yönlü olması nedeniyle, mimaride düğüm sayısı sırasıyla 100, 200 ve 1000 olduğu görülebilmektedir. Her üç mimari için tek çıkışlı bir Dense katmanı kullanılmıştır. Her 3 uygulama için oluşturulan mimaride eğitilebilir parametre sayısı Şekil 9'de gösterilmiştir. BiLSTM katmanında için tanh ve dense katmanı için ReLu aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.

Performans Metrikleri

Tahminleme yapılırken algoritma gerçek veri değerleri ile tahminleme sonucunda tespit ettiği değerler arasındaki sapmanın miktarını ve ne kadar olduğunu hesaplayan çeşitli metrikler bulunur. Bu çalışmada önerilen modellerin performansını değerlendirmek için, ortalama mutlak hata (mean absolute error - MAE), kök ortalama kare hatası (root mean square error - RMSE) ve determinasyon katsayısı (the coefficient of determination, R^2) olmak üzere üç gösterge kullanılmıştır. MAE ve RMSE, tahmindeki pozitif ve negatif hataların karşılıklı olarak karşılaştırılmasından kaçınarak, sırasıyla tahmin edilen değerlerin gerçek değere yakınlığını ve tutarsızlığını değerlendirir [24]. R^2 , bağımlı değişkendeki değişikliklerin ne kadarının bağımsız değişkenlerdeki değişikliklerden kaynaklandığını gösterir. R^2 değeri [0 1]



Şekil 8. BiLSTM Ünitesi

aralığında yer alır ve değerinin 1'e yakınsaması, modelin doğruluğunun artması anlamına gelmektedir.

Aşağıda sırasıyla RMSE, MAE ve R^2 metriklerine ilişkin denklemler verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i)^2} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_i^*| \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{ve} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

Denklemlerde yer alan x_i , x_i^* , \bar{x} ve n ifadeleri sırasıyla gerçek değeri, tahmin edilen değeri, ortalama değeri ve örneklem büyüklüğünü ifade eder.

Bulgular

Bu makale çalışmasında, Diyarbakır il merkezinde yer alan bir alışveriş merkezinin toplam 2027 günlük (5 yıl, 6 ay, 19 gün) aktif tüketim verileri kullanılarak, makine öğrenmesi yöntemleri ile enerji tüketim değişiminin tahmini amaçlanmıştır. Enerji aktif tüketiminin tahmini için 1D-CNN, RNN, LSTM ve BiLSTM olmak üzere dört farklı derin ağ modeli geliştirilmiştir. Söz konusu geliştirilen modellerin özellikle tekrarlayan sinir ağları yapısındaki modeller aynı ölçütlerde eğitime tabi tutularak, birbirleri arasındaki performans değerleri karşılaştırılmıştır. Modellerin derlenmesinde kullanılan parametreler; kayıp (loss) fonksiyonu olarak ortalama karesel hata (mean squared error

- MSE), optimizasyon algoritması olarak Adam, her bir iterasyonda dikkate alınan örnek sayısı (batch_size) 32 ve eğitim için tam bir tur sayısı (epochs) olarak 50 alınmıştır. Tüm uygulamalar 10 kez tekrar edilerek en yüksek performansa sahip olanlar tespit edilmiştir. Buna göre başarı performansı olan RMSE, MAE ve R^2 ölçütlerine göre elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

a) *1D-CNN Uygulaması için Bulgular:* Öncelikle 1D-CNN modeli için belirlenen mimari ile elde edilen en yüksek başarı performansı Tablo 3'de gösterilmiştir.

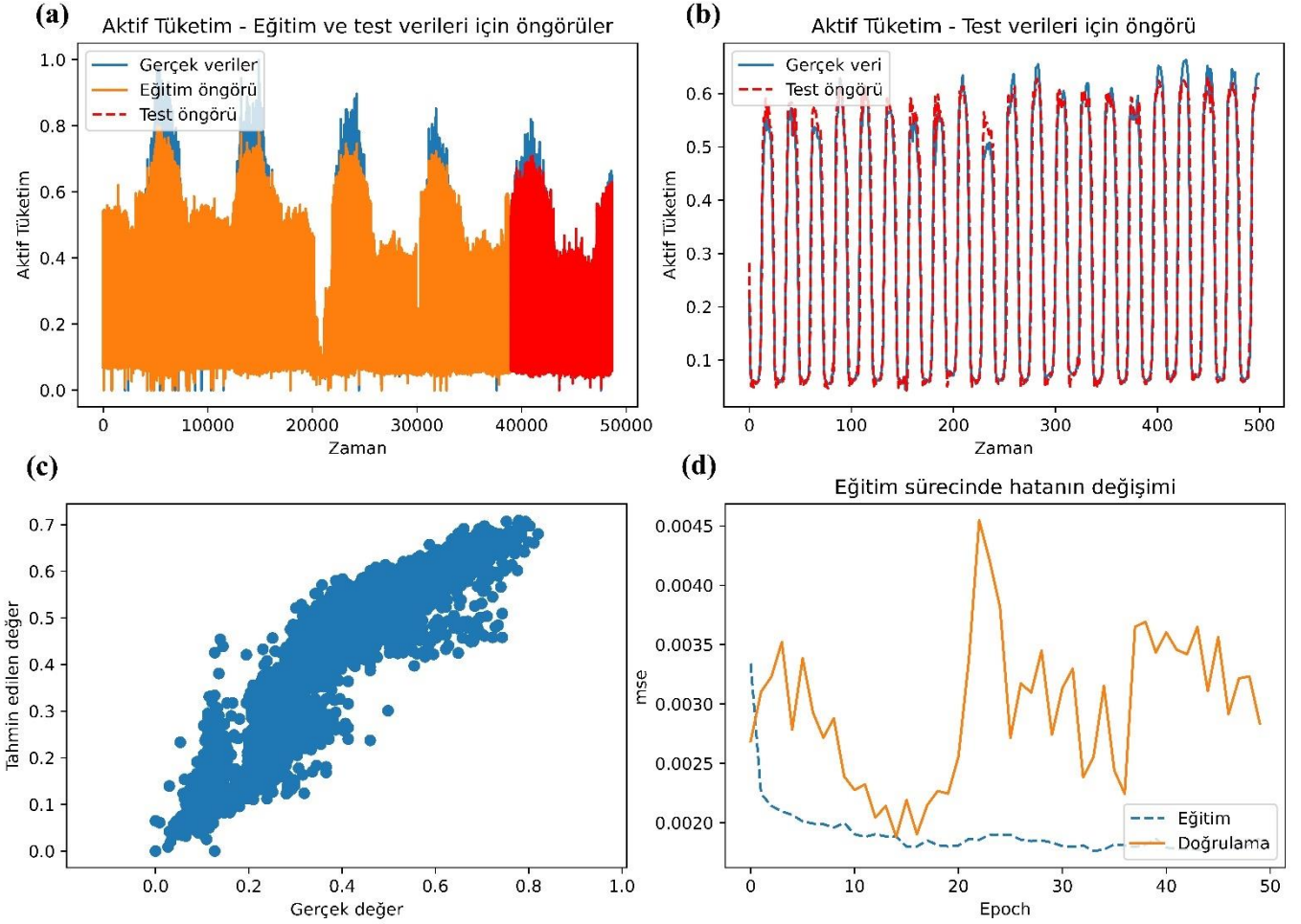
Tablo 3'de sonuçları verilmiş olan mimarinin eğitim süreci ile elde edilen tahmin ve gerçek değer ilişkileri şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10(a)'da hem ölçülen ve hem de eğitim ile birlikte test verileri için elde edilen tüm öngörü değişimleri gösterilmiştir. Elde edilen sonucun daha iyi görülebilmesi için Şekil 10(b)'de test verisinin son 500 örneğine ilişkin elde edilen tahmin grafiği gösterilmiştir. Test tahmin değerleri ve gerçek değerlerin arasındaki ilişkiyi belirlemek için serpilme diyagramından (scatter plot) yararlanılmış ve elde edilen değişim şekil 10(c)'de gösterilmiştir. Şekil 10 (d)'de ise eğitim sürecinde iterasyon ile ortalama karesel hatanın değişimi gösterilmiştir.

b) *RNN Uygulaması için Bulgular:* Uygulamada ünite-düğüm sayısı =50, 100 ve 500 için elde edilen en yüksek başarı performansları Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4'de sonuçları verilmiş olan mimarilere ilişkin başarımların birbirine yakın olduğu ancak en iyi performansın ünite-düğüm sayısı 50 olan mimaride elde edildiği görülmektedir. Daha iyi başarımlar sergileyen mimarinin eğitim süreci ile elde edilen tahmin ve gerçek değer ilişkileri şekil 11'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Önerilen 1D-CNN modeli için elde edilen en iyi performans

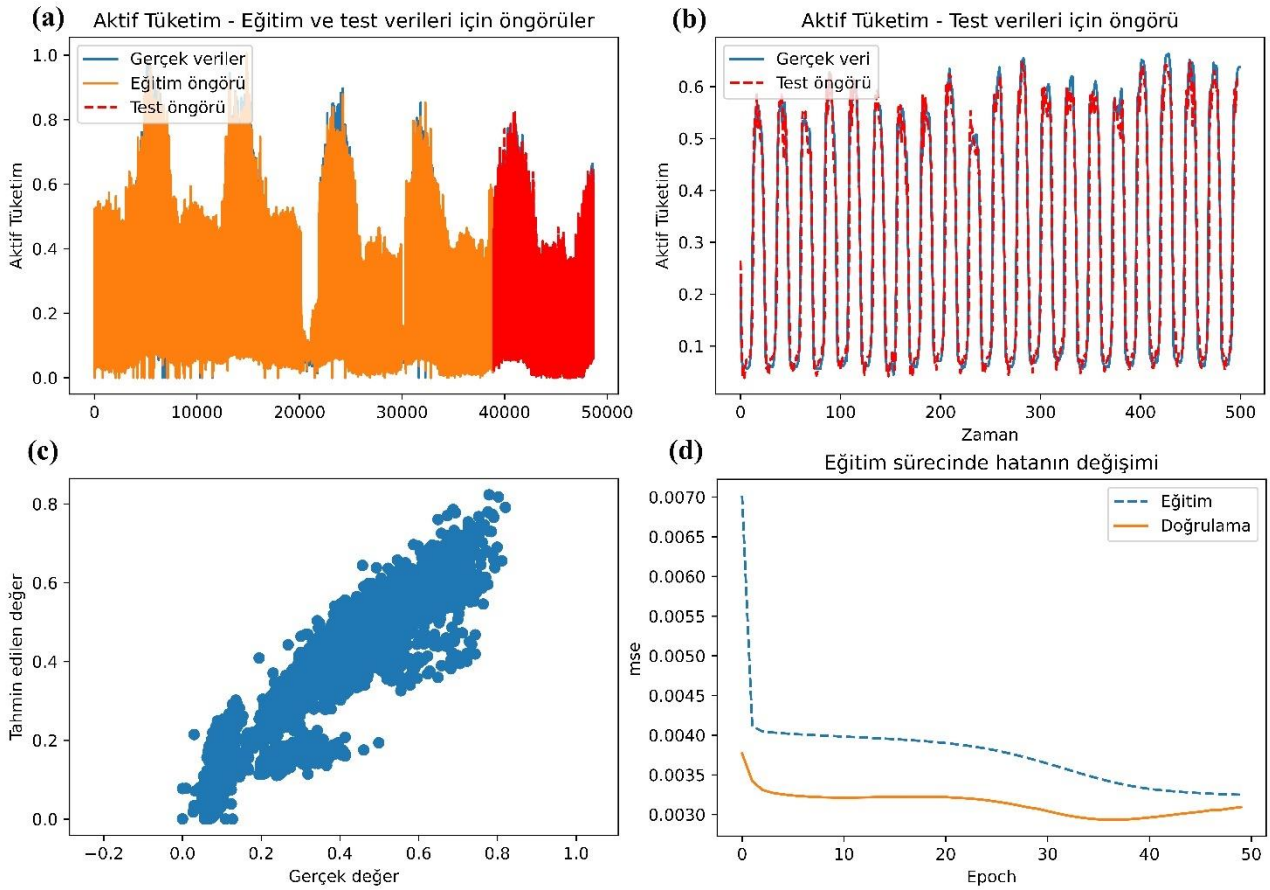
1D-CNN Ağ Mimarisi	Mimari	RMSE		MAE		R^2	
		Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
	2 Conv katmanı, Flaten ve Dense katmanı	0.0672	0.0529	0.0418	0.0364	0.9064	0.9287



Şekil 10. Enerji tüketim tahmini için saatlik çözünürlükte 1D-CNN modelinin tahmin grafikleri: (a) Ölçülen aktif tüketim ve model ile elde edilen tahmini değerler, (b) Test verisinin son 500 örneğine ilişkin ölçülen aktif tüketim değerleri ve elde edilen tahmini değerler, (c) test veri setinde tahmin ve gerçek değer arasındaki ilişkiyi gösteren serpilme (scatter plot) diyagramı, (d) Eğitim sürecinde elde edilen epoch-mse değişimi.

Tablo 4. Önerilen RNN modelinde ünite-düğüm sayısı 50, 100 ve 500 için elde edilen en iyi performanslar

RNN Ağ Mimarisi	Ünite-düğüm sayısı	RMSE		MAE		R^2	
		Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
	50	0.0631	0.0520	0.0387	0.0351	0.9176	0.9311
	100	0.0610	0.0525	0.0383	0.0358	0.9228	0.9296
	500	0.0633	0.0554	0.0388	0.0361	0.9170	0.9217



Şekil 11. Enerji tüketim tahmininde RNN modelinin ünite-düğüm sayısı 50 olan mimarisi için tahmin grafikleri: (a) Eğitim ve test verileri için öngörüler, (b) Test verisinin son 500 örneğinin tahmin grafiği, (c) test tahmin ve gerçek verisinin serpilme (scatter plot) diyagramı, (d) Eğitim sürecinde iterasyon ile ortalama karesel hatanın değişimi.

Tablo 5. Önerilen LSTM modelinde ünite-düğüm sayısı 50, 100 ve 500 için elde edilen en iyi performanslar

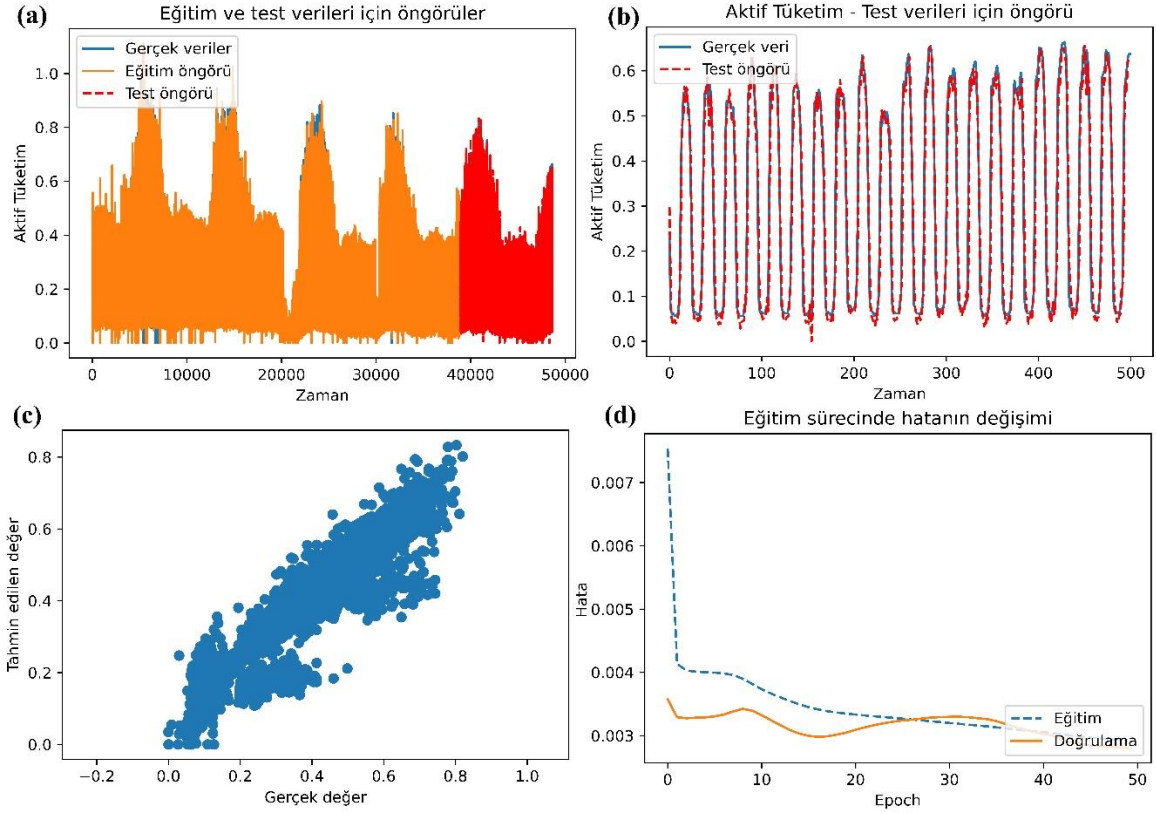
LSTM Ağ Mimarisi	Ünite-düğüm sayısı	RMSE		MAE		R^2	
		Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
	50	0.061	0.052	0.044	0.03	0.9252	0.9324
	100	0.058	0.047	0.031	0.029	0.9283	0.9334
	500	0.060	0.054	0.034	0.032	0.9192	0.9326

c) *LSTM Uygulaması için Bulgular:* Uygulamada ünite-düğüm sayısı 50, 100 ve 500 için elde edilen en yüksek başarımlar Tablo 5’de gösterilmiştir.

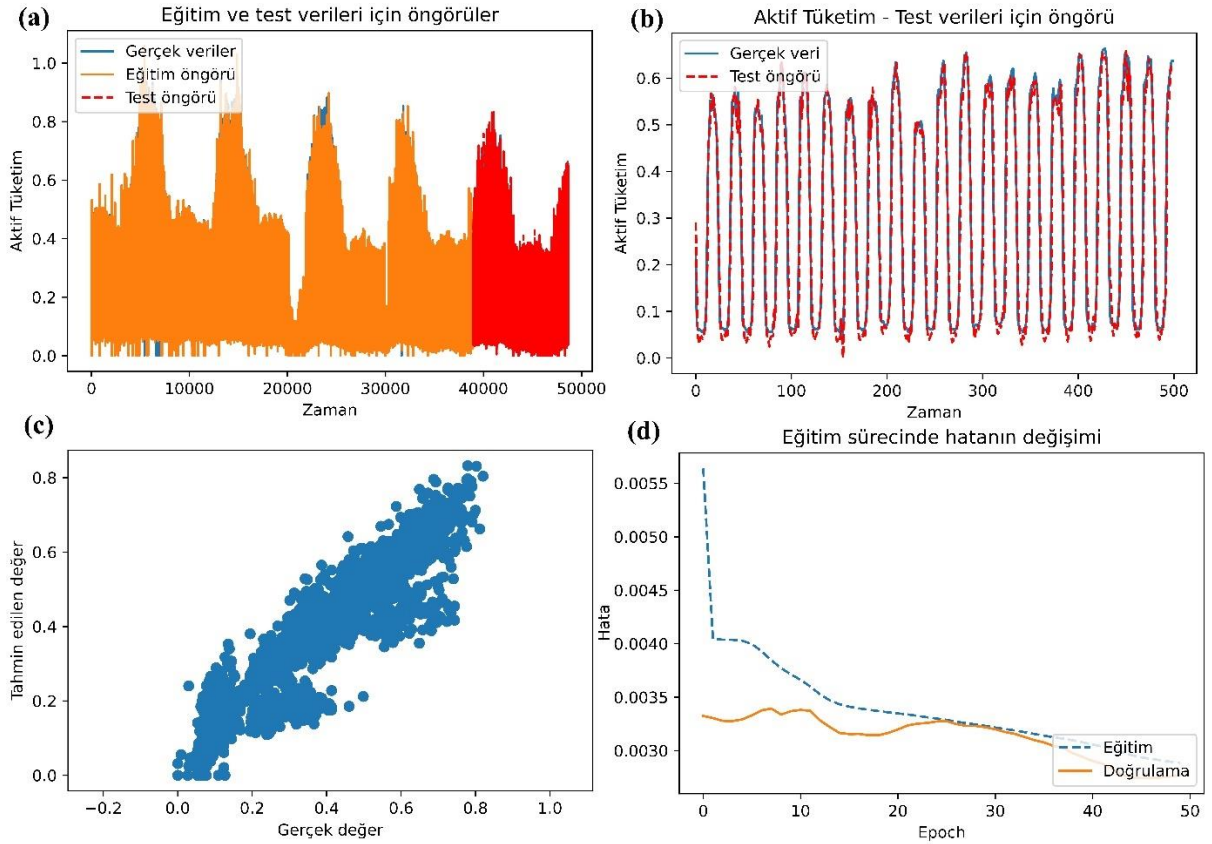
Tablo 5’de sonuçları verilmiş olan mimarilere ilişkin başarımların bir önceki uygulamada olduğu gibi birbirine yakın olduğu ve en iyi performansın ünite-düğüm sayısı 100 olan mimaride elde edildiği görülmektedir. Daha iyi başarımlar sergileyen mimarinin eğitim süreci ile elde edilen tahmin ve gerçek değer ilişkileri şekil 12’de gösterilmiştir.

d) *BiLSTM Uygulaması için Bulgular:* Uygulamada yine ünite-düğüm sayısı=50, 100 ve 500 için denenmiş ve elde edilen en yüksek başarımlar Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6’da sonuçları verilmiş olan mimarilere ilişkin başarımların bir önceki uygulamada olduğu gibi birbirine yakın olduğu ve en iyi performansın yine ünite-düğüm sayısı 100 olan mimaride elde edildiği görülmektedir. Daha iyi başarımlar sergileyen mimarinin eğitim süreci ile elde edilen tahmin ve gerçek değer ilişkileri şekil 13’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Enerji tüketim tahmininde LSTM modelinin ünite-düğüm sayısı 100 olan mimarisi için tahmin grafikleri: (a) Eğitim ve test verileri için öngörüler, (b) Test verisinin son 500 örneğinin tahmin grafiği, (c) test tahmin ve gerçek verisinin serpilme (scatter plot) grafiği, (d) Eğitim sürecinde iterasyon ile ortalama karesel hatanın değişimi.



Şekil 13. Enerji tüketim tahmininde BiLSTM modelinin ünite-düğüm sayısı 100 olan mimarisi için tahmin grafikleri: (a) Eğitim ve test verileri için öngörüler, (b) Test verisinin son 500 örneğinin tahmin grafiği, (c) test tahmin ve gerçek verisinin serpilme (scatter plot) diyagramı, (d) Eğitim sürecinde iterasyon ile ortalama karesel hatanın değişimi.

Tablo 6. Önerilen BiLSTM modelinde ünite-düğüm sayısı 50, 100 ve 500 için elde edilen en iyi performanslar.

BiLSTM Ağ Mimarisi	Ünite-düğüm sayısı	RMSE		MAE		R^2	
		Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
	50	0.0608	0.0520	0.0366	0.0354	0.9234	0.9310
	100	0.0588	0.0500	0.0327	0.0317	0.9285	0.9363
	500	0.0588	0.0507	0.0340	0.0345	0.9283	0.9345

Tartışma

Literatüre bakıldığında, çalışmaların daha çok kısa vade üzerinden gerçekleştirildiği diğer bir değişle, saat bazında geçmiş veriler üzerinden güç tüketiminin tahmini yapıldığı görülebilmektedir. Bu makalede yapılan çalışmanın kısa vade açısından özellikle [9, 11-12] nolu çalışmalarla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Diğer bir benzerlik ise yöntem açısından derin öğrenme tabanlı (farklı mimarilere sahip) modellerin en iyi performansı sergilemeleridir.

Sonuçlar

Bu makale çalışmasında, Diyarbakır il merkezinde yer alan bir alışveriş merkezinin toplam 2027 günlük (5 yıl, 6 ay, 19 gün) aktif tüketim verileri kullanılarak, makine öğrenmesi yöntemleri ile enerji tüketim değişiminin tahmini amaçlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan aktif tüketim miktarı saatlik ölçülerek $2027 \times 24 = 48648$ boyutunda veri seti, Dicle Elektrik Dağıtım A.Ş. kurumundan temin edilmiştir. Enerji aktif tüketiminin tahmini için 1D-CNN, RNN, LSTM ve BiLSTM olmak üzere dört farklı derin ağ modeli geliştirilmiştir. CNN modelinde iki evrişim katman kullanırken, diğer tekrarlayan sinir ağları için ünite-düğüm sayısı sırasıyla 50, 100 ve 500 alınmıştır. Tüm uygulamalar 10 kez tekrar edilmiş ve RMSE, MAE ve R^2 ölçütlerine göre en yüksek performansa sahip olan başarımlar kayda alınmıştır.

Elde edilen bulgulara göre yapılabilecek çıkarımlar aşağıda listelenmiştir.

- Önerilen mimarilere göre 1D-CNN'in tekrarlayan sinir ağlara göre daha düşük bir performans sergilediği görülmüştür. Önerilen 1D-CNN modeline ilişkin performansın beklenen seviyenin altında kaldığı ancak çeşitli güncellemeler ile performansın artırılacağı düşünülmektedir. Bu güncellemeler çeşitli stratejiler içerir ki bunlar; mimari tasarımında ayarlamalar (model derinliğinin artırılması, filtre boyutlarının ayarlanması ve artık bağlantıların kullanımı), düzenleme teknikleri (dropout tekniği, Batch Normalizasyon işlemi, zamanla öğrenme katsayısının düşürülmesi, vs.) ve veri ön işlemdir. Söz konusu güncellemeler ile başarımın artırılacağı düşünülmektedir.
- Farklı mimarilerin önerildiği çalışmada, test veri setine göre determinasyon katsayısı dikkate alındığında Tekrarlayan sinir ağlarının başarımlar performans aralığının [%92.17, %93.63] bant aralığında olduğu ve önerilen modeller ile belirli düzeyde başarımın elde edildiği gözlemlenmiştir.

- Tekrarlayan sinir ağlarında başarımların birbirine yakın performans sergiledikleri ve bunların içinde en iyi performansı ünite-düğüm sayısı 100 olan BiLSTM modeli ile elde edildiği görülmüştür.

Literatür çalışmasında, elektrik tüketiminin tahmini için kısa, orta ve uzun vadeli olarak yapıldığı görülmekte olup, yapı olarak benzer yöntemlerin (CNN, RNN, LSTM, BiLSTM, GRU) izlendiği görülmektedir. Bu çalışmada da orta vadede elde edilen geçmiş veriden yola çıkılarak enerji tüketiminin tahmini gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen modeller geliştirilerek, farklı sektörlerle ilişkin enerji tüketim verilerine uygulanması, gelecek çalışmalar kapsamında değerlendirilmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Yazar makaleyi tasarladı, literatür taraması yaptı ve analizler yaptı, sonuçları tartıştı ve makaleyi yazdı.

Teşekkür

Bu tez çalışmasında Dicle elektrik dağıtım şirketinden (DEDAŞ) veriler alınmıştır. Dağıtım şirketine verilerin kullanımı için izin verdiğinden dolayı teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Berriel, R. F., Lopes, A. T., Rodrigues, A.O, Varejao, F. M. and Oliveira-Santos, T. (2017). *Monthly energy consumption forecast: a deep learning approach* [Bildiri sunumu] IEEE, Brazil.
- [2] Kaysal, K., Akarlan, E. ve Hocaoglu, F. O. (2022). Türkiye kısa dönem elektrik yük talep tahmininde makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırılması. *Bseu Journal Of Science*, 9(2), 693-702. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1004827>
- [3] Bedi, J. ve Toshniwal, D. (2019). Deep learning framework to forecast electricity demand. *Applied Energy*, 238, 1312-1326. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.113>
- [4] Solyali, D. (2020). A comparative analysis of machine learning approaches for short-/long-term electricity load forecasting in cyprus. *Sustainability*, 3612(12), 2-34. [doi:10.3390/su12093612](https://doi.org/10.3390/su12093612)

- [5] Gezmez, K. Ç. (2022). *Bir ilin elektrik tüketim verilerinin makine öğrenmesi yöntemleri ile analizi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Başkent Üniversitesi.
- [6] Bouktif, S.; Fiaz, A.; Ouni, A.; Serhani, M.A. Optimal deep learning lstm model for electric load forecasting using feature selection and genetic algorithm: Comparison with machine learning approaches. *Energies* **2018**, *11*, 1636. [CrossRef]
- [7] Yurdođlu, H. (2023). *Bir tekstil fabrikasının elektrik tüketim değerlerinin derin öğrenme ile tahminlenmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Pamukkale Üniversitesi
- [8] Kiprijanovska, İ., Stankoski, S., Ilievski, İ. ve Jovanovski, S. (2020). Houseec: day-ahead household electrical energy consumption forecasting using deep learning. *Energies*, *13*(2672), 2-29. [10.3390/en13102672](https://doi.org/10.3390/en13102672)
- [9] Kell, A. J., MCGOUGH, A. S. ve FORSHAW, M. (2021). The impact of online machine-learning methods on long-term investment decisions and generator utilization in electricity markets. *Sustainable Computing: Informatics And Systems*, *30*,1-12. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100532>
- [10] Kollia, İ. ve KOLLIAS, S. (2018, May). *A deep learning approach for load demand forecasting of power systems*. IEEE, Çeşme/İzmir
- [11] Tulensalo, J., Seppänen, J. ve Ilin, A. (2020). An lstm model for power grid loss prediction. *Electric Power Systems Research*, *189*,1-4. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106823>
- [12] Ibrahim, B., Rabelo, L., Gutierrez-Franco, E. ve Clavijo-Buritica, N. (2022). Machine learning for short-term load forecasting in smart grids. *Energies*, *8079*(15), 2-19. <https://doi.org/10.3390/en15218079>
- [13] Torres, J. F., Lvarez, F. M. ve Troncoso, A. (2022). A deep lstm network for the spanish electricity consumption forecasting. *Neural Computing And Applications*, *34*, 10533–10545. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06773-2>
- [14] Kuşkan, E., Çodur, M. K. ve Çodur, M. Y. (2022). Türkiye'deki demiryolu enerji tüketiminin yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi. *Konya Journal Of Engineering Sciences*, *10*(1), 72-84. [10.36306/konjes.935621](https://doi.org/10.36306/konjes.935621)
- [15] X. Wan, H. Song, L. Luo, Z. Li, G. Sheng, and X. Jiang, "Pattern recognition of partial discharge image based on one-dimensional convolutional neural network," In 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2018, pp. 1-4.
- [16] M. Tosun, F. ŞENTÜRK, (2023). Kasislerin Yakıt Tüketimine Etkisinin RNN, LSTM, GRU Tekrarlayan Derin Öğrenme Algoritmaları ile Tespiti. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, *6*(1), 12-23. <https://doi.org/10.38016/jista.1141359>
- [17] Fu, Y., Lou, F., Meng, F., Tian, Z., Zhang, H., Jiang, F., 2018. "An Intelligent Network Attack Detection Method Based on RNN". 2018 IEEE Third International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC), 483–489. <https://doi.org/10.1109/DSC.2018.00078>
- [18] P. Bahad, P. Saxena, and R. Kamal, "Fake news detection using bi-directional LSTM-recurrent neural network," *Procedia Computer Science*, vol. 165, pp. 74-82, 2019.
- [19] S. Patil, V. M. Mudaliar, P. Kamat, S. Gite, "LSTM based Ensemble Network to enhance the learning of long-term dependencies in chatbot," *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, vol. 11, no. 25, 2020.
- [20] Olah, C. (2015). Understanding lstm networks. <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs>.
- [21] S. Zhang, D. Zheng, X. Hu ve M. Yang, Bidirectional long short-term memory networks for relation classification, In *Proceedings of the 29th Pacific Asia conference on language, information and computation*, 73-78, 2015.
- [22] Ekinci, E., İlhan Omurca, S., Özbay, B. Comparative assessment of modeling deep learning networks for modeling ground-level ozone concentrations of pandemic lock-down period, *Ecological Modelling*, 2021, 457, pp. 109676.
- [23] Graves, A., Schmidhuber, J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures, *Neural Networks*, 2005, *18*(5-6), pp. 602-610.
- [24] Karaman, Ö. A., & Bektaş, Y. (2023). Makine Öğrenmesi ve Optimizasyon Yöntemleri ile Uzun Dönem Elektrik Enerjisi Tahmini: Türkiye Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, *5*(2), 285-292. <https://doi.org/10.46387/bjesr.1306577>



Transfer Öğrenme Yaklaşımı Kullanılarak İzolatör Kusurlarının Tespiti

Detection of Insulator Defects Using Transfer Learning Approach

Muhammed Buğracan Özküçük^{1*}, Ömer Faruk Alçin², Muhsin Tunay Gençoğlu³

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, bugracan.ozkucuk@ozal.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1466-2502

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, omer.alcin@inonu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-2917-3736

³Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, mtgencoglu@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1774-1986

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ocak 2024
Revizyon 19 Mart 2024
Kabul 1 Nisan 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

*Izolator kusuru,
Transfer Öğrenme,
Çoklu Öğrenme,
ESA.*

ÖZ

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı, modern toplumların işleyişinde hayati bir rol oynamaktadır. Bu enerjinin güvenli ve kesintisiz bir şekilde taşınması, elektrik sistemlerinin sağlıklı bir şekilde çalışmasıyla mümkün olmaktadır. Ancak, elektrik iletim hatlarındaki kusurlar, sistemde arızalara ve enerji kesintilerine neden olabilmektedir. İzolatör kusurları, elektrik hatlarındaki en yaygın arızalar arasında yer almaktadır. Bu kusurlar, genellikle izolatör yüzeyindeki çatlaklar, kırıklar, erozyon veya kimyasal bozulmalar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknikleri, izolatör kusurlarının belirlenmesi için alternatif bir çözüm sunmuştur. Bu alanda transfer öğrenme, özellikle dikkat çeken bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Bu yaklaşım, izolatör kusurlarının tespitinde kullanılan verilerden öğrenilen bilgilerin, yeni bir izolatördeki kusurların belirlenmesinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada izolatör görüntülerinden transfer öğrenme yaklaşımı kullanılarak izolatör türü ve sağlamlık durumu (normal/kusurlu) tespiti yapılmıştır. Bu problemlerin verimli çözümü için Çoklu Öğrenme yaklaşımı dikkate alınmıştır. Bu durumlar literatürde yaygın olarak kullanılan çok sınıflı görüntü veri setlerinde iyi başarımlar gösteren AlexNet, ResNet50 ve GoogLeNet gibi mimariyelere giriş olarak uygulanmıştır. İzolatörün sağlamlık durumunun tespitinde en iyi doğruluk oranına % 97.674 ile AlexNet ve ResNe50 mimarilerinde ulaşılmıştır. İzolatör türünün belirlenmesinde en iyi doğruluk oranına % 90.698 ile ResNe50 mimarisinde ulaşılmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 January 2024
Received in revised form 19 March 2024
Accepted 1 April 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

*Insulator Defect,
Transfer Learning,
Multi Learning,
CNN.*

Doi: 10.24012/dumf.1415322

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The transmission and distribution of electrical energy play a vital role in the functioning of modern societies. The safe and uninterrupted transportation of this energy is made possible by the healthy operation of electrical systems. However, defects in electricity transmission lines can cause malfunctions in the system and even power outages. Insulator defects are among the most common defects in power lines. These defects usually occur in the form of cracks, fractures, erosion, or chemical distortions on the insulator surface. In recent years, artificial intelligence and machine learning techniques have provided an alternative solution for the determination of insulator defects. Transfer learning comes to the fore in this field as an approach that attracts particular attention. This approach allows the information learned from the data used in the detection of insulator defects to be used in the determination of defects in a new insulator. In this study, the type of insulator and the state of robustness (normal or defective) were determined using the transfer learning approach from the insulator images. A Multiple Learning approach has been taken into account for the efficient solution of these problems. These cases have been applied as an introduction to architectures such as AlexNet, ResNet50, and GoogLeNet, which show good performance in multi-class image datasets widely used in the literature. The best accuracy rate in determining the stability status of the insulator was reached in the AlexNet and ResNe50 architectures with 97.674%. The best accuracy rate in determining the insulator type was reached in ResNe50 architecture with 90.698%.

Giriş

İzolatörler, elektrik dağıtım ve iletim hatlarında iletkenleri direklerle mekaniksel olarak sabitleyen ve elektriksel olarak izole eden temel ekipmanlardır [1]. İzolatör arızası, enerji nakil hatlarının sürekliliği ve güvenliği için doğrudan bir tehdittir. İstatistiksel olarak, izolatör kusurlarından kaynaklanan kazalar, güç sistemi arızalarının en yüksek oranını oluşturmaktadır. Güç kaynağındaki uygunluk, enerji şirketlerinin dağıtım şebekelerinde uyguladıkları önleyici ve düzeltici bakım hizmetlerinin kalitesi ile yakından ilişkilidir. Bu faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için ilk olarak, arızalı elemanlar (kırık, çatlamış, deforme olmuş, kirlenmiş veya buzlanmış), kötü yerleştirilmiş, eksik veya kayıtlı olmayan bileşenler, sızıntı akımları vb. elektrik hatlarında bulunan uygunsuzluklar aranmaktadır. İzolatörlerdeki arızaların tespiti, bu tür sistemlerin kararsızlığına bağlı elektrik kesintilerini ve ekonomik kayıpları azaltabilir. Ayrıca, bu hatların kentsel yerleşimleri içerdiği göz önüne alındığında, izolatörlerin olası arızalarının tespit edilmesi sadece elektrik kesintilerini önlemek için değil, aynı zamanda bu tür yüksek yoğunluklu alanlarda kamu tehlikesi nedenlerinden dolayı da büyük önem taşımaktadır [2, 3]. Bu nedenle, izolatör kusurlarının yapay zekâ yöntemleri ile zamanında tespit edilmesi önemlidir.

Son yıllarda güç ekipmanlarının denetiminde helikopter ve insansız hava aracı (İHA) gibi hava platformları kullanıma sunulmuş, yüksek verimlilik, doğruluk ve güvenlik gösterdiğinden bu elemanlar önemli bir araç haline gelmişlerdir. Platforma monte edilen bir kamera, izolatör bilgilerini içeren birçok görüntü elde edebilmekte ve izolatör kusurlarının incelenmesi, bu tür hava görüntülerine dayalı olarak gerçekleştirilmektedir [4].

Karmaşık hava görüntülerinde birden fazla izolatörü farklı açılarda konumlandırmak için OAD-BSPK (Oryantasyon açısı algılama ve ikili şekil ön bilgisi) kullanılan birçok çalışma izolatör lokalizasyonuna odaklanmıştır [5]. Bununla birlikte, izolatör şekli hakkında önceden bilgi sahibi olunması gerektiğinden bu yöntem kısıtlayıcıdır ve yalnızca belirli senaryolar altında (örneğin dokusuz arka planlar), gökyüzüne bakan bir kamera ile çalışabilir. Bu nedenle, son derece karmaşık arka planlar için iyi çalışmaz. Park ve ark. [6], izolatörleri tespit etmek için çoklu kamera sensör sistemi kullanmıştır. Yaklaşımları, yalnızca izolatörleri güçlü bir kontrast yoluyla tespit edebilmekte ve uygulanabilirliğini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Sağlam olmayan yöntemin aksine, Li ve ark. [7] hava görüntülerinde yerel özelliklere ve uzaysal düzene dayalı bir izolatör algılama algoritması önermiştir. Hava görüntülerinde izolatörlerin oranı genellikle çok küçük olduğundan, kusur tespitinde gerekli olmayan ve mümkün olmayan yerleştirme için özel olarak tasarlanmıştır. Mussina ve ark. [8] İHA kullanılarak izolatörlerin potansiyel gerçek zamanlı izlenmesi için yeni bir Füzyon Evrişim Ağı (FCN) önermiştir. FCN, Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) ve Çok Katmanlı Sinir Ağı (MNN) alt sınıflandırıcısından oluşmaktadır. Önerilen FCN'nin performansını karşılaştırmak ve kıyaslamak için, Dalgacık

Dönüşümü ve Temel Bileşenler Analizi (PCA) yöntemleri kullanılarak çıkarılan özneliklerin birleştirilmesinde geleneksel sınıflandırma algoritmaları da uygulanmaktadır. Gao ve ark. [9], DVM (Destek Vektör Makinesi) ve WMRA (Dalgacık Çoklu Çözünürlük Analizi)'yi birlikte kullanarak izolatörler için bir durum analiz sistemi önermiştir. DVM sınıflandırıcısı kusur kategorisi bilgilerini sağlayabilmesine rağmen, kusur konumu elde edememiştir. Liu ve ark. [10], RPN'ye (Bölge Öneri Ağı) dayalı bir ESA'nın basamaklı mimarisini kullanmışlar, VGG ve ResNet'i birleştirmişlerdir. Yöntem yeterince hızlı olmadığından gerçek zamanlı incelemede istenmeyen bir durum oluşmaktadır. Hao ve ark. [11], izolatörlerde buzlanma üzerine yapılan çalışmalarda buz türünün önemli bir parametre olduğu düşünülerek kar, kırağı, karışık kırağı, sır ve normal buz türlerini tanımak için zayıf denetimli ve aşamalı transfer öğrenme yöntemi üzerinde durulmuştur. Çalışmanın sadece buz türlerinin morfolojik benzerliklerine odaklanması atlama durumunun tespiti için yetersiz kalmıştır.

Bu çalışmada izolatör kusurlarını tespit etmek için transfer öğrenme tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Ayrıca çok görevli öğrenme yaklaşımı ile izolatör kusurlarının yanısıra izolatör çeşitleri de tespit edilmeye çalışılmıştır. Böylece eğitilen bir model ile iki sınıflandırma problemi çözülmüştür.

Materyal Metot

Evrişimli Sinir Ağı (ESA)

ESA, bir dizi evrişimli katmandan oluşan ve kendine giriş olarak tanımlanan görüntüleri işleyen bir derin sinir ağı yöntemidir. ESA içerisindeki katmanlar sırasıyla; giriş olarak verilen resmin özelliğini algılar, doğrusal olmayanları belirler, parametrelerin hesaplanma sayısını azaltıp uygunluğunu kontrol eder ve son olarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirir [12]. Bu durum Şekil 1' deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 1. ESA katmanlarının işleyişi

Evrişimsel katmanların ana görevi, önceki katmanlardan gelen özelliklerin lokal bağlantılarını belirleyip bilgilerini eşleştirmektir. A girişinin X filtresiyle ($X \in \mathbb{R}^{2a_1+2a_2}$) konvolüsyonu aşağıdaki gibi verilmiştir [13].

$$(A * X)_{c,d} = \sum_{k=-a_1}^{a_1} \sum_{l=-a_2}^{a_2} 2X_{k,l} A_{c-k,d-l} \quad (1)$$

Softmax fonksiyonu ESA yapısında, önceki katmanın ham değerlerini tahmin edilen sınıf puanlarına olasılık dağılımıyla eşleştirerek kullanılan yaygın bir fonksiyondur.

$$\gamma(\theta_j) = \frac{e^{\theta_j}}{\sum_{j=1}^N e^{\theta_j}}, \quad j = 1, \dots, N \quad (2)$$

Burada ; $\gamma(\theta_i)$ her bir θ_i softmax çıktısını , θ_i ve θ_j ise girdi vektörünün değerlerini temsil eder.

Yığın normalleştirme katmanı, ESA yapısının eğitim süresini ve ağ başlatma duyarlılığını azaltmak için kullanılan katmandır. Girişi normalleştirilmiş etkenler (θ_i), minimum yığın ortalama (z_q) minimum yığın varyansı (y_q) aşağıdaki gibi hesaplanır :

$$\theta_i' = \frac{\theta_i - z_q}{\sqrt{y_q^2 + C}} \quad (3)$$

Burada C sabittir ve y_q 'nin çok küçük olması sayısal durumu düzenler. z_q ve y_q aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$z_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (4)$$

$$y_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - z_q)^2 \quad (5)$$

Yığın normalleştirme katmanındaki etkileşimler, kaydırma ve ölçekleme işlemi ile aşağıdaki gibi sonuçlandırılır.

$$\mu_i = v\theta_i' + t \quad (6)$$

Burada v, t sırasıyla denge ve ölçek faktörleridir. Bu faktörler, eğitim sürecinde güncellenen en uygun değerlerdir.

ESA birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar şunlardır [14]:

- Ham görüntülerden herhangi bir işlem gerektirmeden ayıklama özelliğine sahiptir.
- Şekil bozulmalarına karşı direnç sağlar.
- Veri boyutunu azaltır.
- Tek bir ağ yapısında sınıflandırma işlemi gerçekleştirir.

ESA daha çok yüz tanıma uygulamalarında kullanılmış olsa da COVID-19 hastalığının teşhisinde radyolojik görüntüler için kullanılarak oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir [15,16].

Transfer Öğrenme

Makine öğrenimi ve veri madenciliği teknikleri Dünya üzerinde birçok uygulamada kullanılmıştır. Geleneksel makine öğrenimi metodolojilerinin bir varsayımı, eğitim verilerinin ve test verilerinin aynı alandan alınmasıdır. Böylece girdi özellik alanı ve veri dağıtım özellikleri aynı

olur. Ancak, bazı uygulamalarda makine öğreniminin bu varsayımı geçerli değildir [17]. Bu nedenle, farklı alanlardan daha kolay elde edilen verilerle eğitilmiş yüksek performanslı öğretiler oluşturmaya ihtiyaç vardır. Bu metodolojiye transfer öğrenme denilmektedir. Transfer öğrenme, farklı fakat ilgili kaynak alanlarında bulunan bilgileri transfer ederek hedef öğretilerin hedef alanlardaki performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bu şekilde, hedef öğretiler oluşturmak için çok sayıda hedef alan verisine bağımlılık azaltılabilmektedir.

Transfer öğrenme problemleri üç sınıfa ayrılabilir. Bunlar; transdüktif, endüktif ve denetimsiz transfer öğrenmedir. Bu üç sınıf, etiket belirleme açısından yorumlanabilir. Transdüktif transfer öğrenme, etiket bilgisinin yalnızca kaynak alanından geldiği durumları ifade eder. Hedef etki alanı örneklerinin etiket bilgileri mevcutsa endüktif transfer öğrenimi olarak kategorize edilebilir. Etiket bilgisi hem kaynak hem de hedef etki alanları için bilinmiyorsa, durum denetimsiz transfer öğrenmesi olarak bilinmektedir. Başka bir sınıflandırma, kaynak ve hedef özellik boşlukları ve etiket boşlukları arasındaki tutarlılığa dayanmaktadır [18].

$$\begin{cases} U^a = U^b \\ V^a = V^b \end{cases} \quad (7)$$

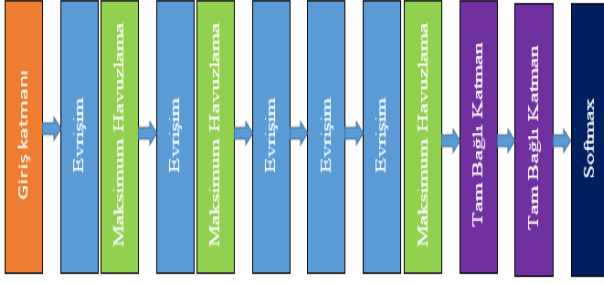
Denklemler 7'de; U özellik alanı, V etiket alanı, a kaynak etki alanı ve b hedef etki alanıdır. Buradaki eşitlik homojen transfer öğrenme olarak adlandırılır. Bu eşitliğin olmaması durumu ise heterojen transfer öğrenme olarak bilinmektedir.

AlexNet

Çeşitli ESA mimarileri arasında AlexNet, görüntü sınıflandırmada yaygın olarak kullanılan en verimli mimarilerden biridir. Alex Krizhevsky ve ark. tarafından sunulan mimari 1000 sınıftan oluşan yaklaşık 1,2 milyon görüntüyü ImageNet Large-Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) yarışmasında en doğru olarak sınıflandırmıştır [19].

Şekil 2'de de görüleceği üzere AlexNet 11 katmandan meydana gelmektedir. İlk iki katmanı evrişim, maksimum havuzlama, normalizasyon, 3. ve 4. katmanlar evrişim, 5. katman evrişim, maksimum havuzlama, 6. ve 7. katmanlar tam bağlı katman ve son katman sınıflandırma işlemi yapan softmax'dır [19].

Evrişim işlemi yapılırken ilk katmanda 11x11 boyutlu 96 filtre kullanılmaktadır. Ağda evrişim işlemi sonucu görüntü boyutu 55x55 olmaktadır. Modeldeki ilk havuzlama katmanında 3x3 boyutlu filtreler kullanılmaktadır. İşlem sonrası görüntü boyutu 27x27 olmaktadır.

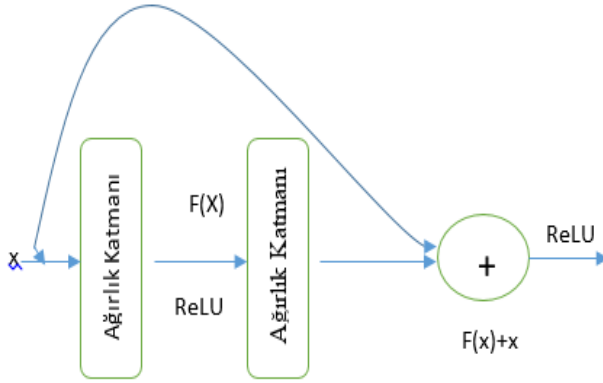


Şekil 2. AlexNet mimarisini

ResNet50

ResNet, He Kaiming ve ark. tarafından 2015 yılında ILSVRC yarışmasının kazananı olmuştur. ResNet, bir katmandan diğerine son tahmine ulaşmak için gereken delta'yı tahmin eder ve derin ağların eğitimi için etkili bir yöntemdir [20]. ResNet'te kullanılan kimlik eşlemesi, mevcut katman gerekli değilse modelin bir ESA ağırlık katmanını atlamasına izin verir. Bu durum eğitim setine, aşırı uyum sorununun önlenmesinde yardımcı olmaktadır. Aşırı uyum, eğitim doğruluğunun yüksek, test doğruluğunun ise düşük olması durumudur. Derinlik arttıkça ağın en iyi hale getirilmesi zorlaşmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla önerilen artık sinir ağı, bir ağ oluşturmak için artık blokları üst üste istifleyen bir tür yapay sinir ağıdır.

Şekil 3 artık bloğun bir temsilini göstermektedir. Burada a girişi, çıkışa doğrudan eklenir. Kısa yol veya atlama bağlantısı olarak bilinen bu durum $f(x) + x$ olarak verilmiştir.



Şekil 3. Artık blok

GoogleNet

GoogleNet 2014 yılında ILSVRC yarışmasının kazananı olmuştur. GoogleNet mimarisini, AlexNet gibi önceki son teknoloji mimarilerden çok farklıdır. 1×1 evrişim ve daha derin bir mimari oluşturmasını sağlayan küresel ortalama havuzlama gibi birçok farklı yöntem kullanmaktadır. GoogleNet başlangıç modüllerinden dolayı kompleks bir yapıdır. Başlangıç modülü, parametrelerin ölçeğini ve model karmaşıklığını sınırlandırmaya yardımcı olan küçük boyutlu birkaç evrilmiş çekirdekte oluşmaktadır. Buradaki

problem işlem karmaşıklığı, çıkış boyutunun oldukça büyük olması ve parametre sayısının paralel işlemlerden dolayı büyümesidir [21].

Karmaşıklık Matrisi

Sınıflandırma işlemlerinde gerçek veri ile öngörülen değerleri karşılaştırmak amacıyla karmaşıklık matrisinden yararlanılır.

Tablo 1. Karmaşıklık matrisini

		Öngörülen sınıflar		
		S ₁	S ₂	Toplam
Gerçek Sınıflar	S ₁	X	Y	X+Y
	S ₂	Z	T	Z+T
	Toplam	X+Z	Y+T	X+Y+Z+T

İki sınıflı bir model için Tablo 1'de belirtilen tanımlar kullanılmıştır. İki sınıflı bir modelde sınıflardan birinin S₁, diğerinin S₂ olduğu varsayılmaktadır. Uygulamanın türüne göre bu değerler pozitif-negatif, evet-hayır, başarılı-başarısız vb. olarak belirlenmektedir. Tablo 1'deki değerlerin açıklaması aşağıda belirtilmiştir.

X: Gerçek sınıfların S₁ sınıfı ile öngörülen S₁ sınıf değerinin eşit olma sayısını belirlemektedir. Bu değer S₁ sınıfı için başarılı öngörü sayısını ortaya koymaktadır.

Y: Gerçek sınıfların S₁ sınıfına karşılık öngörülen S₂ sayısını vermektedir. Bu değer S₂ sınıfı için başarısız öngörü sayısını belirlemektedir.

Z: Gerçek sınıfların S₂ sınıfına karşılık öngörülen S₁ sınıf değerinin sayısını vermektedir. Bu değer S₁ sınıfı için başarısız öngörü sayısını belirlemektedir.

T: Gerçek sınıfların S₂ sınıfı ile öngörülen S₂ sınıf değerinin eşit olma sayısını vermektedir. Bu değer S₂ sınıfı için başarılı öngörü sayısını ortaya koymaktadır.

Doğruluk Ölçütü – Hata Oranı

Karmaşıklık matrisini elde edildikten sonra sınıflandırma modelinin doğruluk değeri, gerçek değerlerin öngörülen değerle hangi oranda aynı olduğunu ortaya koymaktadır. Doğruluk ölçütü Denklem 8'deki gibi hesaplanmaktadır [22].

$$\text{Doğruluk} = \frac{X + T}{X + Y + Z + T} \quad (8)$$

Doğruluk değeri kullanılarak sınıflandırma modelinin hata oranına Denklem 9'daki gibi ulaşmak mümkündür.

$$\text{Hata oranı} = 1 - \text{Doğruluk} \quad (9)$$

Duyarlılık Ölçütü

Sınıflandırma modeline ilişkin karmaşıklık matrisinin birinci sıradaki sınıfı için öngörme başarısını elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Duyarlılık ölçütü Denklem 10'daki gibi hesaplanmaktadır [22].

$$\text{Duyarlılık} = \frac{X}{X + Y} \quad (10)$$

Denklem 10'dan elde edilen sonuç, normal sınıfının öngörülmesindeki başarıyı ortaya koymaktadır.

Özgüllük Ölçütü

Sınıflandırma modeline ilişkin karmaşıklık matrisinin ikinci sıradaki sınıfı için öngörme başarısını elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Özgüllük ölçütü Denklem 11'deki gibi hesaplanmaktadır [22].

$$\text{Özgüllük} = \frac{T}{T + Z} \quad (11)$$

Denklem 11'den elde edilen sonuç, kusurlu sınıfının öngörülmesindeki başarıyı ortaya koymaktadır.

Kesinlik Ölçütü

Karmaşıklık matrisinde birinci sütunda yer alan sınıfın tahmin başarısı o sınıfa ait tüm gözlemler içindeki payı olarak Denklem 12'deki gibi hesaplanmaktadır [22].

$$\text{Kesinlik} = \frac{X}{X + Z} \quad (12)$$

Denklem 12'den elde edilen sonuç, normal sınıfı için isabetli öngörülere ortaya koymaktadır.

Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, transfer öğrenme yaklaşımı kullanılarak izolatör görüntülerinden izolatörün malzeme türü ve sağlık durumu (normal/kusurlu) tespiti yapılmıştır. Bu iki problemin verimli çözümü için Çoklu Öğrenme (ÇÖ) yaklaşımı dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım ile belirtilen iki durumun çözümünün tek bir modelle gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. ÇÖ yaklaşımı ile her bir probleme ait modeller karşılaştırılmıştır. Birinci durum (Durum I) izolatörün kusurlu veya normal olduğu durumu, ikinci durum (Durum II) izolatörün hangi malzemeden yapıldığı durumunu ve son durum (Durum III) ise ÇÖ yaklaşımı ile malzeme (silikon, porselen veya cam) ve izolatör durumunu (kusurlu/normal) göstermektedir. Deney veri seti Güney Brezilya'da bulunan Blumenau şehri elektrik şebekesinden çekilmiş görüntülerden elde edilmiş IEEE Data Port internet sitesinden alınmıştır [23]. Üç farklı durumda literatürde yaygın olarak kullanılan, çok sınıflı görüntü setlerinde iyi başarımlar gösteren AlexNet, ResNet50 ve GoogLeNet gibi mimarilere giriş olarak uygulanmıştır. Mimarilerin hiper parametreleri ampirik yolla elde edilmiş ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Eğitimde kullanılan hiper parametre bilgileri

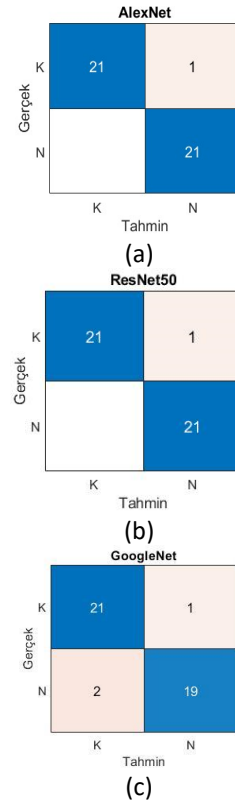
Parametre	AlexNet	GoogLeNet	ResNet50
Optimizasyon	sgdm		
En küçük yığın boyutu (minibatch size)	32	8	8
Öğrenme Oranı	1e-4	1e-4	1e-3
Tekrar Sayısı	10	10	10

Deneysel çalışma ÇÖ yaklaşımının performansının belirgin bir şekilde vurgulanması için üç adımda gerçekleştirilmiştir. İlk önce Durum I ele alınmıştır. Durum I'e ilişkin deneysel sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Durum I için performans sonuçları

Durum I	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik
AlexNet	97.674	95.455	100.000	100.000
ResNet50	97.674	95.455	100.000	100.000
GoogLeNet	93.023	95.455	90.476	91.304

Tablo 3'te görüldüğü gibi Durum I için AlexNet, ResNet50 ve GoogLeNet için performans sonuçları verilmiştir. AlexNet ve ResNet50 en fazla doğrulukla sınıflandırma yapmıştır. GoogleNet %93.023 oranla diğer iki sınıflandırıcıya göre daha az doğruluk oranına sahiptir. Duyarlılık oranları her üç sınıflandırıcı için aynıdır. Özgüllük ve kesinlik oranı AlexNet ve ResNet50'de % 100'e ulaşmıştır.



Şekil 4. Durum I için karmaşıklık matrisleri

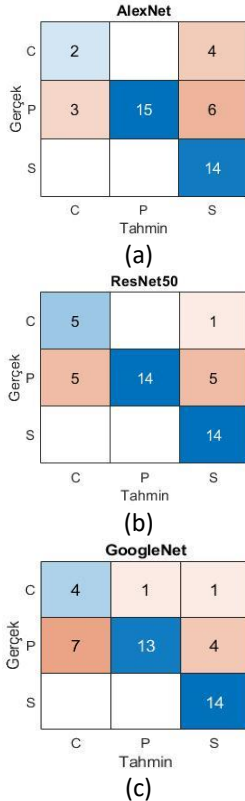
Durum I için karmaşıklık matrisi Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'ün satırları gerçek sınıfları, sütunları tahmin edilen sınıfları göstermektedir. Şekil 4.(a) ve Şekil 4.(b)'de görüleceği üzere AlexNet ve ResNet50 kusurlu izolatörlerden 21 numuneyi doğru, 1 numuneyi yanlış sınıflandırırken normal izolatörlerin 21 tanesini de doğru sınıflandırmıştır. Numune sayısının az olmasından dolayı yanlış sayısı 1 olmasına rağmen % 97.674 olmuştur. GoogLeNet Şekil 4.(c)' görüleceği gibi diğer iki modelden göre daha fazla hataya sahip olmuştur.

Tablo 4'te görüldüğü gibi Durum II için veriler AlexNet, ResNet50 ve GoogLeNet'te sınıflandırılmıştır.

Tablo 4. Durum II için performans sonuçları

Durum II	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik
AlexNet	70.455	65.278	86.257	66.111
ResNet50	75.000	80.556	88.947	73.333
GoogLeNet	70.455	73.611	86.637	67.635

Durum II de, Durum I'e göre doğruluk oranları düşmüştür. ResNet50 % 75 doğruluk oranıyla diğer iki sınıflandırıcıya göre sınıflandırma yapmıştır. ResNet50 'nin duyarlılık, özgüllük ve kesinlik oranları daha iyi sonuç vermiştir.



Şekil 5. Durum II için karmaşıklık matrisleri

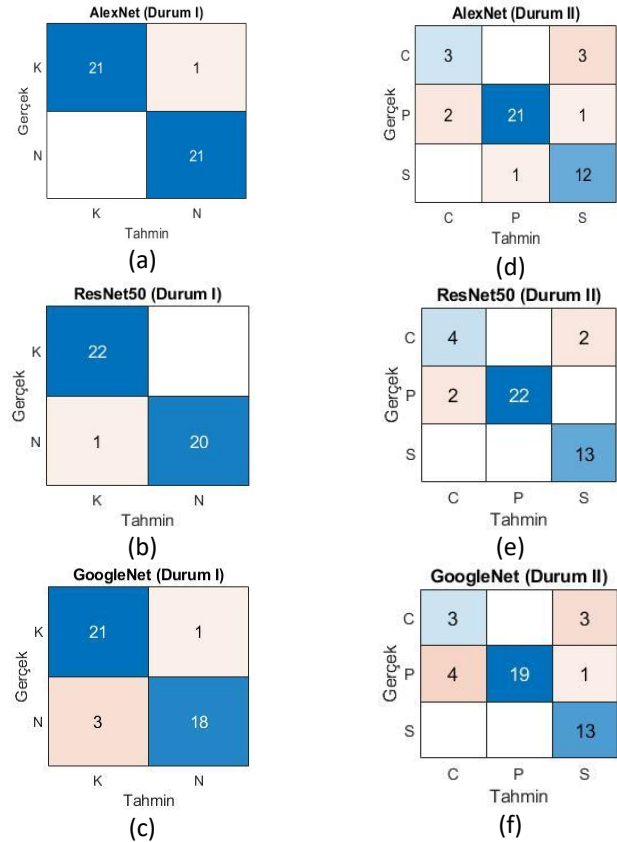
Durum II için karmaşıklık matrisleri Şekil 5'te verilmiştir. 6 adet cam izolatör içinde 5 tanesini doğru tahmin eden ResNet50 en iyi tahmini yapmıştır (Şekil 5.(b)). 24 adet porselen izolatör içinde en iyi tahmini 15 adet ile AlexNet tahmin ederken (Şekil 5.(a)), 13 tahmin ile en az tahmine

GoogLeNet sahip olmuştur (Şekil 5.(c)). Silikon izolatörlerin hepsini tüm sınıflandırıcılar doğru tahmin etmiştir.

Tablo 5. Çoklu Öğrenme yaklaşımıyla performans sonuçları

ÇÖY	Durum	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik
AlexNet	I	97.674	95.455	100.000	100.000
	II	83.721	76.603	91.999	76.818
ResNet50	I	97.674	100.000	95.238	95.652
	II	90.698	86.111	95.976	84.444
GoogLeNet	I	90.698	95.455	85.714	87.500
	II	81.395	76.389	91.952	73.109

Tablo 5'te Çoklu Öğrenme yaklaşımı ile Durum I ve Durum II ele alınmıştır. Çoklu Öğrenme yaklaşımında Durum I için duyarlılık oranının yükseldiği ve en başarılı mimarinin ResNet50 olduğu belirlenmiştir. Özgüllük ve kesinlik ölçütünde ise en iyi oranın değişmediği ve en başarılı mimarinin AlexNet olduğu görülmüştür. Çoklu Öğrenme yaklaşımında Durum II için duyarlılık, özgüllük ve kesinlik ölçütlerinin oranının Durum I'e göre daha iyileştirildiği ve en iyi sonuçlara ResNet50 mimarisinde ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Çoklu Öğrenme yaklaşımıyla karmaşıklık matrisleri

Şekil 6'da Çoklu Öğrenme yaklaşımıyla karmaşıklık matrisleri verilmiştir. Çoklu Öğrenme yaklaşımı ile Durum I'de çok farklılık olmazken, Durum II'de iyileşmeler olmuştur. Durum II'de en fazla tahmin hatası cam izolatörde iken Çoklu Öğrenme yaklaşımıyla beraber 24 adet izolatörden 2 izolatörün tahmininde yanlışlık olup en iyi tahmin ResNet50 ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.(e)).

Tablo 6'da çoklu öğrenme yaklaşımıyla sınıflandırıcıların doğruluk tablosu verilmiştir. Durum I'in doğruluk oranı Durum II'ye göre daha yüksektir. Çoklu öğrenme yaklaşımıyla Durum II'nin doğruluk oranı yükselmiştir. Bu farkın ResNet50 mimarisinde %75'ten %90.698'e yükselmesi belirgin bir şekilde görülmektedir

Tablo 6. Çoklu Öğrenme yaklaşımıyla sınıflandırıcıların doğruluk tablosu

	Durum I	Durum II	ÇÖY	
			ÇÖY - Durum I	ÇÖY - Durum II
Mimari	Doğruluk (%)			
AlexNet	97.674	70.455	97.674	83.721
ResNet50	97.674	75.000	97.674	90.698
GoogLeNet	93.023	70.455	90.698	81.395

Kaynakça

- [1] L. Li, W. Jin, and Y. Huang, "Few-shot contrastive learning for image classification and its application to insulator identification," *Applied Intelligence*, vol. 52, no. 6, pp. 6148–6163, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10489-021-02769-6.
- [2] X. Miao, X. Liu, J. Chen, S. Zhuang, J. Fan, and H. Jiang, "Insulator Detection in Aerial Images for Transmission Line Inspection Using Single Shot Multibox Detector," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9945–9956, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2891123.
- [3] R. M. Prates, R. Cruz, A. P. Marotta, R. P. Ramos, E. F. Simas Filho, and J. S. Cardoso, "Insulator visual non-conformity detection in overhead power distribution lines using deep learning," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 78, pp. 343–355, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compeleceng.2019.08.001.
- [4] R. Miller, F. Abbasi, and J. Mohammadpour, "Power line robotic device for overhead line inspection and maintenance," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 75–84, Jan. 2017, doi: 10.1108/ir-06-2016-0165.
- [5] M. W. Adou, H. Xu and G. Chen, "Insulator Faults Detection Based on Deep Learning," *2019 IEEE 13th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)*, Xiamen, China, 2019, pp. 173-177, doi: 10.1109/ICASID.2019.8925094.
- [6] J. Park et al., "Vehicular Multi-Camera Sensor System for Automated Visual Inspection of Electric Power Distribution Equipment," *2019 IEEE/RSJ*

Sonuç

İzolatörlerin bütünlüğünün değerlendirilmesi, elektrik iletim hatlarının güvenli çalışmasını sağlamak için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, transfer öğrenme yaklaşımı kullanılarak, izolatör görüntülerinden izolatör tipi ayırt edilmiş ve izolatörlerin kusurları belirlenmiştir. İzolator tipinin ve kusurların belirlenmesinde çoklu öğrenme yaklaşımı ile üç ana sınıflandırma görevi göz önünde bulundurulmuştur. AlexNet, ResNet50 ve GoogLeNet mimarilerine izolator görüntüleri giriş olarak uygulanmıştır. Durum I için AlexNet % 97.674, ResNet50 % 97.674 ve GoogLeNet ile %93.023 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. Durum II için AlexNet % 70.455, ResNet50 % 75 ve GoogLeNet ile %70.455 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. Durum I için başarımlar oranları daha yüksektir. Çoklu öğrenme yaklaşımıyla Durum II için doğruluk oranlarının AlexNet ile % 83.721, ResNet50 ile % 90.698 ve GoogLeNet ile %81.395 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çoklu öğrenme yaklaşımının düşük doğruluk oranlarını yükselttiğini ve önerilen yöntemin bu sınıflama türünde verimli olduğunu göstermektedir.

International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, China, 2019, pp. 281-288, doi: 10.1109/IROS40897.2019.8968085.

- [7] X. Li, H. Su, and G. Liu, "Insulator Defect Recognition Based on Global Detection and Local Segmentation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 59934–59946, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2982288.
- [8] D. Mussina, A. Irmanova, P. K. Jamwal, and M. Bagheri, "Multi-Modal Data Fusion Using Deep Neural Network for Condition Monitoring of High Voltage Insulator," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184486–184496, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3027825.
- [9] Y. Gao, L. Gao and X. Li, "A New Semi-Supervised Deep Learning Approach for Intelligent Defects Recognition," *2020 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Nanjing, China, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICNSC48988.2020.9238100.
- [10] J. Liu, C. Liu, Y. Wu, H. Xu, and Z. Sun, "An Improved Method Based on Deep Learning for Insulator Fault Detection in Diverse Aerial Images," *Energies*, vol. 14, no. 14, p. 4365, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144365.
- [11] Y. Hao, W. Liang, L. Yang, J. He, and J. Wu, "Methods of image recognition of overhead power line insulators and ice types based on deep weakly-supervised and transfer learning," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 11, pp. 2140–2153, Feb. 2022, doi: 10.1049/gtd2.12428.

- [12] S. Albawi, T. A. Mohammed and S. Al-Zawi, "Understanding of a convolutional neural network," *2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, Antalya, Turkey, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEngTechnol.2017.8308186.
- [13] F. Demir, D. A. Abdullah, and A. Sengur, "A New Deep CNN Model for Environmental Sound Classification," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 66529–66537, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2984903.
- [14] S. S. Liew, M. Khalil-Hani, S. Ahmad Radzi, and R. Bakhteri, "Gender classification: a convolutional neural network approach," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 24, pp. 1248–1264, 2016, doi: 10.3906/elk-1311-58.
- [15] Li et al., "Facial Expression Recognition with Faster R-CNN," *Procedia Computer Science*, vol. 107, pp. 135–140, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.03.069.
- [16] X. Fan, X. Feng, Y. Dong, and H. Hou, "COVID-19 CT image recognition algorithm based on transformer and CNN," *Displays*, vol. 72, p. 102150, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.displa.2022.102150.
- [17] K. Weiss, T. M. Khoshgoftaar, and D. Wang, "A survey of transfer learning," *Journal of Big Data*, vol. 3, no. 1, May 2016, doi: 10.1186/s40537-016-0043-6.
- [18] F. Zhuang et al., "A Comprehensive Survey on Transfer Learning," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 1, pp.43-76, Jan.2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3004555.
- [19] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," *Communications of the ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, May 2017, doi: 10.1145/3065386.
- [20] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition," *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 770-778, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [21] M. Özküçük, Ö. F. Alçın, and M. Gençoğlu, "EMG Sinyalleri Kullanılarak GoogLeNet ve Çok Seviyeli DPD ile El Tutma Hareketlerinin Sınıflandırılması," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 34, no. 1, pp. 33–43, Mar. 2022, doi: 10.35234/fumbd.932585.
- [22] S. Siuly et al., "A New Framework for Automatic Detection of Patients With Mild Cognitive Impairment Using Resting-State EEG Signals," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 28, no. 9, pp. 1966-1976, Sept. 2020, doi: 10.1109/TNSRE.2020.3013429.
- [23] Stéfano Stefenon, December 10, 2021, "Inspection of Electrical Power Distribution Grid (South of Brazil)", IEEE Dataport, doi: https://dx.doi.org/10.21227/pvzk-c971.



Çiğ Sütün Yağlılık Oranının Yakın Kızılötesi Spektroskopi Sinyalleri ile Tespit Edilmesi

Determining the Fatty Rate of Raw Milk with Near Infrared Spectroscopy Signals

Tuğba Aydemir¹

¹ Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fizik Bölümü, tugba_aydemir17@erdogan.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3370-6504>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 15 Ocak 2024
Revizyon 22 Şubat 2024
Kabul 22 Şubat 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Yakın kızıl ötesi spektroskopisi, çiğ süt, yağ oranı, sınıflandırma.

ÖZ

Süt endüstrisinde süt kalitesi hakkında bilgi veren temel parametrelerden biri sütün yağ oranıdır. Donanım ve yazılım alanındaki gelişmeler çiğ sütün içeriğinin belirlenmesinde hem pratiklik hem de yüksek doğruluk sağlayabilmektedir. Bu çalışmada geniş bir veri kümesi ile yakın kızıl ötesi spektroskopisi ölçümleri kullanılarak çiğ sütün yağlılık oranı az, orta veya çok yağlı olarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada çiğ süt için 960 nanometre ile 1690 nm dalga boyu aralığında 2.86 nm çözünürlükle toplam 256 adet yakın kızıl ötesi spektral ölçümler kaydedilmiştir. Bu spektral ölçümlerin her biri öznitelik olarak dikkate alınmış ve Ki-Kare ve Komşu Bileşen Analizi yaklaşımları ile en etkin öznitelik kombinasyonu aranmıştır. En etkin öznitelik kombinasyonu k -en Yakın Komşuluk, Bayes, Karar Ağacı ve Destek Vektör Makineleri için en yüksek sınıflandırma doğruluğu elde edilecek şekilde belirlenmiştir. Önerilen yöntemde k -en Yakın Komşuluk sınıflandırıcısı ve Komşu Bileşen Analizi ile belirlenmiş sadece 46 spektral ölçüm değeri kullanılarak %82.32 oranında sınıflandırma doğruluğu elde edilebileceği gösterilmiştir. Sütün içeriği ürünün kalitesinin belirlenmesinin yanı sıra, ürünün fiyatının belirlenmesinde, beslenen ve süt veren hayvanların sağlığının izlenebilmesi hakkında da bilgiler verir. Bu çalışmada önerilen yöntemin pratik, yüksek doğruluklu ve üretilen sütün düzenli analizini yapabilmeye imkan tanınması ile sürünün sağlığını ve beslenme şeklinin uygunluğunu sürekli takip edilebilmesini olanaklı hale getireceği düşünülmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 January 2024
Received in revised form 22 February 2024
Accepted 22 February 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Near infrared spectroscopy, raw milk, fat content, classification.

ABSTRACT

One of the basic parameters that gives information about milk quality in the dairy industry is the fat ratio. Developments in hardware and software can provide both practicality and accuracy in determining the content of raw milk. In this study, the fat content of raw milk was classified as low, medium or high fat using a large data set and near infrared spectroscopy measurements. In this study, a total of 256 near-infrared spectral measurements were recorded for raw milk in the wavelength range of 960 nanometers to 1690 nm with a resolution of 2.86 nm. Each of these spectral measurements was considered as a feature and the most effective feature combination was searched using Chi-Square and Neighborhood Component Analysis approaches. The most effective feature combination was determined to achieve the highest classification accuracy for k -Nearest Neighbour, Bayes, Decision Tree and Support Vector Machines. In the proposed method, it has been shown that 82.32% classification accuracy can be achieved by using only 46 spectral measurement values determined by k -Nearest Neighborhood classifier and Neighborhood Component Analysis. In addition to determining the quality of the product, the content of milk also provides information about determining the price of the product and the health of the dairy animals. It is thought that the proposed method in this study will be practical, highly accurate and allow regular analysis of the milk produced, making it possible to constantly monitor the health of the herd and the suitability of the nutrition style.

Doi: 10.24012/dumf.1420331

* Sorumlu Yazar

Giriş

Donanımsal ve yazılımsal gelişmelerle birlikte gıdaların üretim, dağıtım ve tüketim aşamalarında pratik, güvenilir, doğruluğu yüksek ve çevre dostu teknikler giderek artış göstermektedir. Bu teknikler hızlı sonuç vermeleri, kimyasal işlem gerektirmemeleri ve bir uzmana ihtiyaç duyulmaması özellikleri ile de tercih edilmektedir [1]. Önerilen teknikler içerisinde yakın kızılötesi spektroskopisi (YKS) esaslı yaklaşımlar bahsedilen bu özelliklerin çoğunu sağlaması bakımından gıdalardaki çeşitli nicel içerik analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. YYS 750-2000 nm dalga boyu aralığındaki elektromanyetik radyasyonun absorpsiyonu temeline dayanır.

YKS su içeriğinin tespit edilmesi [2], üzüm içeriğinin ve kalitesinin belirlenmesi [3], ekmek yapımında kullanılan unun kalitesinin ölçülmesi [4] ve elmaların sululuk oranını ve çözünür katı madde içeriğinin tespit edilmesi [5] gibi geniş yelpazede gıdaların analizlerinde başarılı sonuçlar verdiği literatürde raporlanmıştır. Bir başka uygulama alanı da çiğ sütün kalitesinin, yağ, protein, laktoz ve diğer bileşen oranlarının belirlenmesine yöneliktir. Sütün içeriği ürünün fiyatının ve kalitesinin belirlenmesinin yanı sıra, sürünün sağlığının belirlenmesi hakkında da bilgiler verir. İnek sağlığını izlemenin en iyi yolu, üretilen sütün düzenli analizini yapmak ve yağ ve protein arasındaki oranı değerlendirmektir [6].

Literatürde farklı dalga boyları ile süt içeriğinin belirlenmesine yönelik raporlanan başarılı çalışmalar vardır. Süt içeriğinin belirlenmesine yönelik bir çalışmada Kawamura vd. homojenize edilmemiş sütün üç ana süt bileşenini (yağ, protein ve laktoz), somatik hücre sayısını (SCC) ve süt üre nitrojenini tahmin etmek için kalibrasyon modelleri geliştirmişlerdir [7]. Çalışmalarında 4 farklı inekten 600-1050 nm aralığında (1 nm çözünürlükle) toplam 455 örnek kaydetmişlerdir. Geliştirdikleri modelde yağ oranının testi için sadece 151 örneği kullanmışlardır. Performans ölçütü için determinasyon katsayısını kullanmışlardır ve 0.95 oranında bir başarı elde etmişlerdir. Benzer bir başka çalışmada ise Kawasaki vd. toplam 216 örneğin 72 tanesini geliştirdikleri yöntemi test etmek için kullanmışlardır ve 0.95 determinasyon katsayısı başarıları hesaplamışlardır [8]. İneklerin yemlenme farklılıklarını sütlerden alınan YYS kayıtları ile tespit edilmesine yönelik bir teknik Valenti vd. tarafından önerilmiştir [9]. Chen vd. ise Çin'de bulunan süpermarketlerden 6 farklı markadaki sütlerin makine öğrenmesi teknikleri ile sınıflandırılmasını %100 doğrulukla gerçekleştirmişlerdir. Bunun için her bir markadan 24'er olmak üzere toplam 144 örnek kullanmışlardır. Bunların 48 tanesi test işlemi için kullanılmıştır. Bir başka çalışmada ise Çelik sütün 7 özelliğini (pH, tat, koku, sıcaklık, yağlılık, renk ve bulanıklık) kullanarak sütün kalitesini yüksek, orta ve düşük olarak %99.9 sınıflandırma doğruluğu ile sınıflandırmıştır [10]. Bu çalışmalar dışında süt içeriğini YYS esaslı yaklaşımlar ile inceleyen başka çalışmalar da vardır [11-15].

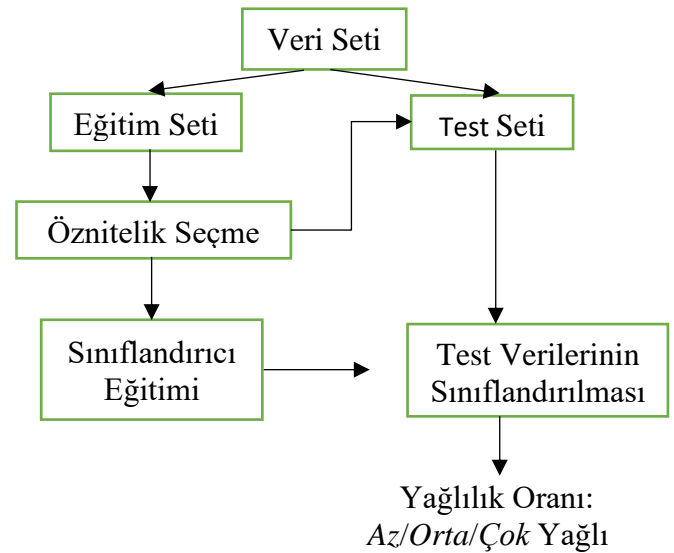
Literatürde çiğ sütün YYS sinyalleri ile farklı açılardan görece başarılı bir şekilde analiz edildiği ancak sütlerin yağ oranının az yağlı, orta yağlı ve çok yağlı olarak

sınıflandırılmamıştır. Bununla birlikte regresyon analizi ile yağlılık oranı tespit edilmeye çalışılmış ancak kararlı bir sonuca varabilmek için yeterli büyüklükte veri kümesi dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada 2023 yılında araştırmacıların kullanımına sunulmuş ve üzerinde henüz bir bilimsel araştırma raporlanmamış 1224 örneklik çiğ süt veri kümesi ile sütlerin az yağlı, orta yağlı ve çok yağlı olarak sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalarda ölçüm yapılan tüm dalga boyları analizde kullanılırken önerilen yöntemde yağlılık oranını tespit etmede anlamlı bilgi içeren dalga boylarının tespit edilmesi de gerçekleştirilmiştir. 4 farklı açıdan yakın kızıl ötesi (YKÖ) spektroskopisi değerleri öznitelik olarak seçilmiş ve en yüksek sınıflandırma doğruluğu %82.32 olarak Komşu Bileşen Analizi (KBA, *İngilizcesi*: Neighborhood Component Analysis) öznitelik seçme ve k -en yakın komşuluk (k -EYK, *İngilizcesi*: k -Nearest Neighborhood) sınıflandırıcısı ile elde edilmiştir.

Makalenin devamında öncelikle bu çalışmada kullanılan veri kümesi tanıtılmıştır. Daha sonra Özniteliklerin kullanımı ve seçimi ile sınıflandırma yöntemleri kısaca tanıtılmıştır. Çalışmanın son bölümlerinde elde edilen sonuçlar tablo ve şekillerde birlikte verilirken en son kısımda varılan bulgular, öneriler ve tartışma kısmı sunulmuştur.

Yöntem

Bu bölümde Şekil 1'de akış diyagramı verilen yöntemin alt bileşenleri olan veri kümesi tanıtımı ile sınıflandırma için kullanılan öznitelikler ve öznitelik seçme yaklaşımları ve sınıflandırma algoritmaları anlatılmıştır.



Şekil 1. Akış şeması.

Veri Kümesi Tanıtımı

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi, Belçika'nın Antwerp eyaletinin deneysel süt çiftliğinde 2017 yılında sekiz haftalık bir süre boyunca çiftlikte toplanan 1224 ayrı çiğ süt örneğinin 960 nanometre (nm) ila 1690 nm dalga boyu aralığında 2.86 nm çözünürlükle YKÖ spektral ölçümlerini içermektedir [16]. Bu spektral ölçümlerde çiğ sütün yağ, protein, laktoz,

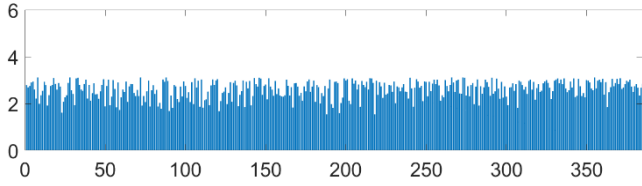
üre ve somatik hücre sayımı değerleri dikkate alınmış olsa da bu çalışmada sadece sütün yağ oranları kullanılmıştır. Bu ölçümler, 256 piksel soğutmalı InGaAs diyot dizisi YKÖ spektrometre cihazı (1.7-256 Düzlem Izgara Spektrometresi, Carl Zeiss, Jena, Almanya) kullanılarak ISO 9622 ve ISO 13366-2:2006 standartlarında kaydedilmiştir. Veri kümesi araştırmacıların genel kullanımına 18 Ağustos 2023 tarihinde sunulmuştur.

1224 çiğ süt örneği Tablo 1’de gösterilen şartlara göre az yağlı (*Sınıf 1*), orta yağlı (*Sınıf 2*) ve çok yağlı (*Sınıf 3*) olarak 3 sınıfa ayrılmıştır. Bu çalışmadaki amaç YKÖ spektral ölçümleri kullanılarak çiğ sütün hangi kategoride olduğunu tespit edebilmektir. Tablo 1’de verilen kategori şartlarına göre *Sınıf 1*’den 386, *Sınıf 2*’den 467 ve *Sınıf 3*’ten 371 örnek elde edilmiştir. Bu tabloda M tüm örnekler için (1224 çiğ süt örneği) ortalama yağ oranını ve S bunların standart sapmasını ifade etmektedir ve sırasıyla Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’de nasıl hesaplandıkları verilmiştir. Bu eşitliklerde Y yağlılık oranını ve L toplam çiğ süt örneklem sayısını göstermektedir.

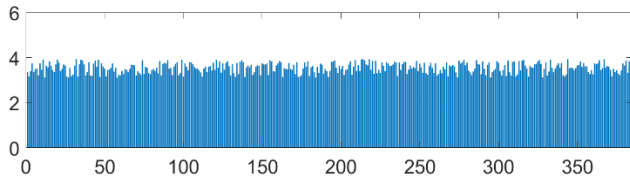
$$M = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L Y_i \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (Y_i - M)^2}{L - 1}} \quad (2)$$

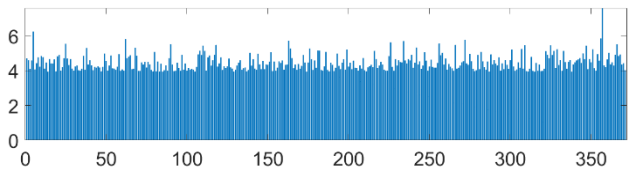
Bu örneklerin rastgele seçilen yarısı önerilen modelin eğitimi için kullanılırken diğer yarısı modelin test edilmesi için kullanılmıştır. Örneklerin yağ oranlarının dağılımı Şekil 2’de ve YKÖ spektral ölçüm değerleri Şekil 3’te gösterilmektedir.



(a)

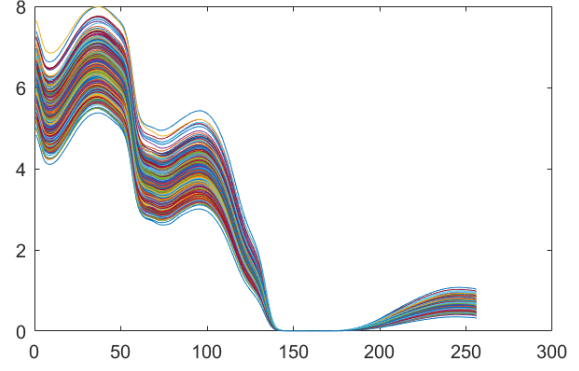


(b)

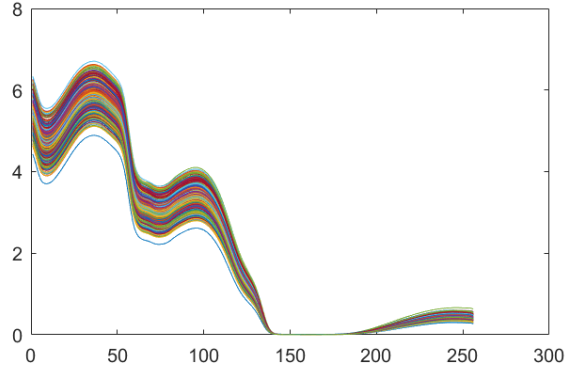


(c)

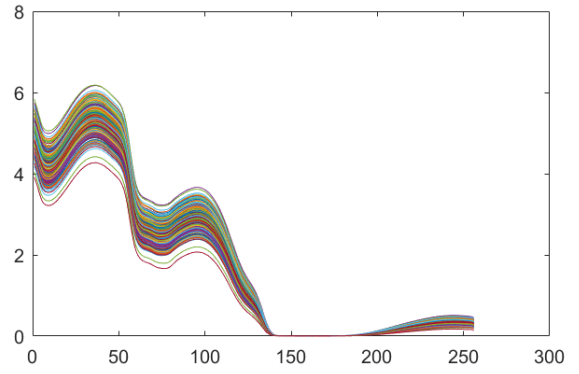
Şekil 2. Örneklerin yağ oranı dağılımları, (a) Yağ oranı 3.12’nin altında olan *Sınıf 1* örnekleri, (b) Yağ oranı 3.12 ile 3.93 arasında olan *Sınıf 2* örnekleri, (c) Yağ oranları 3.93’ün üstünde olan *Sınıf 3* örnekleri.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. YKÖ spektral ölçüm değerleri, (a) *Sınıf 1*’e ait spektral ölçüm değerleri, (b) *Sınıf 2*’ye ait spektral ölçüm değerleri, (c) *Sınıf 3*’e ait spektral ölçüm değerleri.

Tablo 1. Veri kümesinin kategorizasyonu.

Yağlılık Kategorisi	Kategori Şartı	Örnek Sayısı
Az Yağlı	$Sınıf 1 < \left(M - \frac{S}{2}\right) = 3.12$	386
Orta Yağlı	$M - \frac{S}{2} < Sınıf 2 < \left(M + \frac{S}{2}\right) = 3.93$	467
Çok Yağlı	$Sınıf 3 > M + \frac{S}{2}$	371

Öznitelik Belirleme ve Öznitelik Seçme

Bu çalışmada ölçülen spektral değerler direkt olarak öznitelik değerleri olarak kullanılmıştır. Bu değerlerin dağılımı Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu çalışmanın özgün yanlarından biri de olan sınıflandırma doğruluğunu arttıran spektral değerler dört farklı öznitelik seçme yaklaşımları ile değerlendirilmiştir [17]. Bu yaklaşımlar şunlardır: 1) En düşük spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı öznitelik seçme: Bu yaklaşımda öncelikle 960 nm'ye dayalı spektral ölçme değeri öznitelik olarak kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Ardından 960 nm ile 962.6 nm spektral ölçme değeri öznitelik olarak kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Bu işlem her defasında bir sonraki spektral değer eklenmesiyle en son 256 adet spektral değer birlikte kullanımı ile sınıflandırma yapılmaya kadar devam etmiştir. Yapılan bu 256 test içerisinde en yüksek sınıflandırma doğruluğunu veren spektral ölçümler en uygun öznitelikler olarak değerlendirilmiştir. 2) En yüksek spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı öznitelik seçme: Bu yaklaşımda öncelikle 1690 nm'ye dayalı spektral ölçme değeri öznitelik olarak kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Ardından 1690 nm ile 1687.1 nm spektral ölçme değeri öznitelik olarak kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Bu işlem her defasında bir sonraki spektral değer eklenmesiyle en son 256 adet spektral değer birlikte kullanımı ile sınıflandırma yapılmaya kadar devam etmiştir. Yapılan bu 256 test içerisinde en yüksek sınıflandırma doğruluğunu veren spektral ölçümler en uygun öznitelikler olarak değerlendirilmiştir. 3) KBA öznitelik seçme: Bu yaklaşım en anlamlı özniteliklerin azalan sırada yer aldığı, mesafeye dayalı bir özellikli ağırlıklandırma yöntemidir [18-20]. Komşuluk bileşeni analizinin temel amacı, en yakın komşu sınıflandırmasını optimize eden öznitelik alt kümesini seçmeye uygun bir ağırlıklandırma vektörü w bulmaktır. İki özellik (m_i ve m_j) arasındaki ağırlıklı mesafe (N_w) matematiksel olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$N_w(m_i, m_j) = \sum_{n=1}^s w_n^2 |m_{i,n} - m_{j,n}| \quad (1)$$

Bu eşitlikte w_n ; n . öznitelikle ilişkilendirilmiş ağırlığı ifade etmektedir. Ağırlıklı mesafe N_w ile P_{ij} olasılığı arasındaki ilişki matematiksel olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{k(N_w(m_i, m_j))}{\sum_{j=1}^R k(N_w(m_i, m_j))}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (2)$$

burada $k(N_w(m_i, m_j))$ m_i ve m_j arasındaki benzerliği tanımlayan bir çekirdek işlevidir. m_i 'nin doğru sınıflandırılma olasılığı Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$P_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^R p_{ij} y_{ij}, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

burada y_{ij} ; $y_i=y_j$ olduğunda 1 diğer durumlarda sıfırdır. Tahmin hatasını en aza indirmek için komşuluk bileşen analizinin amaç fonksiyonu Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$A(w) = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R P_i + \beta \sum_{b=1}^B w_b^2 \quad (4)$$

burada w_b , w vektöründeki b 'inci elemandır ve β , aşırı uyum sorununun aşılmasını sağlayan düzenleme parametresini belirtir ve bunun optimal değeri çapraz doğrulama aşamasında bulunabilir. 4) Ki-kare (*İngilizcesi*: Chi-Square) öznitelik seçme: Ki-kare, girdi değişkeni (öznitelik) ve çıktı değişkeni (sınıf etiketi) arasındaki bağımsızlık eksikliğini belirleyen, çok yaygın olarak kullanılan bir öznitelik seçme yöntemidir. İki aşamada uygulanır. Öncelikle tüm özniteliklerin ayrıklaştırılması ve bu seviyeye göre sıralanması daha yüksek bir anlamlılık düzeyi ile başlar. İkinci olarak, her bir bitişik aralık çifti için Ki-kare değeri hesaplanır. En düşük Ki-kare değerine sahip iki bitişik aralık birleştirilir. Bu işlem, hiçbir Ki-kare değeri birleştirilemeye kadar kullanılır. Bu yöntemin sonunda öznitelikler önem sırasına göre ağırlıklandırılır, yani sınıflandırıcı eğitim sürecine katkılarına göre sıralanır. Ki-kare değeri Eşitlik 5'te gösterilmiştir.

$$\text{Ki - kare}(t_s, c_i) = \frac{T(XY - WZ)^2}{(X+W)(Y+Z)(X+Z)(Y+W)} \quad (5)$$

burada T veri kümesindeki toplam örnek sayısıdır, X c_i sınıfındaki t_s terimini içeren örnek sayısıdır, Y diğer sınıflardaki t_s terimini içermeyen örneklerin sayısıdır, W örnek sayısıdır c_i sınıfında t_s terimini içermeyen örneklerin sayısı, Z ise diğer sınıflarda t_s terimini içeren örneklerin sayısıdır.

Öznitelikler Eşitlik 6'da gösterildiği gibi standart sapma normalizasyonu uygulanarak ve uygulanmadan test edilmiştir.

$$S_N = \frac{S_i - \bar{S}}{\text{std}(S)} \quad (6)$$

Bu eşitlikte S_N ; normalizasyon uygulanmış bir örneğe ait spektral ölçümü, S_i ; Bir örneğe ait i . spektral ölçüm değerini, \bar{S} ; bir örneğe ait spektral ölçümlerin ortalama değerini ve $\text{std}(S)$; bir örneğe ait spektral ölçümlerin standart sapma değerini göstermektedir.

Sınıflandırma ve Performans Ölçme Metrikleri

Bu çalışmada çiğ sütün içerdiği yağ oranını az, orta veya çok yağlı olarak sınıflandırmak için k -EYK, Bayes, Karar Ağacı (KA, *İngilizcesi*: Decision Tree) ve Destek Vektör Makineleri (DVM, *İngilizcesi*: Support Vector Machines) sınıflandırıcıları sınanmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi 1224 çiğ süt örneğinden oluşturulan veri kümesinin yarısı sınıflandırıcı eğitimi ve kalan yarısı da sınıflandırıcı testi için kullanılmıştır. Literatürde sıklıkla kullanılan bu sınıflandırıcılar aşağıda önemli hususları vurgulanarak kısaca açıklanmıştır.

Gürültüye dayanıklılığı zayıf olarak bilinen k -EYK, sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Temel fikri, bir veri

noktasını çevreleyen k en yakın komşusunu inceleyerek, bu komşuların etiketlerini kullanarak veri noktasının sınıfını veya değerini tahmin etmektir. Bu çalışmada öznitelik vektörleri arasındaki uzaklık Öklid Uzaklık ölçütü ile hesaplanmış olup, eğitim aşamasında en yüksek sınıflandırma eğitimi sağlayan k değeri 1 ile 25 arasında aranmıştır.

Genellikle metin sınıflandırma, spam filtreleme ve tıbbi teşhis gibi birçok uygulama alanında başarıyla kullanılan Bayes sınıflandırıcısı, Bayes teoreminden türemiştir ve sınıflandırma sürecinde olasılık hesaplamalarını içerir. Test örneğinin özellikleri kullanılarak, Bayes sınıflandırıcısı her sınıf için olasılıkları hesaplar. Ardından, en yüksek olasılığa sahip sınıf, test örneğine tahmin olarak atanır.

Karar ağaçları yöntemi temelde, veri kümesini bir dizi karar kuralı veya koşul ile bölerek bir ağaç yapısı oluşturur. Bu ağaç yapısı, bir veri noktasının sınıfını veya değerini belirlemek için kullanılır. Bu bölmelerin her bir noktası düğüm olarak adlandırılır ve bir karar kuralını temsil eder. Örneğin, "F özelliği 3'ten büyükse sol alt düğüme git, değilse sağ alt düğüme git" gibi bir karar kriteri olabilir.

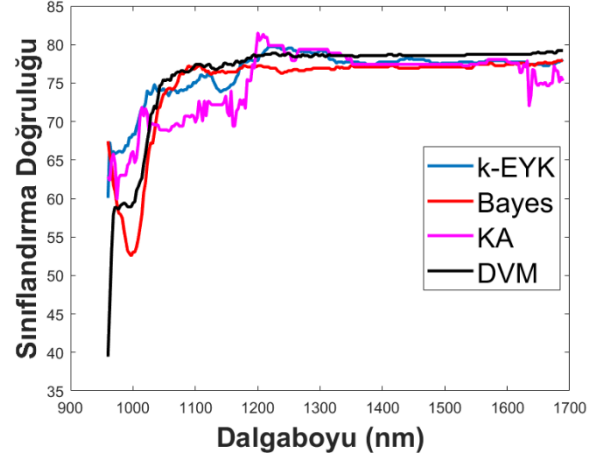
DVM'nin temel amacı, veri noktalarını sınıflar arasındaki bir hiper düzlemle en iyi şekilde ayırmaktır. Bu hiper düzlem, veri noktalarını sınıflarına göre en iyi şekilde bölme kapasitesine sahip olan düzlemdir. Destek vektörler, hiper düzleme en yakın olan veri noktalarıdır. Bu noktalar, sınıflar arasındaki marjini maksimize etmek için önemlidir. DVM'nin iki önemli hiperparametresi H ve γ 'dir. H , sınıflandırma hatasını düzenleyen bir parametredir. Daha yüksek H değerleri, marjinal hatayı minimize etmeye odaklanır, ancak aşırı öğrenme riskini artırabilir. γ , çekirdek fonksiyonunun esnekliğini kontrol eden bir parametredir. Bu çalışmada açıklanan bu dört sınıflandırıcı Matlab ortamında varsayılan parametreleri ile birlikte kullanılmıştır.

Sınıflandırıcı performansını ölçmede sınıflandırma doğruluğu (SD) ölçütü kullanılmıştır. Sınıflandırma doğruluğu Eşitlik 7'de gösterildiği gibi doğru sınıflandırılan örnek sayısının (DSÖS) toplam örnek sayısına (TÖS) bölünüp 100 ile çarpılması ile yüzde cinsinden hesaplanmıştır.

$$SD = \frac{DSÖS}{TÖS} \cdot 100 \quad (7)$$

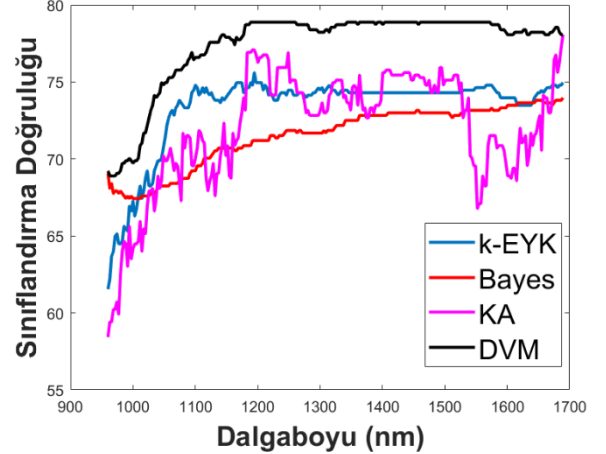
Sonuçlar

Bu çalışmada çiğ sütün yağlılık oranı az, orta veya çok yağlı olmak üzere YKÖ spektral ölçüm verileri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Aşağıda önışlem uygulanmış ve uygulanmamış öznitelik kullanım yaklaşımlarına ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 4'te en düşük spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı normalizasyon uygulanmış öznitelik seçme yaklaşımına ait sınıflandırma sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlara göre k -EYK, Bayes, KA ve DVM'nin en yüksek SD sonuçları sırasıyla %79.71 (960-1217.40 nm), %77.91 (960-1680.72 nm), %81.51 (960-1200.24 nm) ve %79.21 (960-1680.72 nm) olarak hesaplanmıştır.



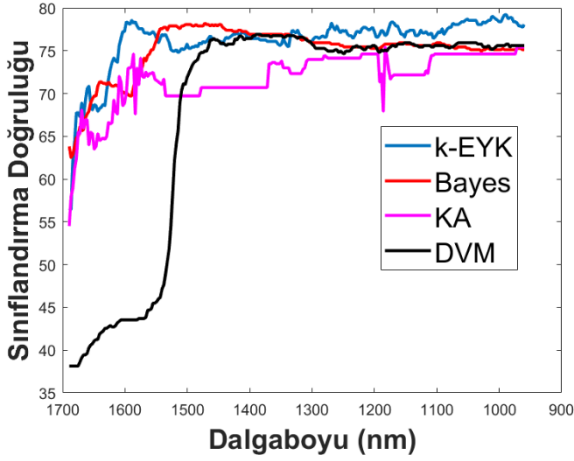
Şekil 4. En düşük spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı normalizasyon uygulanmış öznitelik seçme yaklaşımına ait sınıflandırma sonuçları.

Şekil 5'te en düşük spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı normalizasyon uygulanmamış öznitelik seçme yaklaşımına ait sınıflandırma algoritmalarının sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlara göre k -EYK, Bayes, KA ve DVM'nin en yüksek SD sonuçları sırasıyla %75.61 (960-1194.52 nm), %73.98 (960-1689.30 nm), %78.07 (960-1689.30 nm) ve %78.89 (960-1188.80 nm) olarak hesaplanmıştır.



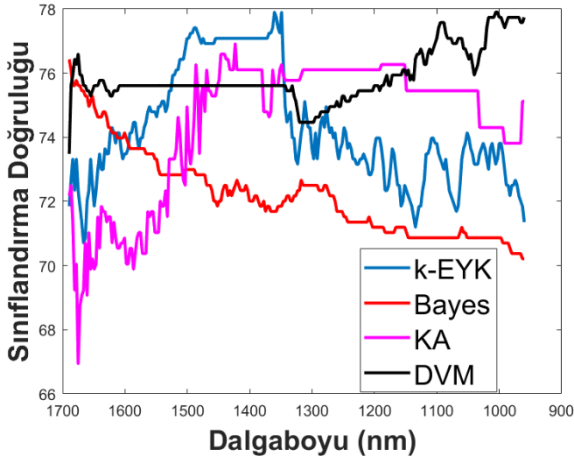
Şekil 5. En düşük spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı normalizasyon uygulanmamış öznitelik seçme yaklaşımına ait sınıflandırma sonuçları.

Şekil 6'da en yüksek spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı öznitelik seçme yaklaşımına ait sınıflandırma algoritmalarının normalizasyon uygulanmış sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlara göre k -EYK, Bayes, KA ve DVM'nin en yüksek SD sonuçları sırasıyla %79.21 (1700-991.46 nm), %78.23 (1700-1471.94 nm), %75.45 (1700-1183.08 nm) ve %76.92 (1700-1389 nm) olarak hesaplanmıştır.



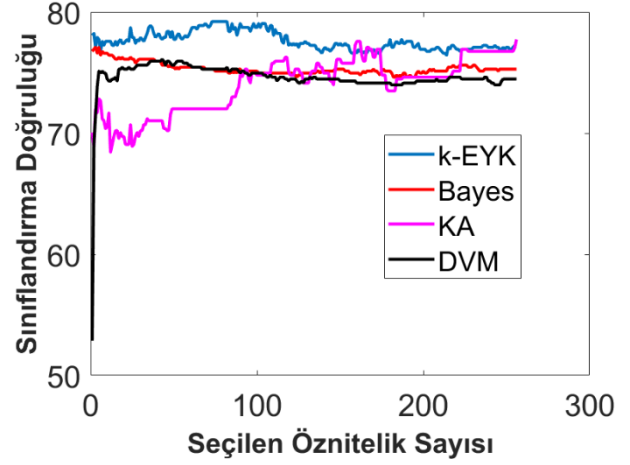
Şekil 6. En yüksek spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı normalizasyon uygulanmış öznelik seçme yaklaşımına ait sınıflandırma sonuçları.

Şekil 7'de en yüksek spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı öznelik seçme yaklaşımına ait normalizasyon uygulanmamış sınıflandırma algoritmalarının sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlara göre *k*-EYK, Bayes, KA ve DVM'nin en yüksek SD sonuçları sırasıyla %77.91 (1700-1360.40 nm), %76.43 (1700-1689.30 nm), %76.92 (1700-1423.32 nm) ve %77.91 (1700-1005.76 nm) olarak hesaplanmıştır.

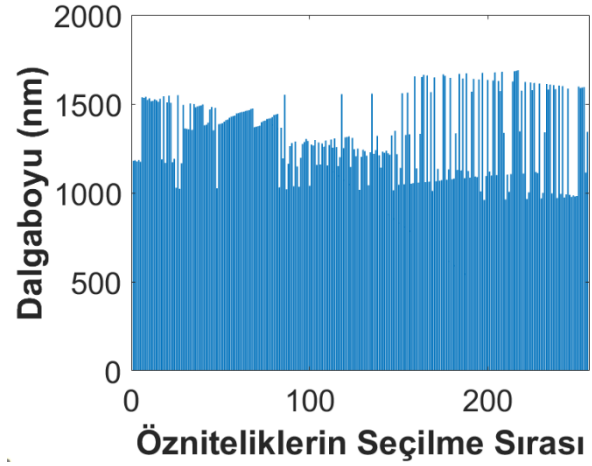


Şekil 7. En yüksek spektral değerlerden başlayarak ardışıl eklemeye dayalı normalizasyon uygulanmamış öznelik seçme yaklaşımına ait sınıflandırma sonuçları.

Şekil 8'de Ki-Kare öznelik ağırlık belirleme yaklaşımına göre elde edilen normalizasyon uygulanmış sonuçlar verilmiştir. Şekil 9'da ise bu sonuçların dikkate alınan özneliklerin sırası bar grafiği ile gösterilmiştir. Bar grafiğinden görüldüğü gibi YKÖ spektral ölçümlerin bu kriter için anlamlı bir ağırlıklandırma dağılımı görülmemektedir. *k*-EYK sınıflandırıcısı ile en yüksek SD değerini ilk 73 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm kullanılarak %79.21 olarak elde edilirken, Bayes ile sadece ilk 3 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm değerleri ile %77.09 SD hesaplanmıştır. KA sınıflandırıcısı ise en yüksek SD değerini tüm spektral ölçümleri kullanarak %77.74 olarak sağlarken, DVM ilk 43 en ağırlıklandırılmış spektral değerle %76.11 SD değeri sağlamıştır.

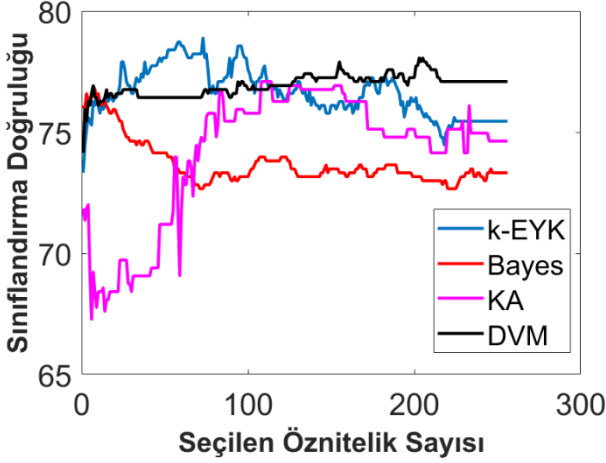


Şekil 8. Ki-Kare öznelik ağırlıklandırma ve normalizasyon uygulanmış sınıflandırma sonuçları.

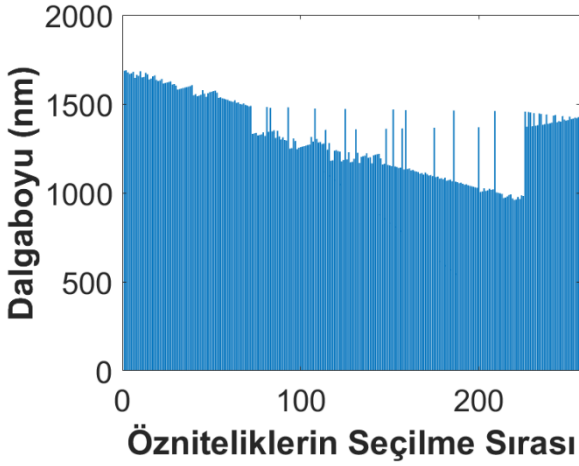


Şekil 9. Normalizasyon uygulanmış Ki-Kare öznelik ağırlıklandırma sonuçları.

Şekil 10'da Ki-Kare öznelik ağırlık belirleme yaklaşımına göre elde edilen normalizasyon uygulanmamış sonuçlar verilmiştir. Şekil 11'de ise bu sonuçların dikkate alınan özneliklerin sırası bar grafiği ile gösterilmiştir. Bar grafiğinden görüldüğü gibi YKÖ spektral ölçümlerin yüksek dalga boyları genelde öznelik olarak daha etkin belirlenmiş ve dalga boyu azaldıkça ağırlıklandırma değeri düşüş göstermiştir. *k*-EYK sınıflandırıcısı ile en yüksek SD değeri ilk 73 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm kullanılarak %78.89 olarak elde edilirken, Bayes ile sadece ilk 7 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm değerleri ile %76.92 SD hesaplanmıştır. KA sınıflandırıcısı ise en yüksek SD değerini ilk 108 en ağırlıklandırılmış spektral ölçümleri kullanarak %77.08 olarak sağlarken, DVM ilk 203 en ağırlıklandırılmış spektral değerle %78.07 SD değeri sağlamıştır.

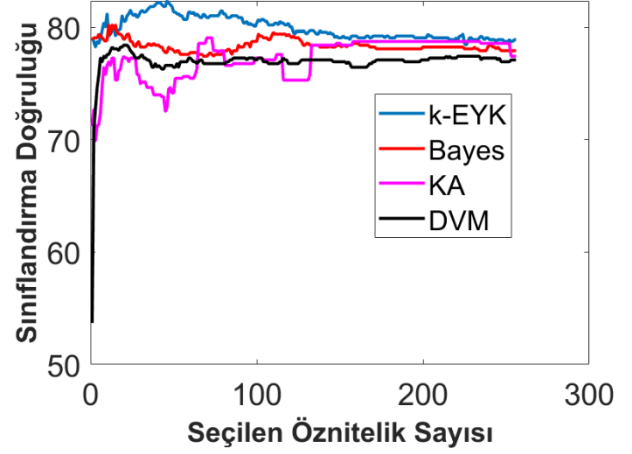


Şekil 10. Ki-Kare öznitelik ağırlıklandırma ve normalizasyon uygulanmamış sınıflandırma sonuçları.

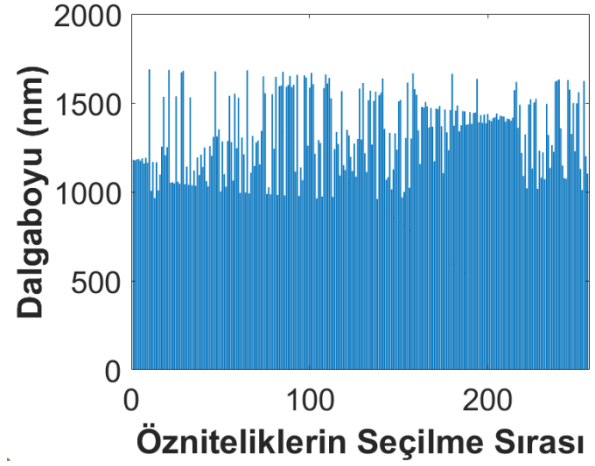


Şekil 11. Normalizasyon uygulanmamış Ki-Kare öznitelik ağırlıklandırma sonuçları.

Şekil 12’de KBA öznitelik ağırlık belirleme yaklaşımına göre elde edilen normalizasyon uygulanmış sonuçlar verilmiştir. Şekil 13’te ise bu sonuçların dikkate alınan özniteliklerin sırası bar grafiği ile gösterilmiştir. *k-EYK* sınıflandırıcısı ile en yüksek SD değerini ilk 46 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm kullanılarak %82.32 olarak elde edilirken, Bayes ile sadece ilk 11 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm değerleri ile %80.20 SD hesaplanmıştır. KA sınıflandırıcısı ise en yüksek SD değerini ilk 70 spektral ölçümleri kullanarak %79.05 olarak sağlarken, DVM ilk 20 en ağırlıklandırılmış spektral değerle %78.40 SD değeri sağlamıştır.

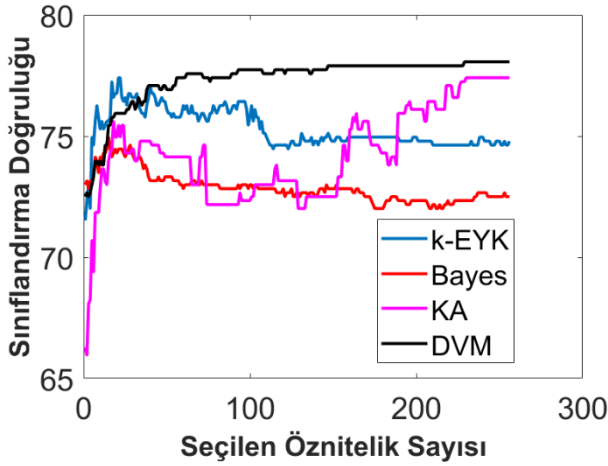


Şekil 12. KBA öznitelik ağırlıklandırma ve normalizasyon uygulanmış sınıflandırma sonuçları.

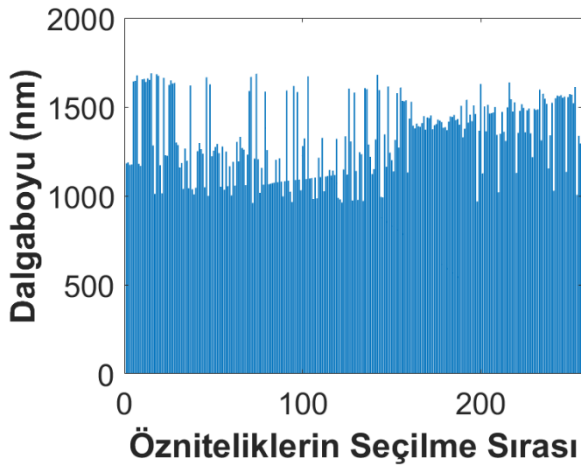


Şekil 13. Normalizasyon uygulanmış KBA öznitelik ağırlıklandırma sonuçları.

Şekil 14’te ise KBA öznitelik ağırlık belirleme yaklaşımına göre elde edilen normalizasyon uygulanmamış sonuçlar verilmiştir. Şekil 15’te ise bu sonuçların dikkate alınan özniteliklerin sırası bar grafiği ile gösterilmiştir. *k-EYK* sınıflandırıcısı ile en yüksek SD değerini ilk 21 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm kullanılarak %77.41 olarak elde edilirken, Bayes ile sadece ilk 15 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm değerleri ile %74.96 SD hesaplanmıştır. KA sınıflandırıcısı ise en yüksek SD değerini ilk 230 spektral ölçümleri kullanarak %77.41 olarak sağlarken, DVM ilk 229 en ağırlıklandırılmış spektral değerle %78.07 SD değeri sağlamıştır.



Şekil 14. KBA öznelik ağırlıklandırma ve normalizasyon uygulanmamış sınıflandırma sonuçları.



Şekil 15. Normalizasyon uygulanmamış KBA öznelik ağırlıklandırma sonuçları.

Vargılar ve Tartışma

Gıda üretim, dağıtım ve tüketim aşamalarında donanımsal ve yazılımsal gelişmelerle birlikte çeşitli tekniklerin kullanımı artmaktadır. Özellikle çiğ süt içeriğinin belirlenmesi amacıyla YKS kullanımı da önemli bir uygulama alanı bulmaktadır. Literatürde geniş spektrumda üzerinde yapılan görece başarılı çalışmalar olsa da özellikle bu çalışmaların sınırlı ölçekte veri kümeleri kullanmalarından dolayı bunların kararlılığı tartışılmaktadır. Bu çalışmada, 2023 yılında araştırmacıların kullanımına sunulmuş ve üzerinde raporlanan henüz bir çalışma olmayan 1224 örneklik çiğ süt veri kümesi kullanılmıştır. *k*-EYK sınıflandırıcısı ile KBA öznelik seçme yöntemi ile %82.32 oranında bir sınıflandırma başarımı elde edilmiştir. Bu oran sadece 46 en ağırlıklandırılmış spektral ölçüm kullanılarak elde edilmiştir. Önerilen yöntemde ayrıca standart sapma normalizasyon işleminin sınıflandırma doğruluğunu arttıracığı da ispatlanmıştır. Bu çalışma ile kullanıcıların ve araştırmacıların çok geniş spektrum kullanmalarına gerek bırakmadan daha pratik ve hızlı bir çiğ süt yağlılık oranı

belirleyebilmelerini sağlayabilen bir yöntem önerilmiştir. Bu araştırma literatürde çiğ sütün yağlılık oranını *az/orta/çok* yağlı olarak sınıflandıran ilk çalışma olduğundan sınıflandırma doğruluğu bakımından direkt bir karşılaştırma yapılamamıştır. Ancak, önerilen öznelik seçme yaklaşımı ile bu çalışmada sadece 46 spektral ölçüm kullanılması yeterli olurken [7], [8] ve [9] numaralı çalışmalarda sırasıyla 451, 451 ve 700 adet spektral ölçüm kullanılmıştır. Bu karşılaştırmadan tüm spektral ölçüm bölgesi kullanılması yerine KBA yaklaşımı ile en etkin spektral ölçümleri süt bileşenlerini belirleme için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Gelecek çalışmalarda sınıflandırma doğruluğunun arttırabilmesi için ileri ardışıl öznelik seçme yöntemi de test edilecektir. Ayrıca, spektral ölçüm değerlerinden çarpıklık, basıklık, ortalama değer, standart sapma ve türevlerinin varyansı gibi istatistiksel öznelikler hesaplanacak ve bu öznelikler ile sınıflandırmaların yapılması düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] H. G. Yakubu, Z. Kovacs, T. Toth, & G. Bazar, "The recent advances of near-infrared spectroscopy in dairy production—A review", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(3), 810-831, 2022.
- [2] H. Büning-Pfaue, "Analysis of water in food by near infrared spectroscopy", *Food Chemistry*, 82(1), 107-115, 2003.
- [3] D. Cozzolino, R. G. Damberg, L. Janik, W. U. Cynkar, & M. Gishen, "Analysis of grapes and wine by near infrared spectroscopy", *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 14(5), 279-289, 2006.
- [4] M. L. Vigni, C. Durante, G. Foca, A. Marchetti, A. Ulrici, & M. Cocchi, "Near infrared spectroscopy and multivariate analysis methods for monitoring flour performance in an industrial bread-making process", *Analytica chimica acta*, 642(1-2), 69-76, 2009.
- [5] S. Zeng, Z. Zhang, X. Cheng, X. Cai, M. Cao, & W. Guo, "Prediction of soluble solids content using near-infrared spectra and optical properties of intact apple and pulp applying PLSR and CNN", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 304, 123402, 2024.
- [6] A. Gastélum-Barrios, G. M. Soto-Zarazúa, A. Escamilla-García, M. Toledano-Ayala, G. Macías-Bobadilla, & D. Jauregui-Vazquez, "Optical methods based on ultraviolet, visible, and near-infrared spectra to estimate fat and protein in raw milk: A review", *Sensors*, 20(12), 3356, 2020.
- [7] S. Kawamura, M. Kawasaki, H. Nakatsuji, & M. Natsuga, "Near-infrared spectroscopic sensing system for online monitoring of milk quality during milking", *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 1, 37-43, 2007.
- [8] M. Kawasaki, S. Kawamura, M. Tsukahara, S. Morita, M. Komiya, & M. Natsuga, "Near-infrared spectroscopic sensing system for on-line milk quality assessment in a milking robot", *Computers and electronics in agriculture*, 63(1), 22-27, 2008.

- [9] B. Valenti, B. Martin, D. Andueza, C. Leroux, C. Labonne, F. Lahalle, & A. Ferlay, "Infrared spectroscopic methods for the discrimination of cows' milk according to the feeding system, cow breed and altitude of the dairy farm", *International Dairy Journal*, 32(1), 26-32, 2013.
- [10] A. Çelik, "Using Machine Learning Algorithms to Detect Milk Quality", *Eurasian Journal of Food Science and Technology*, 6(2), 76-87, 2022.
- [11] Y. Y. Pu, C. O'Donnell, J. T. Tobin, & N. O'Shea, "Review of near-infrared spectroscopy as a process analytical technology for real-time product monitoring in dairy processing", *International Dairy Journal*, 103, 104623, 2020.
- [12] A. Khan, M. T. Munir, W. Yu, & B. R. Young, "Near-infrared spectroscopy and data analysis for predicting milk powder quality attributes", *International Journal of Dairy Technology*, 74(1), 235-245, 2021.
- [13] M. Asaduzzaman, M. Kerschbaumer, M. Bodner, N. Haman, & M. Scampicchio, "Short-wave near infrared spectroscopy for the quality control of milk", *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 28(1), 3-9, 2020.
- [14] C. Evangelista, L. Basiricò, & U. Bernabucci, "An overview on the use of near infrared spectroscopy (NIRS) on farms for the management of dairy cows", *Agriculture*, 11(4), 296, 2021.
- [15] H. Chen, C. Tan, Z. Lin, & T. Wu, "Classification of different liquid milk by near-infrared spectroscopy and ensemble modeling", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 251, 119460, 2021.
- [16] J. A. Diaz-Olivares et al., "Near-infrared spectra dataset of milk composition in transmittance mode," *Data in Brief*, vol. 51, p. 109767, Dec. 2023.
- [17] O. Aydemir, "Prediction of Six Products from the Cucurbitaceae Family Using Visible/Near-Infrared Spectroscopic Data", *Journal of Testing and Evaluation*, 51(2), 979-988, 2023.
- [18] A. K. Agrawal, & G. Chakraborty, "Neighborhood component analysis to leverage the class label information during feature selection to enhance the damage classification performance", *Structures*, 57, 105174, 2023.
- [19] J. Dhar, & N. A. Ayele, "Multi-Tier Ensemble Learning Model with Neighborhood Component Analysis to Predict Health Diseases", *IEEE Access*, 9, 138677-138715, 2021.
- [20] S. Raghu, & N. Sriraam, "Classification of focal and non-focal EEG signals using neighborhood component analysis and machine learning algorithms", *Expert Systems with Applications*, 113, 18-32, 2018.



DoS and DDoS Attacks on Internet of Things and Their Detection by Machine Learning Algorithms

Mustafa Muhammed ŞİMŞEK¹, Emrah ATILGAN^{2*}

¹ Eskisehir Osmangazi University, Computer Engineering Department, mmustafasimsek23@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-2533-4934

² Eskisehir Osmangazi University, Computer Engineering Department, emrah.atilgan@ogu.edu.tr.com, Orcid No: 0000-0002-0395-9976

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 January 2024

Received in revised form

31 March 2024

Accepted 17 April 2024

Available online 30 June 2024

Keywords:

DoS, DDoS, IoT, Machine Learning, Classification

Doi: 10.24012/dumf.1421337

* Corresponding author

ABSTRACT

Machine Learning (ML) algorithms play a crucial role in fortifying the security of Internet of Things (IoT) environments. In this study, we focus on several key ML algorithms, namely Random Forest, AdaBoost, Decision Trees, Naive Bayes, Logistic Regression, Support Vector Machines (SVM), and k-Nearest Neighbors (k-NN). These algorithms are evaluated within the unique context of IoT security, employing an original dataset meticulously crafted for this study. The dataset OGU-IoT23 is designed to capture the intricacies of cyber threats in an IoT network, featuring attacks such as DDoS, HTTP Flood, SYN Flood, Port Scan, and UDP Flood. This original dataset OGU-IoT23 serves as a foundation for the comprehensive evaluation of ML algorithms, allowing us to assess their effectiveness in identifying and mitigating diverse attack patterns targeting IoT devices. The algorithms are examined based on their performance metrics such as accuracy, F1-score, precision, recall, and test accuracy, emphasizing their suitability for real-world IoT security applications. The results show that Random Forest and AdaBoost are the top performers in terms of performance metrics. The study aims to provide valuable insights into the strengths and limitations of these ML algorithms, aiding researchers and practitioners in developing resilient security measures designed for IoT settings.

Introduction

Machine Learning (ML) algorithms significantly contribute to improving effectiveness, efficiency and accuracy of various tasks in contemporary computing [1], [2]. This paper explores the performance and applicability of several prominent ML algorithms in the context of an Internet of Things (IoT) application. Specifically, it focuses on algorithms such as Random Forest, AdaBoost, Decision Trees, Naive Bayes, Logistic Regression, Support Vector Machines (SVM), and k-Nearest Neighbors (k-NN). Each algorithm is examined in terms of its characteristics, strengths, and weaknesses, and their performances are evaluated through a comprehensive experimental setup involving attacks on an IoT network.

The research commences by presenting the Random Forest algorithm, an ensemble learning technique extensively employed in tasks related to classification and regression [3]. It discusses its operation, emphasizing its ability to mitigate overfitting through randomness injection during training. Following Random Forest, the paper explores AdaBoost, a robust ensemble learning algorithm designed to enhance weak learners sequentially [4]. Subsequently, Decision Trees are introduced as versatile and interpretable ML algorithms commonly used for classification and regression [5]. The Naive Bayes algorithm, a probabilistic method based on Bayes' theorem, is presented as an efficient tool for classification tasks,

especially in natural language processing [6]. Logistic Regression, despite its name, is described as a classification algorithm widely used for binary classification tasks, valued for its simplicity and interpretability [7]. Support Vector Machines (SVMs) are discussed as powerful algorithms for supervised learning, excelling in scenarios with complex decision boundaries [8]. The paper further explores K-Nearest Neighbors (k-NN), a straightforward yet efficient algorithm that depends on proximity for tasks involving classification and regression [9]. Additionally, fundamental performance metrics such as the confusion matrix, accuracy, precision, recall, and F1-score are introduced to assess the effectiveness of the ML algorithms.

In the literature, several datasets have been utilized to test algorithms proposed for intrusion detection. One such dataset is KDD-CUP 99, which is generated from raw network traffic data collected from a simulated military network environment at the University of California. This dataset has been extensively used by various algorithms to classify network connections as "normal" or "intrusion". Faraknakian and Heikkonen [10] tested their Deep Auto-Encoder based Intrusion Detection system on the KDD-CUP99 dataset, achieving a binary classification accuracy of 96%. Khalvati et al. [11] introduced a hybrid learning approach for intrusion detection. They utilized 10% of the KDD-CUP99 dataset and created a new training dataset using K-Medoids clustering. Feature selection was performed using SVM, followed by evaluation with the Naive Bayes classifier.

The CICDDoS2019 dataset was created by a research institute called CIC at the University of New Brunswick in Canada to analyze DDoS attacks and design mitigation techniques. This dataset is considered significant as it covers 12 different types of DDoS attacks and comprises a large volume of 12,794,627 samples. Ullah and Mahmoud [12] introduced another large dataset, IoTID20, containing 625,783 samples from various IoT devices, including normal and four types of attack data: Scan, DoS, Mirai, and MitM. They evaluated seven supervised machine learning algorithms for both binary and multiclass classification.

The ToN-IoT dataset was created in 2019 at the Australian Defence Force Academy (ADFA), University of New South Wales, Canberra, in the Cyber Range and IoT Laboratories. It comprises information gathered from interconnected devices, as well as logs from Windows and Linux systems, along with network traffic data from the system. ToN-IoT mimics complex IoT infrastructures, including virtual machines, cloud layers, edges, and physical systems. Represented in CSV format, each record in the ToN-IoT dataset is categorized as either an attack or normal behavior. Ferrag et al. [13] proposed a deep learning-based intrusion detection system using convolutional neural networks (CNNs), artificial neural networks (ANNs), and recurrent neural networks (RNNs) on the CICDDoS2019 and ToN-IoT datasets. They achieved accuracies of 95% and 99% for multiclass and binary classification on the CICDDoS2019 dataset, respectively. On the ToN-IoT dataset, they attained a multiclass classification accuracy of 98%. Kılınçer and Katar [14] conducted a multi-class classification study using the Light Gradient Boosting Machine (LGBM) classifier on the ToN_IoT dataset. The results were compared with the similar studies, and it was observed that the presented method is one of the algorithms with the highest performance for classification.

Moving on to the experimental setup, the paper details the creation of an IoT application and the execution of cyber attacks, including DDoS, HTTP Flood, SYN Flood, Port Scan, and UDP Flood, on the established IoT network. Using the necessary hardware and software, a novel IoT traffic dataset was created, namely OGU-IoT23. The dataset characteristics and the software tools used for attacks, network traffic monitoring, and machine learning algorithms are comprehensively presented.

The results section provides insights into the performance of the ML algorithms, emphasizing accuracy, F1-score, precision, recall, and test accuracy. The confusion matrix results for each algorithm, as well as the training and testing times, are thoroughly examined. Notably, Random Forest and AdaBoost algorithms exhibit superior performance across a range of metrics, making them promising candidates for IoT security applications.

In summary, this paper contributes to the understanding of the strengths and limitations of diverse ML algorithms in the context of IoT security. A new dataset, OGU-IoT23, was developed in an authentic environment, and all machine learning algorithms were equitably evaluated using this dataset. Within this research, seven distinct machine learning algorithms were assessed across five different types of attacks. The empirical evaluation,

encompassing attack scenarios and diverse performance metrics, provides valuable insights for researchers and practitioners seeking effective solutions to secure IoT environments.

Method

Machine Learning Algorithms

In this section, a brief explanation will be given of the characteristics and functionalities of several pivotal Machine Learning (ML) algorithms employed in the field of cybersecurity, particularly within the context of an Internet of Things (IoT) application. These algorithms, namely Random Forest, AdaBoost, Decision Trees, Naive Bayes, Logistic Regression, Support Vector Machines (SVM), and k-Nearest Neighbors (k-NN), play a crucial role in enhancing the accuracy and efficiency of classification tasks. Each algorithm will be succinctly described, outlining its unique features, strengths, and applications. The subsequent exploration of their performances, evaluated through a comprehensive experimental setup involving cyber attacks on an IoT network, aims to provide valuable insights into their effectiveness and suitability for securing IoT environments.

Random Forest

The Random Forest algorithm proves to be a robust and effective tool in the realm of IoT security, specifically for classification tasks [15]. Leveraging an ensemble of decision trees generated during the training phase, Random Forest excels in detecting and categorizing diverse cyber threats targeting IoT networks. Its utilization entails building numerous decision trees by employing bootstrapped samples from the training data and evaluating random subsets of features at each decision node. In IoT security scenarios, Random Forest demonstrates prowess in handling high-dimensional datasets, offering versatility in identifying various attack types, including DDoS, Port Scan, and Syn Flood attacks [16]. The algorithm's strength lies in its ability to mitigate overfitting by introducing randomness, resulting in a more resilient and accurate model. However, it is essential to acknowledge potential disadvantages, such as increased computational complexity and potential difficulties in interpreting the decision-making process due to the ensemble nature of the algorithm. Despite these considerations, the overall performance and adaptability of Random Forest make it a compelling choice for bolstering the security of IoT systems [17].

AdaBoost

AdaBoost, short for Adaptive Boosting, emerges as a powerful ensemble learning algorithm with significant applications in IoT security for classification tasks [18]. Its distinctive feature lies in its ability to capacity to boost performance of weak learners sequentially, assigning higher weights to misclassified instances in each iteration. In the context of IoT security, AdaBoost proves valuable for its adaptability and efficiency in recognizing and mitigating various cyber threats. By iteratively training weak learners and emphasizing misclassified instances, AdaBoost creates a strong classifier capable of accurately identifying

complex attack patterns [19]. One of its primary advantages is its versatility, as it can be applied to different types of attacks within the IoT domain. However, AdaBoost's sensitivity to noisy data and outliers may pose challenges, and its performance might be affected if weak learners are too complex or if the dataset is noisy [20]. Nonetheless, AdaBoost's ability to create robust ensembles and improve overall classification accuracy makes it a compelling choice for bolstering the security of IoT systems.

Decision Trees

The Decision Tree algorithm stands as a versatile and interpretable tool in the landscape of IoT security, particularly for classification purposes [21]. In the realm of cybersecurity, Decision Trees recursively partition the input space based on features, creating a tree-like structure of decision nodes and leaves. In IoT security scenarios, Decision Trees excel in providing transparency into the decision-making process, aiding in the understanding of the identified attack patterns. The algorithm selects features at decision nodes to optimize classification criteria, such as Gini impurity for classification tasks [22]. While Decision Trees are intuitive and straightforward, offering a clear representation of decision logic, they may be susceptible to overfitting, especially when the trees are deep or complex. Techniques like pruning are often employed to address this concern. In the context of IoT security, Decision Trees showcase effectiveness in detecting and classifying various attacks, including DDoS, Port Scan, and SYN Flood attacks [23]. The simplicity, interpretability, and adaptability of Decision Trees render them valuable assets for fortifying the security of IoT environments.

Naive Bayes

In the domain of IoT security, the Naive Bayes algorithm stands out as a probabilistic classification tool widely utilized for its simplicity and efficiency. Leveraging Bayes' theorem and assuming feature independence, Naive Bayes computes the probability of a specific class given a set of features. The algorithm performs remarkably well in practice, especially in scenarios with high-dimensional datasets common in IoT applications [24]. In the context of IoT security, Naive Bayes demonstrates effectiveness in identifying and categorizing different attack types, with a notable aptitude for detecting DDoS attacks [25]. Due to its computational efficiency and straightforward implementation, Naive Bayes is well-suited for real-time applications and environments with restricted computational resources. However, the independence assumption may not always align with the intricacies of real-world datasets, posing a limitation to its application in certain contexts [26]. Despite this, Naive Bayes remains a valuable and pragmatic choice within the machine learning toolkit for IoT security applications.

Logistic Regression

Logistic Regression, despite its name, is a fundamental and widely applied algorithm in ML, particularly in the context of IoT security for many classification tasks [27]. It calculates the likelihood of an instance belonging to a

particular class by employing the logistic function. In IoT security applications, Logistic Regression proves valuable for its simplicity, interpretability, and efficiency, particularly in cases where the relationship between features and the target variable exhibits an approximately linear nature [28]. The algorithm estimates weights for each feature by minimizing a logistic loss function, typically through iterative optimization techniques like gradient descent. The logistic function transforms the linear combination of input features and weights into a range between 0 and 1, signifying the probability of belonging to the positive class. Logistic Regression excels in scenarios where transparency into decision-making is crucial. Nonetheless, its effectiveness might be hindered when dealing with non-linear relationships between features and the target variable, potentially constraining its ability to capture intricate attack patterns. Nonetheless, Logistic Regression remains a versatile and widely-used algorithm for binary classification tasks in IoT security due to its simplicity and interpretability [29].

Support Vector Machines

Support Vector Machines (SVMs) emerge as potent tools in the realm of IoT security for both classification and regression tasks. SVMs demonstrate excellence in situations where the objective is to identify a hyperplane that effectively separates data points belonging to different classes in the feature space. In IoT security applications, SVMs play a pivotal role in delineating complex decision boundaries, making them effective in scenarios with intricate attack patterns [30]. The algorithm aims to optimize the margin, which is defined as the gap between the hyperplane and the nearest data points of each class, thus promoting resilient generalization to unseen data. SVMs showcase resilience against overfitting, contributing to their suitability for diverse IoT security environments [31]. However, the computational complexity of SVMs may pose challenges in resource-constrained IoT devices. Additionally, the choice of an appropriate kernel function becomes crucial, impacting the algorithm's performance. SVMs are widely adopted in IoT security for tasks like image classification, text categorization, and bioinformatics, owing to their capability to handle high-dimensional data and discern intricate attack signatures [32].

K-Nearest Neighbors

K-Nearest Neighbors (k-NN) stands as a straightforward yet effective algorithm in the landscape of IoT security, applicable to both classification and regression tasks [33]. Functioning on the principle of proximity, k-NN makes predictions for new instances based on the majority class or the average value of the k-nearest neighbors in the feature space. In IoT security applications, k-NN offers simplicity and ease of interpretation, making it suitable for scenarios where transparency and simplicity are valued. Nonetheless, its performance sensitivity to the chosen parameter "k" and the employed distance metric, along with the trade-off between computational cost and accuracy, should be thoughtfully taken into account. k-NN is

particularly useful in IoT security applications where interpretability and simplicity are prioritized, and where a balance between computational cost and accuracy is acceptable [34].

Performance metrics

Confusion Matrix

The confusion matrix is a fundamental and versatile performance metric used primarily in classification tasks. It furnishes a comprehensive breakdown of the model's predictions, contrasting them with the actual class labels. (Table 1). The confusion matrix consists of four main components:

True Positive (TP): Corresponds to the instances accurately predicted as positive.

True Negative (TN): Denotes instances accurately predicted as negative.

False Positive (FP): Signifies instances inaccurately predicted as positive (Type I error).

False Negative (FN): Represents instances inaccurately predicted as negative (Type II error).

Table 1. Confusion Matrix

		Predicted Class	
		Positive	Negative
Actual Class	Positive	TP	FN
	Negative	FP	TN

Accuracy

Accuracy is the ratio of correctly classified instances to the total number of instances (Eq. 1).

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

Precision

Precision is the ratio of correctly predicted positive observations to the total predicted positives. It focuses on the accuracy of positive predictions (Eq. 2).

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

Recall (Sensitivity)

Recall, also referred to as Sensitivity, quantifies the proportion of correctly predicted positive observations relative to all observations within the actual class. It assesses the model's capacity to identify all pertinent instances (Eq. 3).

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

F1-Score

The F1-Score is the harmonic mean of precision and recall (Eq. 4).

$$\text{F1Skor} = 2 \times \left(\frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \right) \quad (4)$$

Experimental Setup

In this study, an IoT application has been designed using NodeMCU. To create the IoT application, an experimental environment has been established through communication between NodeMCU and the ThingSpeak cloud platform [35]. In this section, firstly, the hardware components and tools utilized in the developed IoT application are described. Subsequently, attention is given to cyber attacks conducted on the IoT application and the steps involved in creating the dataset.

Hardware

NodeMCU Development Board: NodeMCU is an open-source electronic circuit development board equipped with the ESP8266 Wi-Fi module (Figure 1). Its capability for easy internet connectivity has led to its extensive use in IoT projects requiring remote control and internet access. Its low power consumption makes it a preferred choice for IoT projects. NodeMCU can be programmed through the Arduino IDE. Power for the NodeMCU device is supplied through the built-in Micro USB connector. NodeMCU features 32 Kb RAM, 80 Kb DRAM, and 200 Kb Flash Memory (Parihar, 2019). In this study, communication with the thingspeak.com cloud platform is established using NodeMCU. NodeMCU is programmed using the Arduino IDE, and the necessary libraries for communication with the thingspeak.com cloud platform are installed and programmed.



Figure 1. NodeMCU with ESP8266 Wi-Fi module

Arduino IDE: Introduced by Arduino, Arduino IDE is software utilized for editing, compiling, and uploading code onto Arduino devices. It operates on the Arduino Java platform, making it easily accessible across different operating systems. In this study, software libraries from Arduino IDE, specifically the "ESP8266Wifi.h" and "ESP8266HTTPClient.h" libraries, have been employed.

ThingSpeak: ThingSpeak is an open-source and IoT-based platform that communicates over the internet using MQTT and HTTP protocols, storing data collected from objects and presenting it to users [35]. Through this platform, real-time tracking can be performed, allowing for the addition and removal of data, as well as analysis and control processes [36]. It is available for free use for one year and enables approximately 3 million messages to be sent. Data can be sent, recorded, and visualized every 15 seconds. In this study, ThingSpeak is utilized via NodeMCU to record and visualize data retrieved over the internet. To send data, it is necessary to create a channel after registering and logging into this web application (Figure 2).

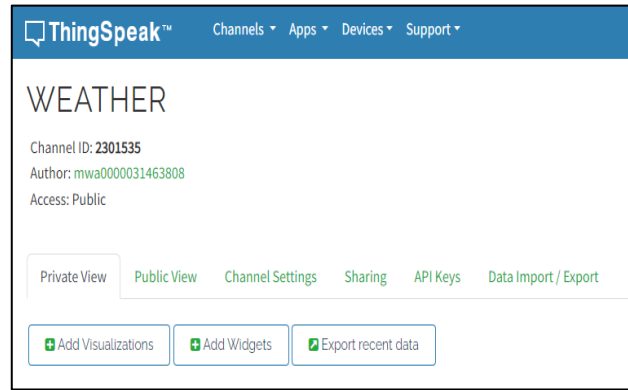


Figure 2. Creating a channel in ThingSpeak

IoT Experimental Environment

In this section, details regarding the communication among the devices used in the setup of the IoT experimental environment and the configurations are shared. As depicted in Figure 3, a experimental environment has been established in this study.

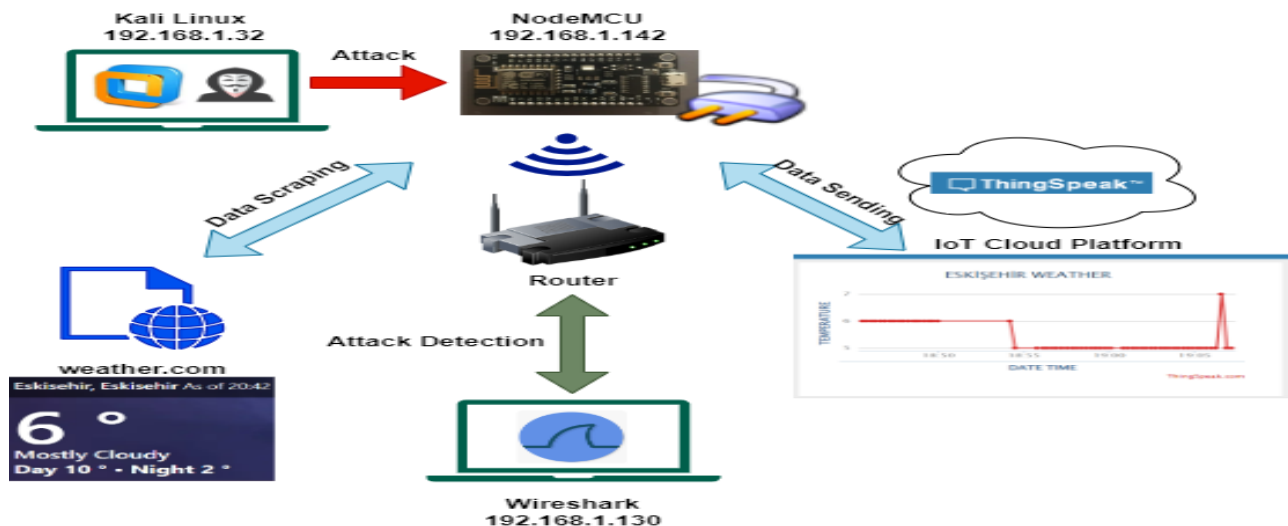


Figure 3. IoT experimental environment

In this established system, the IoT device with the IP address 192.168.1.xyz communicates wirelessly with the router in our network. The IoT device initially connects to the weather.com webpage and extracts real-time weather information for the city of Eskişehir through web scraping. Subsequently, it promptly transmits this acquired data to the Thingspeak cloud platform. The sent data can be viewed by users possessing the necessary API credentials. While the system continues its normal operation, diverse attacks are executed from the Kali Linux machine with the IP address 192.168.1.pq towards the IoT device. Throughout the ongoing attacks, network traffic is recorded by the machine with the IP address 192.168.1.abc, which is equipped with Wireshark. The process of recording under various attacks is carried out sequentially. The network traffic in the established platform is saved in CSV format. The steps of detecting and classifying the attacks are illustrated in Figure 4.

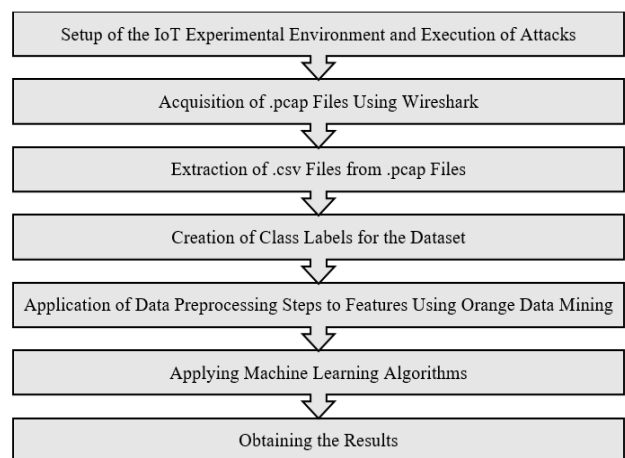


Figure 4. Flowchart of detection and classification of attacks.

Software

In this study, various attacks were conducted on the designed IoT network, and these attacks were monitored to record network data. Table 2 provides information on the attack tools, network traffic monitoring tools, cloud platform interface, and the software where machine learning algorithms were executed in this study.

Table 2. Utilized Software and Their Purposes

Software	Purpose
Wireshark	Network Traffic Monitoring
LOIC	Attack Tool
Hping3	Attack Tool
Orange Data Mining	Machine Learning Algorithms
Thingspeak	IoT Cloud Platform

Dataset

In this study, the aim is to create a balanced dataset encompassing attacks on IoT devices. For the desired dataset, various attacks, including DDoS, HTTP Flood, Port Scan, SYN Flood, and UDP Flood, were performed on an IoT device in a laboratory environment. Kali Linux was used to carry out the attacks and to detect them afterward using the Pcap files captured by Wireshark.

Table 3. Dataset Characteristics

No	Features	Area	Explanation
1	Total Length	ip.len	Total Length
2	Don't Fragment	ip.flags.df	Fragmentation Value
3	Time To Live	ip.ttl	Packet Time-to-Live
4	Protocol	ip.proto	IP Protocol Type
5	Calculated Window Size	tcp.window_size	TCP Packet Window Size
6	Acknowledgment Number	tcp.ack	TCP Packet Acknowledgment Number
7	Sequence Number	tcp.seq	TCP Packet Sequence Number
8	Length	bytes	Packet Length
9	TCP Segment Len	tcp.len	TCP Packet Segment Length
10	Source Port	tcp.srcport	TCP Packet Source Port
11	Header Length	ip.hdr_len	IP Packet Header Length
12	Class	Class	Class Label

The dataset, OGU-IoT23 comprises a total of 116,819 instances, featuring six different classes, including normal packets. Since the dataset is sufficiently large and diverse, a fixed proportion data sampling was used, allocating 80% for training and 20% for testing. This method leveraged the dataset's richness for robust model evaluation. Moreover, to

address potential overfitting, we employed regularization techniques and validation procedures during training. For the calculation of performance metrics, we utilized 5-fold Cross-Validation, ensuring a comprehensive assessment of the model's performance across different subsets of the data.

As seen in Table 3, our dataset is composed of 11 features and consists of six classes: DDoS, HTTP Flood, Normal, Port Scan, SYN Flood, and UDP Flood. The dataset includes 20,001 examples for the DDoS class, 19,970 examples for the HTTP Flood class, 18,886 examples for the Normal class, 18,854 examples for the Port Scan class, 20,707 examples for the SYN Flood class, and 18,401 examples for the UDP Flood class. In order to expedite the classification process, 9 out of the 11 features were selected using the Information Gain algorithm. The weight rankings of the Information Gain algorithm are illustrated in Figure 5.

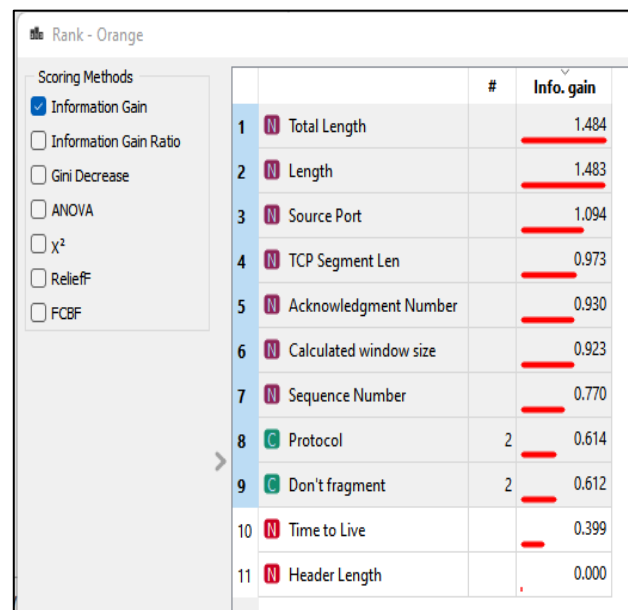


Figure 5. Features Selected with Information Gain

Attacks

In this study, DDoS, HTTP Flood, SYN Flood, Port Scan, and UDP Flood attacks were conducted, and attempts were made to detect them using machine learning algorithms determined by monitoring network traffic.

DDoS Attack

A DDoS attack involves a malevolent effort to disrupt a targeted device by overwhelming it with a load far beyond normal limits [37]. DDoS attacks are executed by utilizing multiple computer systems as sources of attack traffic. Such attacks prevent regular traffic from reaching its intended destination [38]. In this study, the Hping3 tool was employed to conduct a DDoS attack on the IoT device. As depicted in Figure 6, the data loss during attack periods, as observed from the ThingSpeak platform, aligns temporally with the Wireshark I/O Graphs.

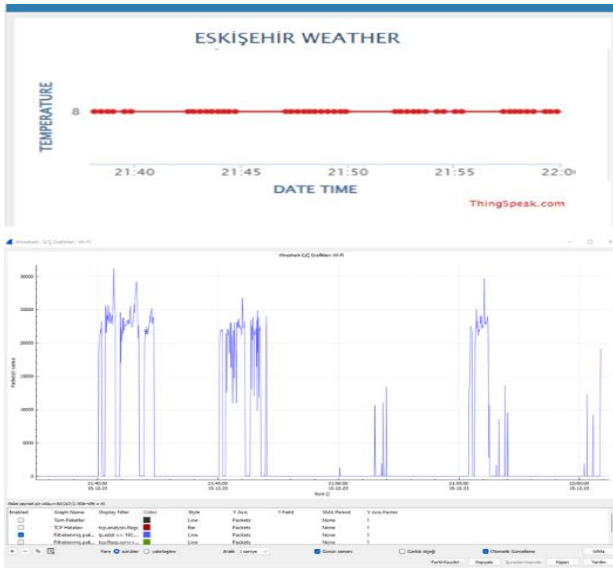


Figure 6. ThingSpeak and Wireshark Graphs During DDoS Attack

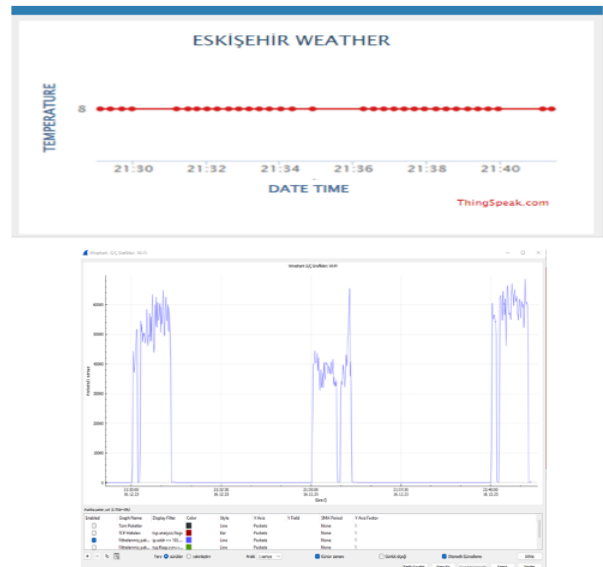


Figure 7. ThingSpeak and Wireshark Graphs During SYN Flood Attack

HTTP Flood Attack

HTTP flood attack involves overwhelming a device by inundating it with a substantial volume of HTTP requests, depleting the device's resources and rendering it non-operational [39]. These requests are often fake or deceptive and are made to exhaust the device's resources. In this study, the IoT device sending data to the ThingSpeak platform was subjected to HTTP Flood attacks at intervals using the LOIC tool.

SYN Flood Attack

A SYN Flood attack is executed to deplete the resources of the target device and render it inoperable [40]. During a SYN Flood attack, the assailant sends numerous SYN messages to the target device. For each SYN received, the device creates an entry in its connection table and responds with a SYN-ACK message. The attacker either does not send an ACK message or frequently provides an incorrect IP address in SYN packets, causing the target device not to receive SYN-ACK responses. As the attacker persists in sending SYN messages, the connection table of the target device becomes full, and the device cannot respond to any connection requests. Exhausting all resources, the target device generates a denial-of-service and cannot establish connections with clients [41]. In this study, the IoT device sending data to the ThingSpeak platform was subjected to SYN Flood attacks at intervals. The impact of the attack can be traced in the ThingSpeak platform's provided widgets and Wireshark I/O graphs. As observed in Figure 7, data transmission from the IoT device to the ThingSpeak platform is disrupted during three different time intervals when the attack is executed.

Port Scan Attack

A Port Scan attack aims to discover open ports and exploit a known security vulnerability by sending requests to device port addresses [42]. In this study, the IoT device sending weather information to the ThingSpeak platform was subjected to a port scan attack using the Hping3 tool. The adverse effects of the Port Scan attack can be observed in the widgets provided by the ThingSpeak platform and in the Wireshark I/O graphs. As illustrated in Figure 8, the transmission of data from the IoT device to the ThingSpeak platform experiences disruptions during three distinct time intervals when the attack is carried out.

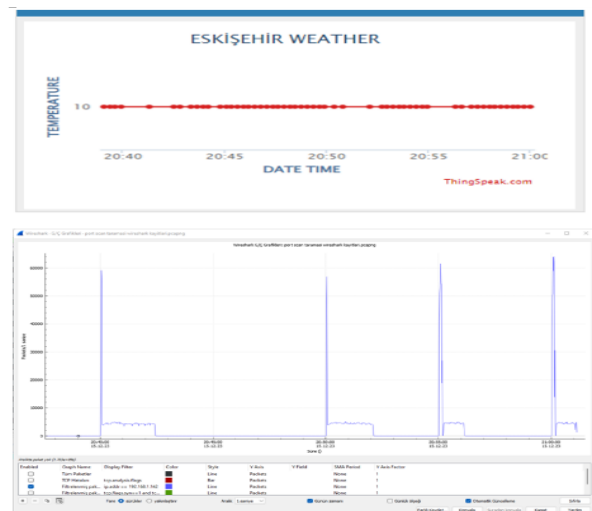


Figure 8. ThingSpeak and Wireshark Graphs During Port Scan Attack

UDP Flood Attack

A UDP Flood attack is a kind of attack that aims to render the target device inoperable by consuming its network bandwidth with UDP packets. UDP Flood attacks

can target the port or IP addresses of a device within a network, either randomly or specifically [43]. In this study, the IoT device sending data to the ThingSpeak platform was subjected to a UDP Flood attack using the LOIC tool.

Results

In this study, the dataset collected using the Orange Data Mining application was trained. For the training set, 80% of

the data was utilized, while 20% was reserved for the test set. Subsequently, feature selection was performed using information gain from the dataset. A model was then created using seven different classification algorithms: AdaBoost, k-Nearest Neighbors (k-NN), Logistic Regression, Naive Bayes, Random Forest, Support Vector Machine (SVM), and Decision Tree. The structure of the model is illustrated in Figure 9.

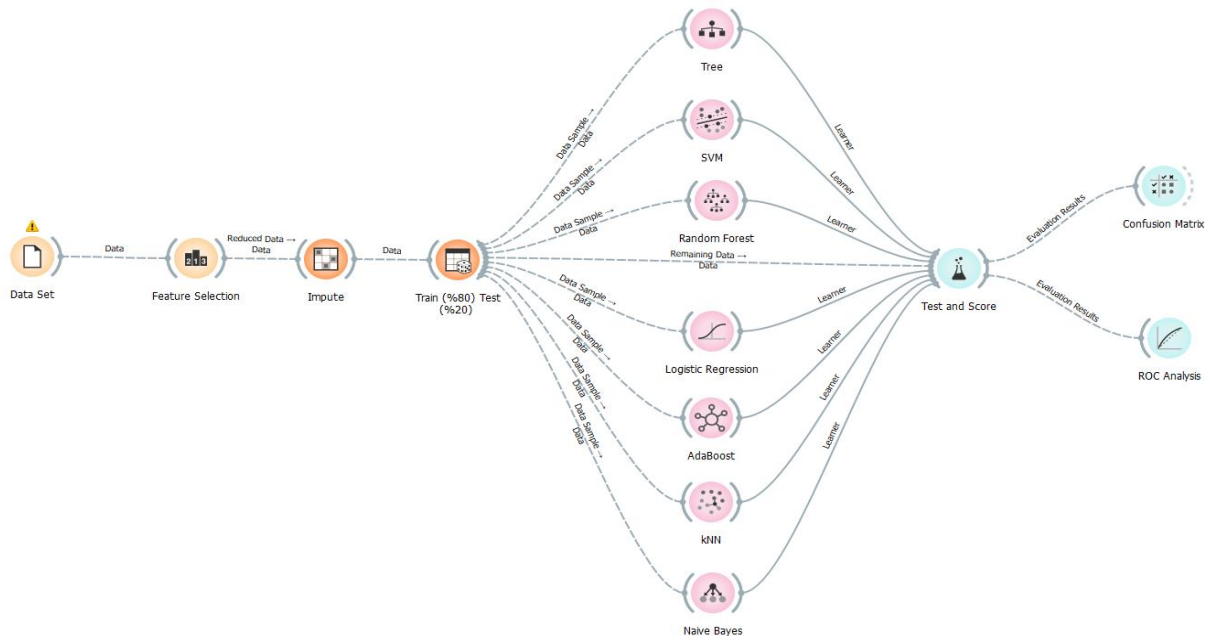


Figure 9. Machine Learning Model Workflow Diagram

The performance metrics of the created model have been calculated. Among the algorithms, the Random Forest algorithm yields the highest accuracy score compared to the other six algorithms, with a score of 99%. The lowest accuracy score is obtained with the Logistic Regression classification algorithm, achieving a percentage accuracy of 51%. The results are presented in Table 4.

Table 4. Comparison of ML Algorithms

Model	Accuracy	F1 Score	Precision	Recall
AdaBoost	0.997	0.997	0.997	0.997
k-NN	0.576	0.575	0.591	0.576
Logistic Regression	0.515	0.458	0.468	0.515
Naive Bayes	0.889	0.885	0.920	0.889
Random Forest	0.997	0.997	0.997	0.997
SVM	0.560	0.567	0.613	0.560
Decision Tree	0.990	0.99	0.990	0.990

The confusion matrix results of the models were obtained separately for each model. In Figure 10, the confusion matrix results of the AdaBoost algorithm are presented. It is observed that the AdaBoost algorithm successfully detects Port Scan and SYN Flood attacks more

effectively compared to other attacks. According to the confusion matrix results, the AdaBoost algorithm is identified as one of the successful detection algorithms. In this experiment, number of estimators was set to 50 and linear regression loss function was used.

		Predicted						Σ
		Ddos	Http Flood	Normal	Port Scan	Syn Flood	Udp Flood	
Actual	Ddos	13900	0	0	0	0	0	13900
	Http Flood	2	13508	17	1	0	72	13600
	Normal	7	5	12636	0	0	32	12680
	Port Scan	0	0	5	12545	0	0	12550
	Syn Flood	0	3	0	0	14207	0	14210
	Udp Flood	0	73	14	0	0	12413	12500
Σ		13909	13589	12672	12546	14207	12517	79440

Figure 10. The confusion matrix of the AdaBoost algorithm.

In Figure 11, the confusion matrix results of the k-NN algorithm are depicted. It is observed that the k-NN algorithm successfully detects HTTP Flood attacks more effectively compared to other attacks. For this test, k was taken as 5, Euclidean used as metric type and Uniform used as weight.

		Predicted						
		Ddos	Http Flood	Normal	Port Scan	Syn Flood	Udp Flood	Σ
Actual	Ddos	6497	0	21	3278	3261	843	13900
	Http Flood	3	13536	23	2	0	36	13600
	Normal	56	4	12448	42	34	96	12680
	Port Scan	4533	0	17	4211	3056	733	12550
	Syn Flood	5610	0	17	3353	4389	841	14210
	Udp Flood	3053	200	724	1803	2033	4687	12500
Σ		19752	13740	13250	12689	12773	7236	79440

Figure 11. The confusion matrix of the k-NN algorithm.

In Figure 12, the confusion matrix results of the Logistic Regression algorithm are presented. Similar to the k-NN algorithm, it is noted that the Logistic Regression algorithm successfully detects HTTP Flood attacks more effectively compared to other attacks. In this experiment, Ridge (L2) was applied as regularization and C (strength) was set to 1.

		Predicted						
		Ddos	Http Flood	Normal	Port Scan	Syn Flood	Udp Flood	Σ
Actual	Ddos	8259	2	79	0	5560	0	13900
	Http Flood	5	13574	11	0	10	0	13600
	Normal	69	882	6781	1	2278	2669	12680
	Port Scan	385	960	7	0	11196	2	12550
	Syn Flood	3171	0	42	0	10997	0	14210
	Udp Flood	2034	2802	1533	3	4790	1338	12500
Σ		13923	18220	8453	4	34831	4009	79440

Figure 12. The confusion matrix of the Logistic Regression algorithm.

In Figure 13, the confusion matrix results of the Naive Bayes algorithm are displayed. It is observed that the Naive Bayes algorithm successfully detects DDoS attacks more effectively compared to other attacks. Here, Laplace method was selected as smoothing parameter and Information Gain was used for Feature Selection.

		Predicted						
		Ddos	Http Flood	Normal	Port Scan	Syn Flood	Udp Flood	Σ
Actual	Ddos	13900	0	0	0	0	0	13900
	Http Flood	0	13572	25	3	0	0	13600
	Normal	68	106	12479	5	0	22	12680
	Port Scan	0	960	5	11585	0	0	12550
	Syn Flood	0	0	0	6916	7294	0	14210
	Udp Flood	0	657	0	0	0	11843	12500
Σ		13968	15295	12509	18509	7294	11865	79440

Figure 13. The confusion matrix of the Naive Bayes algorithm.

In Figure 14, the confusion matrix results of the Random Forest algorithm are presented. The Random Forest algorithm is observed to successfully detect DDoS, Port Scan, and Syn Flood attacks more effectively compared to other attacks. According to the confusion matrix results, the Random Forest is identified as one of the successful

detection algorithms. Here, number of trees was set to 7 and subsets were not split if less than 5.

		Predicted						
		Ddos	Http Flood	Normal	Port Scan	Syn Flood	Udp Flood	Σ
Actual	Ddos	13900	0	0	0	0	0	13900
	Http Flood	0	13531	23	0	0	46	13600
	Normal	8	1	12630	3	0	38	12680
	Port Scan	0	0	5	12545	0	0	12550
	Syn Flood	0	0	3	0	14207	0	14210
	Udp Flood	0	47	7	0	0	12446	12500
Σ		13908	13579	12668	12548	14207	12530	79440

Figure 14. The confusion matrix of the Random Forest algorithm.

In Figure 15, the confusion matrix results of the SVM algorithm are depicted. Similar to the Naive Bayes algorithm, it is observed that the SVM algorithm successfully detects DDoS attacks more effectively compared to other attacks. In this experiment, RBF was used as Kernel and iteration limit was set to 100.

		Predicted						
		Ddos	Http Flood	Normal	Port Scan	Syn Flood	Udp Flood	Σ
Actual	Ddos	13900	0	0	0	0	0	13900
	Http Flood	0	4421	2839	3	0	6337	13600
	Normal	28	3891	5661	1219	13	1868	12680
	Port Scan	0	0	269	3914	2237	6130	12550
	Syn Flood	0	4	3	45	9616	4542	14210
	Udp Flood	0	803	2636	905	1111	7045	12500
Σ		13928	9119	11408	6086	12977	25922	79440

Figure 15. The confusion matrix of the SVM algorithm.

In Figure 16, the confusion matrix results of the Decision Tree algorithm are presented. The Decision Tree algorithm is observed to successfully detect DDoS, Port Scan, and SYN Flood attacks more effectively compared to other attacks. According to the confusion matrix results, the Decision Tree algorithm is identified as one of the successful detection algorithms. For this test, minimum number of instances in leaves was set to 5 and the limit of the maximal tree dept was chosen as 100.

		Predicted						
		Ddos	Http Flood	Normal	Port Scan	Syn Flood	Udp Flood	Σ
Actual	Ddos	13900	0	0	0	0	0	13900
	Http Flood	3	13570	6	2	2	17	13600
	Normal	35	57	12395	0	0	193	12680
	Port Scan	0	0	7	12538	0	5	12550
	Syn Flood	0	11	0	1	14198	0	14210
	Udp Flood	0	401	0	0	0	12099	12500
Σ		13938	14039	12408	12541	14200	12314	79440

Figure 17. The confusion matrix of the Decision Tree algorithm.

In this study, the calculated training and testing times during the classification process are presented in Table 5. When evaluated alongside other performance metrics, particularly the Naïve Bayes and Decision Tree algorithms exhibit notably faster training and testing times compared to other algorithms.

As a summary of the some studies along with their datasets and this study is briefly presented in Table 6. By examining these studies collectively, readers gain insights into the performance and applicability of intrusion detection systems across different dataset environments and classification types, thus aiding in the selection and evaluation of suitable methodologies for securing networked systems against cyber threats.

Table 5. The training and testing times of the algorithms.

Model	Training (sec)	Test (sec)
AdaBoost	22.420	2.164
k-NN	0.373	2.287
Logistic Regression	2.431	0.097
Naive Bayes	0.222	0.058
Random Forest	0.652	0.163
SVM	20.315	19.285
Decision Tree	0.307	0.017

Table 6. Comparison of Intrusion Detection Studies: Datasets, Classifications, Dataset Types, and Accuracies

Research	Dataset	Classification	Dataset Type	Accuracy
(Farahnakian & Heikkonen, 2018)	KDD CUP 99	Binary	Simulation	96%
(Khalvati, Keshtgary, & Rikhtegar, 2018)	KDD CUP 99	Multi-Class	Simulation	91%
(Ullah & Mahmoud, 2020)	IoTID20	Multi-Class Binary	Real Environment	100% 100%
(Ferrag, Shu , Djallel , & Choo, 2021)	CICDDoS2019	Multi-Class Binary	Simulation	95% 99%
(Kılınçer, İ. F., & Katar, O. 2023)	ToN-IoT	Multi-Class	Simulation	99%
Our Work	OGU-IoT23 (our novel dataset)	Multi-Class	Real Environment	99%

Discussion

This study extensively explores the performance of prominent machine learning (ML) algorithms in securing Internet of Things (IoT) applications, focusing on Random Forest, AdaBoost, Decision Trees, Naive Bayes, Logistic Regression, Support Vector Machines (SVM), and k-Nearest Neighbors (k-NN). Through a comprehensive experimental setup involving cyber attacks on an IoT network, the algorithms are assessed for their strengths and weaknesses.

The experimental setup involves the creation of an IoT application using NodeMCU and the execution of various cyber attacks, including DDoS, HTTP Flood, SYN Flood, Port Scan, and UDP Flood. A novel dataset named OGU-IoT23 was generated within a real-world environment, and all machine learning algorithms were fairly assessed using this dataset. The dataset characteristics, hardware components, and tools used for attacks, network traffic monitoring, and ML algorithms are comprehensively presented.

Notably, the performance discrepancies observed among the ML algorithms underscore the necessity of selecting suitable algorithms tailored to the specific requirements of IoT security. While Random Forest and AdaBoost exhibit remarkable accuracy across diverse attack scenarios, algorithms like Logistic Regression and

k-Nearest Neighbors (k-NN) demonstrate comparatively lower performance metrics, reflecting the varied strengths and weaknesses inherent in each algorithm. The ensemble nature of Random Forest and AdaBoost enhances their robustness against a wide range of attack vectors, while simpler algorithms like Logistic Regression and Naive Bayes may struggle to capture the complexities of IoT network traffic.

It's imperative to assess the robustness and generalization capabilities of ML algorithms beyond the experimental setup, necessitating further validation across diverse datasets and real-world IoT deployment scenarios. Additionally, the choice of dataset significantly influences algorithm performance and generalizability. Although the OGU-IoT23 dataset used in this study reflects realistic IoT network traffic, future research could explore the transferability of ML models trained on diverse datasets to enhance their applicability across different IoT deployment environments and attack landscapes. Integrating ML-based intrusion detection systems with broader cybersecurity frameworks is essential for effective IoT security, ensuring a comprehensive defense strategy against evolving cyber threats.

Conclusion

This study presents a comprehensive exploration of the performance of prominent machine learning (ML)

algorithms in securing Internet of Things (IoT) applications. Through rigorous experimentation involving cyber attacks on an IoT network, the study assesses the strengths and weaknesses of various ML algorithms. Each algorithm is introduced with its unique characteristics and applications, highlighting their suitability for different IoT security contexts. Results demonstrate Random Forest and AdaBoost as top performers, showcasing superior accuracy and effectiveness across multiple attack scenarios. The study underscores the importance of selecting appropriate algorithms based on specific IoT application requirements and attack scenarios. It provides valuable insights for researchers and practitioners seeking effective solutions to secure IoT environments, considering both algorithmic performance and computational efficiency. By understanding the strengths and limitations of different ML algorithms, developers can make informed decisions when designing and deploying intrusion detection systems for IoT security, ultimately contributing to the advancement of IoT security practices.

Ethics committee approval

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared"

Conflict of Interest

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared"

Authors' Contributions

First Author: Acquisition of data, Analysis and interpretation of data

Second Author: Study conception and design, Drafting of manuscript, Critical revision

References

- [1] I. H. Sarker, "Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions," *SN Comput. Sci.*, vol. 2, no. 3, p. 160, May 2021, doi: 10.1007/s42979-021-00592-x.
- [2] B. Mahesh, "Machine Learning Algorithms - A Review," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 381–386, 2020, doi: 10.21275/ART20203995.
- [3] L. Breiman, "Random Forests," *Mach. Learn.*, vol. 45, pp. 5–32, 2001.
- [4] Y. CAO, Q.-G. MIAO, J.-C. LIU, and L. GAO, "Advance and Prospects of AdaBoost Algorithm," *Acta Autom. Sin.*, vol. 39, no. 6, pp. 745–758, Jun. 2013, doi: 10.1016/S1874-1029(13)60052-X.
- [5] B. Charbuty and A. Abdulazeez, "Classification Based on Decision Tree Algorithm for Machine Learning," *J. Appl. Sci. Technol. Trends*, vol. 2, no. 01, pp. 20–28, Mar. 2021, doi: 10.38094/jastt20165.
- [6] A. Yasar and M. M. Saritas, "Performance Analysis of ANN and Naive Bayes Classification Algorithm for Data Classification," *Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 88–91, 2019, doi: 10.18201/ijisae.2019252786.
- [7] R. D. Joshi and C. K. Dhakal, "Predicting Type 2 Diabetes Using Logistic Regression and Machine Learning Approaches," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 14, p. 7346, Jul. 2021, doi: 10.3390/ijerph18147346.
- [8] J. Cervantes, F. Garcia-Lamont, L. Rodríguez-Mazahua, and A. Lopez, "A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends," *Neurocomputing*, vol. 408, pp. 189–215, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2019.10.118.
- [9] P. Cunningham and S. J. Delany, "k-Nearest Neighbour Classifiers - A Tutorial," *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 6, pp. 1–25, Jul. 2022, doi: 10.1145/3459665.
- [10] F. Farahnakian and J. Heikkonen, "A deep auto-encoder based approach for intrusion detection system," in *2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, Feb. 2018, pp. 178–183, doi: 10.23919/ICACT.2018.8323688.
- [11] L. Khalvati, M. Keshtgary, and N. Rikhtegar, "Intrusion Detection based on a Novel Hybrid Learning Approach," *J. AI Data Min.*, vol. 6, no. 1, pp. 157–162, 2018, doi: 10.22044/jadm.2017.979.
- [12] I. Ullah and Q. H. Mahmoud, "A Scheme for Generating a Dataset for Anomalous Activity Detection in IoT Networks," in *Advances in Artificial Intelligence*, 2020, pp. 508–520.
- [13] M. A. Ferrag, L. Shu, H. Djallel, and K.-K. R. Choo, "Deep Learning-Based Intrusion Detection for Distributed Denial of Service Attack in Agriculture 4.0," *Electronics*, vol. 10, no. 11, p. 1257, May 2021, doi: 10.3390/electronics10111257.
- [14] İ. F. KILINÇER and O. KATAR, "A new Intrusion Detection System for Secured IoT/IIoT Networks based on LGBM," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 11, no. 2, pp. 321–328, Jun. 2023, doi: 10.29109/gujsc.1173286.
- [15] S. K. Lakshmanaprabu, K. Shankar, M. Ilayaraja, A. W. Nasir, V. Vijayakumar, and N. Chilamkurti, "Random forest for big data classification in the internet of things using optimal features," *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 10, no. 10, pp. 2609–2618, Oct. 2019, doi: 10.1007/s13042-018-00916-z.
- [16] P. Kumar, H. Bagga, B. S. Netam, and V. Uduthalappally, "SAD-IoT: Security Analysis of DDoS Attacks in IoT Networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 122, no. 1, pp. 87–108, Jan. 2022, doi: 10.1007/s11277-021-08890-6.

- [17] W. Feng, C. Ma, G. Zhao, and R. Zhang, "FSRF: An Improved Random Forest for Classification," in *2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, Aug. 2020, pp. 173–178, doi: 10.1109/AEECA49918.2020.9213456.
- [18] F. Wang, D. Jiang, H. Wen, and H. Song, "Adaboost-based security level classification of mobile intelligent terminals," *J. Supercomput.*, vol. 75, no. 11, pp. 7460–7478, Nov. 2019, doi: 10.1007/s11227-019-02954-y.
- [19] S. Rachmadi, S. Mandala, and D. Oktaria, "Detection of DoS Attack using AdaBoost Algorithm on IoT System," in *2021 International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA)*, Oct. 2021, pp. 28–33, doi: 10.1109/ICoDSA53588.2021.9617545.
- [20] E. Nazarenko, V. Varkentin, and T. Polyakova, "Features of Application of Machine Learning Methods for Classification of Network Traffic (Features, Advantages, Disadvantages)," in *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Oct. 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934236.
- [21] M. Douiba, S. Benkirane, A. Guezzaz, and M. Azrou, "An improved anomaly detection model for IoT security using decision tree and gradient boosting," *J. Supercomput.*, vol. 79, no. 3, pp. 3392–3411, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11227-022-04783-y.
- [22] M. A. Bouke, A. Abdullah, S. H. ALshatebi, M. T. Abdullah, and H. El Atigh, "An intelligent DDoS attack detection tree-based model using Gini index feature selection method," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 98, p. 104823, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.micpro.2023.104823.
- [23] M. Aamir, S. S. H. Rizvi, M. A. Hashmani, M. Zubair, and J. A. . Usman, "Machine Learning Classification of Port Scanning and DDoS Attacks: A Comparative Analysis," *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 215–229, Jan. 2021, doi: 10.22581/muet1982.2101.19.
- [24] L. Chen and S. Wang, "Automated feature weighting in naive bayes for high-dimensional data classification," in *Proceedings of the 21st ACM international conference on Information and knowledge management*, Oct. 2012, pp. 1243–1252, doi: 10.1145/2396761.2398426.
- [25] A. Mehmood, M. Mukherjee, S. H. Ahmed, H. Song, and K. M. Malik, "NBC-MAIDS: Naïve Bayesian classification technique in multi-agent system-enriched IDS for securing IoT against DDoS attacks," *J. Supercomput.*, vol. 74, no. 10, pp. 5156–5170, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11227-018-2413-7.
- [26] J. Ren, S. D. Lee, X. Chen, B. Kao, R. Cheng, and D. Cheung, "Naive Bayes Classification of Uncertain Data," in *2009 Ninth IEEE International Conference on Data Mining*, Dec. 2009, pp. 944–949, doi: 10.1109/ICDM.2009.90.
- [27] K. Prathapchandran and T. Janani, "A Trust-Based Security Model to Detect Misbehaving Nodes in Internet of Things (IoT) Environment using Logistic Regression," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1850, no. 1, p. 012031, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1850/1/012031.
- [28] N. K. Sahu and I. Mukherjee, "Machine Learning based anomaly detection for IoT Network: (Anomaly detection in IoT Network)," in *2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, Jun. 2020, pp. 787–794, doi: 10.1109/ICOEI48184.2020.9142921.
- [29] F. Abbasi, M. Naderan, and S. E. Alavi, "Anomaly detection in Internet of Things using feature selection and classification based on Logistic Regression and Artificial Neural Network on N-BaIoT dataset," in *2021 5th International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*, May 2021, pp. 1–7, doi: 10.1109/IoT52625.2021.9469605.
- [30] C. Ioannou and V. Vassiliou, "Network Attack Classification in IoT Using Support Vector Machines," *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 10, no. 3, p. 58, Aug. 2021, doi: 10.3390/jsan10030058.
- [31] A. Mubarakali, K. Srinivasan, R. Mukhalid, S. C. B. Jaganathan, and N. Marina, "Security challenges in internet of things: Distributed denial of service attack detection using support vector machine-based expert systems," *Comput. Intell.*, vol. 36, no. 4, pp. 1580–1592, Nov. 2020, doi: 10.1111/coim.12293.
- [32] M. Al-Akhras, M. Alawairdhi, A. Alkoudari, and S. Atawneh, "Using Machine Learning to Build a Classification Model for IoT Networks to Detect Attack Signatures," *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 12, no. 6, pp. 99–116, Nov. 2020, doi: 10.5121/ijcnc.2020.12607.
- [33] M. Mohy-eddine, A. Guezzaz, S. Benkirane, and M. Azrou, "An efficient network intrusion detection model for IoT security using K-NN classifier and feature selection," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 15, pp. 23615–23633, Jun. 2023, doi: 10.1007/s11042-023-14795-2.
- [34] Y. Liao and V. R. Vemuri, "Use of K-Nearest Neighbor classifier for intrusion detection," *Comput. Secur.*, vol. 21, no. 5, pp. 439–448, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0167-4048(02)00514-X.
- [35] M. A. Gómez Moreira, D. Oldenhof, and L.

- Teernstra, "ThingSpeak – an API and Web Service for the Internet of Things," *World Wide Web*. 2014, [Online]. Available: https://staas.home.xs4all.nl/t/swtr/documents/wt2014_thingspeak.pdf.
- [36] D. Parida, A. Behera, J. K. Naik, S. Pattanaik, and R. S. Nanda, "Real-time Environment Monitoring System using ESP8266 and ThingSpeak on Internet of Things Platform," in *2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*, May 2019, pp. 225–229, doi: 10.1109/ICCS45141.2019.9065451.
- [37] I. Ozcelik and R. R. Brooks, *Distributed Denial of Service Attacks*. CRC Press, 2020.
- [38] K. Sonar and H. Upadhyay, "A survey: DDOS Attack on Internet of Things," *Int. J. Eng. Res. Dev.*, vol. 10, no. 11, pp. 58–63, 2014.
- [39] F. Moldovan, P. Satmarean, and C. Oprisa, "An Analysis of HTTP Attacks on Home IoT Devices," in *2020 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, May 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/AQTR49680.2020.9129980.
- [40] N. Abughazaleh, R. Bin, M. Btish, and H. M., "DoS Attacks in IoT Systems and Proposed Solutions," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 176, no. 33, pp. 16–19, Jun. 2020, doi: 10.5120/ijca2020920397.
- [41] K. Geetha and N. Sreenath, "SYN flooding attack - Identification and analysis," in *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*, Feb. 2014, pp. 1–7, doi: 10.1109/ICICES.2014.7033828.
- [42] Q. A. Al-Haija, E. Saleh, and M. Alnabhan, "Detecting Port Scan Attacks Using Logistic Regression," in *2021 4th International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, Dec. 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/ISAECT53699.2021.9668562.
- [43] L. Huraj, M. Simon, and T. Horak, "IoT Measuring of UDP-Based Distributed Reflective DoS Attack," in *2018 IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Sep. 2018, pp. 000209–000214, doi: 10.1109/SISY.2018.8524703.



PSO ile Optimize Edilen Bulanık Mantık Kontrolörü ile LabVIEW Platformunda DA Motor Kontrolü

DC Motor Control on LabVIEW Platform with Fuzzy Logic Controller Optimized with PSO

Hasan Güler^{1*}, Hakan Çelik²

¹ Fırat Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, hasanguler@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9368-8902>

² Fırat Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, hakancelik@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2861-3269>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25 Ocak 2024
Revizyon 24 Mayıs 2024
Kabul 31 Mayıs 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Bulanık Mantık Kontrolör, DA motor, Parçacık Sürü Optimizasyonu, LabVIEW, PID kontrolör

ÖZ

DA motor geçmişte olduğu gibi günümüzde de sürücü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. DA motorlu sistemlerde kullanılan kontrolörün performansı sistemin başarısı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle bu çalışmada DA motor kontrol performansını arttırmak için kontrolör olarak, üyelik fonksiyonları Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile optimize edilen Bulanık Mantık Kontrolörü (BMK) kullanılmıştır. Önerilen kontrolör performansını incelemek için DA motor geleneksel PID kontrolör ile de kontrol edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. PID kontrolörün parametreleri ve BMK'nın üyelik fonksiyonları PSO ile eşit şartlarda optimize edilmiştir. Çalışma son zamanlarda kontrol sistemlerinde sıkça kullanılmaya başlanan ve geniş donanım uyumluluğuna sahip olan LabVIEW platformunda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde, özellikle değişken hız ve moment durumlarında PSO optimizasyonlu BMK'nın daha iyi performans gösterdiğini görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 January 2024
Received in revised form 24 May 2024
Accepted 31 May 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Fuzzy Logic Controller, DC Motor, Particle Swarm Optimization, LabVIEW, PID Controller

ABSTRACT

DC motor is widely used in drive systems today as it was in the past. The performance of the controller used in DC motor systems has great importance for the success of the system. Therefore, in this study, Fuzzy Logic Controller (FLC), whose membership functions are optimized with Particle Swarm Optimization (PSO), has been used as the controller to increase DC motor control performance. To examine the performance of the proposed controller, also the DC motor has been controlled with a traditional PID controller and the results were used for comparison. The parameters of the PID controller and the membership functions of FLC are optimized on equal terms with PSO. The study was carried out on the LabVIEW platform, which has recently become frequently used in control systems and has wide hardware compatibility. When the simulation results obtained were examined, it was seen that the PSO-optimized FLC performed better, especially in variable speed and torque situations.

Doi: 10.24012/dumf.1425437

* Sorumlu Yazar

Giriş

DA motorlar; basit yapısı, verimlilikleri ve kolay kontrol edilebilirlikleri nedeniyle, endüstriyel, otomotiv, robotik ve ev uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1], [2], [3], [4]. DA motorların; hassas hız, tork ve konum kontrolü, sistemin karalığını ve verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle DA motorların kontrol yöntemleri ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Geleneksel PID kontrol yöntemi, DA motor kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir [5], [6]. Bu yöntemin çok fazla tercih edilmesinin nedeni basit yapısı ve kontrol esnekliğidir [5]. Bu üstünlüklerinin yanında PID kontrolörlerin birtakım olumsuzlukları da vardır. Sistemin durumu, herhangi bir değişikliğe uğradığında PID kontrolörün parametrelerinin tekrar ayarlanması gerekmektedir [5]. PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerin en bilineni Ziegler-Nichols'dur [7]. Ancak bu yöntem bazı durumlarda iyi bir parametre ayarı sağlayamamakta ve büyük aşma değerlerine yol açmaktadır. Bilgisayarların sayısal gücünün artmasıyla birlikte geleneksel PID kontrolörlerin performansını artırmak için çeşitli ayarlama yöntemleri önerilmiştir. PID parametrelerini ayarlamak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)'dur [8], [9]. DA motor kontrolü için yapay zekâ teknikleri de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde Bulanık Mantık Kontrolör (BMK) ile DA motor kontrolüne ilişkin bir çok çalışma bulunmaktadır [1], [3], [4], [10], [11].

DA motor kontrol yöntemlerinin performanslarının test edilmesi ve deneysel çalışmaların öncesinde gerekli denemelerin gerçekleştirilmesi amacıyla Matlab, LabVIEW vb. platformlarla benzetim çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Yüksek performanslı sayısal hesaplama, gelişmiş GUI altyapısı, geniş donanım uyumluluğu ve gerçek zamanlı kontrol uygulamalarına imkân sağlaması nedeniyle, LabVIEW platformu son zamanlarda kontrol sistemlerinin benzetiminde ve gerçek zamanlı uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1], [12], [13], [14], [15].

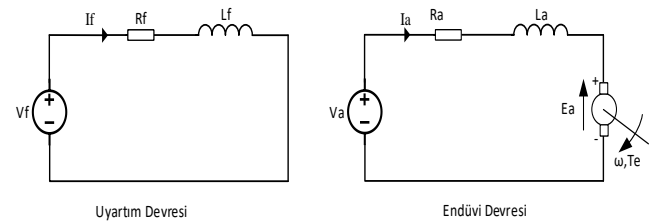
Bu çalışmada DA motor, giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları PSO ile optimize edilen BMK ile kontrol edilmiştir. Çalışmanın temel amacı DA motor kontrol performansının artırılmasıdır. Önerilen kontrol yönteminin performansını karşılaştırmak amacıyla parametreleri yine aynı şartlarda PSO ile belirlenen geleneksel PID kontrolör ile de DA motor kontrolü gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları FPGA, DAQ, Arduino, Raspberry Pi vb. kartlarla uyumlu olan LabVIEW ortamında gerçekleştirilmiştir. Böylece DA motor kontrolü için LabVIEW ortamında oluşturulan kontrolör yazılımları deneysel çalışmalarda da kolaylıkla kullanılabilir. Bu durum çalışmanın en önemli özgünlüğüdür. Sonuç olarak, benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bu çalışmada DA motor kontrolü için önerilen PSO ile optimize edilen BMK'nın özellikle değişken hız ve yük durumları için geleneksel PID kontrolöre göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür.

DA Motor

Endüstride en çok bilinen ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılan tahrik elemanı DA motordur [3], [4]. DA motorların hız ve konum kontrolü, giriş gerilimi ayarlanarak geniş bir aralıkta kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [4], [16]. Bu nedenle yeni motor kontrol yöntemleri genellikle ilk olarak DA motor üzerinde denenmektedir. Elde edilen sonuçlar istenen performans hedeflerini sağlıyorsa, bu kontrol yöntemleri daha sonra diğer motor türlerine de uygulanmaktadır.

DA Motorun Matematiksel Modeli

Bu çalışmada, elektriksel eşdeğer devresi Şekil 1'de verilen Serbest Uyarımlı DA motor kullanılmıştır. Bu bölümde motoru modellemek için kullanılan matematiksel denklemler verilmiştir.



Şekil 1. DA motorun elektriksel eşdeğer devresi

Denklem (1)'de uyarım gerilimi ifadesi verilmiştir.

$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (1)$$

Burada, V_f uyarım gerilimi, I_f uyarım akımı, R_f ise uyarım direncidir. Denklem (2)'de endüvi gerilimi ifadesi verilmiştir.

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad (2)$$

Burada, V_a endüvi gerilimi, I_a endüvi akımı, R_a endüvi direnci, E_a ise zıt EMK gerilimidir. Zıt EMK ifadesi Denklem (3)'de, uyarım akısı ise Denklem (4)'de verildiği gibidir.

$$E_a = k_e \Phi \omega \quad (3)$$

$$\Phi = k_f I_f \quad (4)$$

Burada, k_e ve k_f sırasıyla zıt EMK ve akı sabitleridir. Φ akı, ω ise açısal hızdır. Motorun elektromanyetik momenti (T_e), Denklem (5)'te verilmiştir.

$$T_e = k_e \Phi I_a \quad (5)$$

Motor hızının dinamik analizi için kullanılan hareket denklemi Denklem (6)'da verilmiştir.

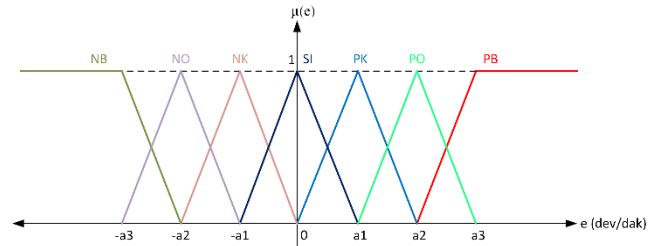
$$T_e = T_y + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

Burada, T_y yük momenti, B sürtünme katsayısı, J ise atalet momentidir.

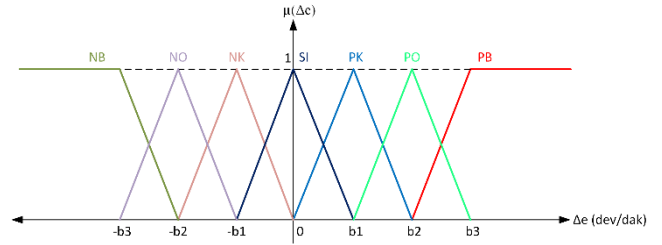
Benzetim çalışmalarında kullanılan DA motor parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. DA motor parametreleri

Parametre	Değer
Güç (P_n)	5 HP
Hız (n)	1220 dev/dak
Endüvi Gerilimi (V_a)	240 V
Uyartım Gerilimi (V_f)	240 V
Endüvi Direnci (R_a)	0.6 Ω
Uyartım Direnci (R_f)	240 Ω
Endüvi İndüktansı (L_a)	0.012 H
Uyartım İndüktansı (L_f)	120 H
Makine Sabiti (k_e, k_f)	1.18 V/(rad/sn)
Sürtünme Katsayısı (B)	0 N.m.s
Atalet Momenti (J)	1 kg.m ²



Şekil 3. Hataya ait üyelik fonksiyonları



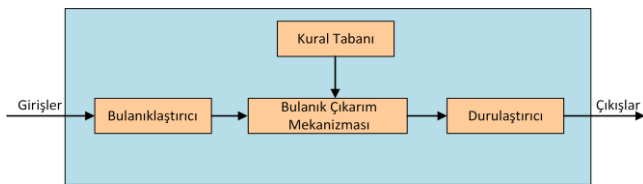
Şekil 4. Hata değişimine ait üyelik fonksiyonları

LabVIEW Platformunda DA Motorun Bulanık Mantık Kontrolü

Bulanık Mantık teorisi ilk olarak 1965 yılında Azeri bilim adamı Lotfi A. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Bu teori bir bilgiyi yalnızca doğru ya da yanlış olarak ifade eden Boole Cebiri'nin aksine, 0 ile 1 arasında bir ölçeğe dayalı bulanık değerlerle işlem yapar [1], [12]. Bulanık Mantık, matematiksel modeli yeterince bilinmeyen ve giriş bilgilerinin kesin olmadığı kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2], [3], [12]. Esnek yapısı nedeniyle Bulanık Mantık, özellikle değişken çalışma şartlarına sahip motor kontrol uygulamalarında başarılı bir kontrol performansı sunmaktadır [4], [10], [12].

Bulanık Mantık Kontrolörü Bileşenleri

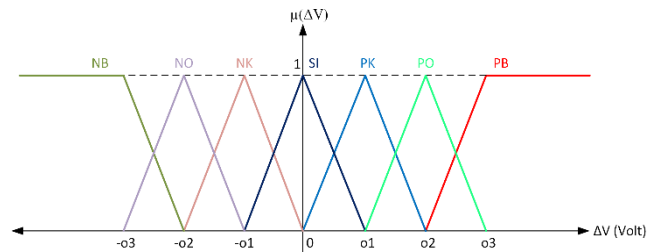
Her bir BMK dört ana bileşenden oluşur. Bu bileşenler Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. BMK bileşenleri

Bulanıklaştırıcı, uygulanan girişleri belirli üyelik fonksiyonlarına göre değerlendirerek, her bir girişin aitlik seviyesini 0 ile 1 arasında bulanık bir değer olarak belirler ve bulanık çık arım bloğuna aktarır [5], [11]. Çalışmada kullanılan BMK'nın hata (e) ve hata değişimi (Δe) olmak üzere 2 girişi vardır. Bu keskin girişlerin bulanıklaştırması için Şekil 3 ve 4'te verilen 5 üçgen ve 2 yamuk tipi olmak üzere 7 üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bu üyelik fonksiyonlarında a_n ve b_n ($n=1, \dots, 3$) olarak gösterilen parametreler, bu çalışmada PSO ile belirlenecektir.

BMK çıkışı olan gerilim değişimi (ΔV) için oluşturulan 5 üçgen ve 2 yamuk tipi olmak üzere toplam 7 üyelik fonksiyonu Şekil 5'te gösterilmiştir. Giriş üyelik fonksiyonlarına benzer şekilde çıkış üyelik fonksiyonlarında da o_n ($n=1, \dots, 3$) olarak gösterilen parametreler, bu çalışmada PSO ile belirlenecektir.



Şekil 5. Gerilim değişimine ait üyelik fonksiyonları

Kural tabanı, BMK'nın bulanıklaştırılmış verileri yorumlayarak girişe uygun bir tepki göstermesi için oluşturulmaktadır [12]. Kural tabanında, "if (varsayım)-then (sonuç)" ifadeleri kullanılarak giriş ve çıkış arasında bir ilişki kurulmaktadır [12]. Çalışmada kullanılan BMK'da 7 adet üyelik fonksiyonuna sahip 2 giriş bulunduğu için toplamda 49 adet kuralın oluşturulması gerekir. BMK'nın çıkışı olan gerilim değişimi (ΔV) için oluşturulan kurallar Tablo 2’de gösterilmiştir. Tablo 2’de verilen BMK kurallarının yapısı sembolik olarak aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

"if ($e = NB$ and $\Delta e = NB$) then ($\Delta V = NB$)" (Kural 1)

Tablo 2. Gerilim değişimi (ΔV) için BMK kural tablosu

e/\Delta e	NB	NO	NK	SI	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NO	NO	NK	NK	SI
NO	NB	NB	NO	NO	NK	SI	PK
NK	NO	NO	NK	NK	SI	PK	PO
SI	NO	NO	NK	SI	PK	PK	PO
PK	NK	NK	SI	PK	PO	PO	PB
PO	NK	SI	PK	PO	PO	PO	PB
PB	SI	PK	PO	PB	PB	PB	PB

Bulanık çıkarım mekanizması, BMK'nın en önemli bileşenidir. Bu aşamada BMK'nın girişleri ve kural tablosu kullanılarak bulanık değerler üretilmektedir [2], [17]. BMK'larda farklı çıkarım mekanizmaları kullanılmakla birlikte, bu çalışmada en yaygın kullanılan Mamdani çıkarım mekanizması kullanılmıştır. Bu çalışmada çıkarım mekanizmasında, Kesişim ve İmplikasyon (Implication) işlemi için min operatörü, Toparlama (Aggregation) işlemi için ise max operatörü kullanılmıştır.

Kesişim işlemi için kullanılan ifade Denklem (7)'de verilmiştir.

$$\mu_{ij} = \min\{\mu_i^e(e^*), \mu_j^{\Delta e}(\Delta e^*)\} \quad (i=1, \dots, 7, j=1, \dots, 7) \quad (7)$$

Burada μ_i^e hata, $\mu_j^{\Delta e}$ hata değişimi giriş üyelik fonksiyonlarını ve μ_{ij} ise ilgili kuralın kesişim değerini temsil etmektedir. e^* hatanın, Δe^* ise hata değişiminin keskin değeridir.

İmplikasyon işlemi için kullanılan ifade Denklem (8)'de verilmiştir.

$$\mu_{ij}(\Delta V) = \min\{\mu_{ij}, \mu_{ij}^{\Delta V}(\Delta V)\} \quad (8)$$

Burada $\mu_{ij}^{\Delta V}$ ilgili kurala ait çıkış üyelik fonksiyonunu, $\mu_{ij}(\Delta V)$ ise ima edilen çıkış bulanık kümelerini temsil etmektedir.

Sonuç bulanık çıkış kümesi $\mu_{out}(\Delta V)$ 'nin belirlenmesi için kullanılan Toparlama işlemi ifadesi Denklem (9)'da verilmiştir.

$$\mu_{out}(\Delta V) = \max\{\mu_{11}(\Delta V), \mu_{12}(\Delta V), \dots, \mu_{77}(\Delta V)\} \quad (9)$$

Durulaştırıcı, bulanık çıkarım mekanizmasından elde edilen bulanık ifadeleri sayısal bir değere dönüştürür [2], [17]. Bu çalışmada durulaştırma yöntemi olarak Denklem (10)'da matematiksel ifadesi verilen "Ağırlık Merkezi (Center of Gravity)" yöntemi kullanılmıştır.

$$\Delta V^* = \frac{\int \mu_{out}(\Delta V) \cdot \Delta V \cdot d(\Delta V)}{\int \mu_{out}(\Delta V) \cdot d(\Delta V)} \quad (10)$$

Burada ΔV^* , BMK'nin keskin çıkışını temsil etmektedir.

PSO ile BMK Parametrelerinin Belirlenmesi

PSO, sürü halinde yaşayan kuş ve balıkların davranışlarından esinlenerek geliştirilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algortmada her bir birey parçacık olarak ifade edilir ve bu parçacıkların oluşturduğu topluluğa da sürü adı verilir. PSO'da parçacıklar arasında sosyal bilgi paylaşımı vardır ve bu bilgi paylaşımı ile parçacıklar konumlarını en iyi konuma sahip parçacığa yaklaştırmaya çalışırlar [8], [18]. Bu nedenle her bir iterasyonda mevcut iterasyonun en iyi çözümü ($pbest$) ve tüm iterasyonların en iyi çözümü ($gbest$)'e göre parçacıkların yeni hız ve konumu hesaplanmaktadır [9]. Sonuç olarak iterasyon işlemi tamamlandığında, belirli bir çözüm uzayı içerisinde en iyi uygunluk değerine sahip olan parçacık çözüm olarak belirlenmiş olur. PSO yöntemi günümüzde doğrusal olmayan problemlerin çözümü, parametre tahmini, kontrolör tasarımı başta olmak üzere birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [8], [9], [18].

PSO'da parçacıkların yeni hızlarını belirlemek için kullanılan ifade Denklem (11)'de verilmiştir.

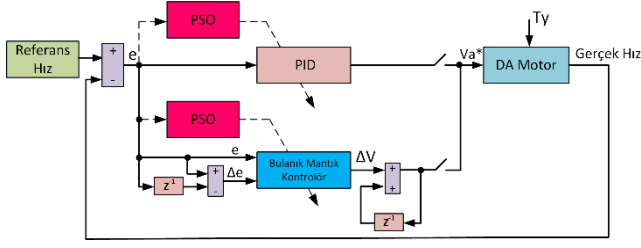
$$v_{n+1} = w \cdot v_n + c_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_n - x_n) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest_n - x_n) \quad (11)$$

Burada v_n , v_{n+1} sırasıyla parçacıkların şu anki ve bir sonraki hızını, x_n ise parçacıkların şu anki konumunu temsil etmektedir. c_1 , c_2 öğrenme katsayıları, $rand_1$, $rand_2$ 0-1 aralığında rastgele sayılar ve w ise atalet katsayısıdır. $pbest_n$, n . iterasyondaki, $gbest_n$ ise tüm iterasyonlardaki en iyi çözümü temsil etmektedir. Bu hesaplamalar her bir parçacık için her iterasyonda tekrarlanmaktadır.

Parçacıkların yeni konumu olan x_{n+1} 'i hesaplamak için Denklem (12)'de verilen ifade kullanılmaktadır.

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1} \quad (12)$$

BMK'nın esnek yapısı ve basit matematiğinin yanında birtakım olumsuzlukları da vardır. Bunlardan en önemli olanları kural tabanın oluşturulması ve üyelik fonksiyonu değerlerinin belirlenmesidir. Çoğu durumda bu iki önemli bileşenin belirlenmesi için deneme yanılma ve tecrübeye dayalı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu olumsuzlukların çözümü ve dolayısıyla DA motor kontrolünde kullanılan BMK'nın performansını arttırmak için kullanılan üyelik fonksiyonlarının parametreleri PSO ile belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde kolaylık sağlaması bakımından hem giriş hem de çıkış üyelik fonksiyonları simetrik olarak seçilmiştir. Böylece PSO tarafından belirlenen parametre sayısı azaltılarak daha hızlı sonuç alınmasına imkân sağlanmıştır. Çalışmaya ait blok diyagramı Şekil 6'da verilmiştir.

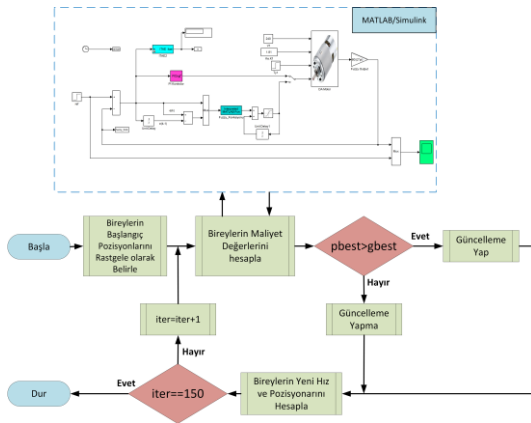


Şekil 6. PSO ile BMK parametrelerinin belirlenmesine ilişkin blok diyagramı

PSO ile BMK üyelik fonksiyonlarının parametrelerinin belirlenmesi için ilk olarak DA motor modeli daha önce verilen denklemler kullanılarak Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Daha sonra bu modele, Matlab'da m-function ile oluşturulan BMK yapısı eklenerek DA motorun BMK ile kapalı çevrim hız kontrol modeli elde edilmiştir. Bu Matlab/Simulink modeli sayesinde her iterasyonda BMK üyelik fonksiyonlarının parametreleri PSO ile güncellenebilmektedir. Aynı Matlab/Simulink modelinde BMK yerine PID kontrolör bloğu seçilerek, DA motorun PID kontrolör ile kapalı çevrim hız kontrol modeli de elde edilebilmektedir. Şekil 7'de verilen akış diyagramında görüldüğü gibi PSO algoritması ile Matlab/Simulink modeli iç içe çalıştırılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Optimizasyon çalışmalarında amaç fonksiyonu olarak, matematiksel ifadesi Denklem (13)'de verilen ITAE (Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın İntegrali) kullanılmıştır. Bu ifade t zamanı $e(t)$ ise zamana bağlı olarak hatayı temsil etmektedir. ITAE değerinin minimizasyonu ile geçici durum performansının iyileştirilmesi yanında sürekli durum hatası da azaltılabilmektedir.

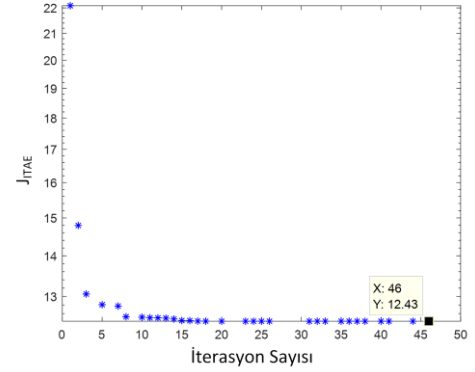
$$J_{ITAE} = \int_0^{inf} t|e(t)| \cdot dt \quad (13)$$

Optimizasyon çalışmaları, 500 dev/dak referans hız, 10 Nm yük momentini, 150 birey sayısı ve 50 iterasyon sayısı için gerçekleştirilmiştir. PSO algoritmasında $c_1=0.12$, $c_2=1.2$ ve $w=0.9$ alınmıştır. Hem BMK hem de PID kontrolör için optimizasyon yapılarak, çalışmada DA motor kontrolü için önerilen BMK'nın performansı ile geleneksel PID kontrolörün performansı karşılaştırılmıştır.

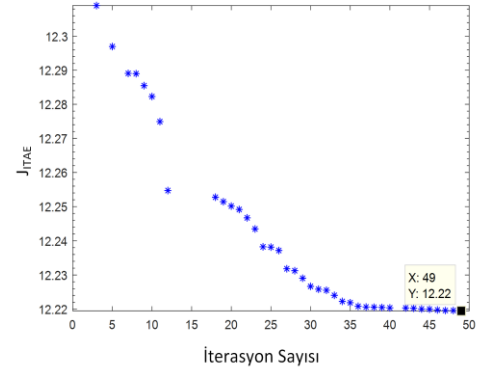


Şekil 7. BMK parametrelerinin belirlenmesine ilişkin PSO algoritması akış diyagramı

PID kontrolör optimizasyon sürecine ilişkin iterasyon eğrisi Şekil 8'de, BMK optimizasyon sürecine ilişkin iterasyon eğrisi ise Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8. PID kontrolör optimizasyonu için iterasyon eğrisi



Şekil 9. BMK optimizasyonu için iterasyon eğrisi

Optimizasyon sonucu elde edilen BMK üyelik fonksiyonlarının parametreleri Tablo 3'de, PID kontrolör parametreleri ise Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3. PSO ile belirlenen BMK Parametreleri

	e	Δe	ΔV
a ₁	20.6	b ₁ 0.5	o ₁ 50
a ₂	251	b ₂ 10	o ₂ 99
a ₃	606	b ₃ 15.3	o ₃ 199

Tablo 4. PSO ile belirlenen PID Kontrolör Parametreleri

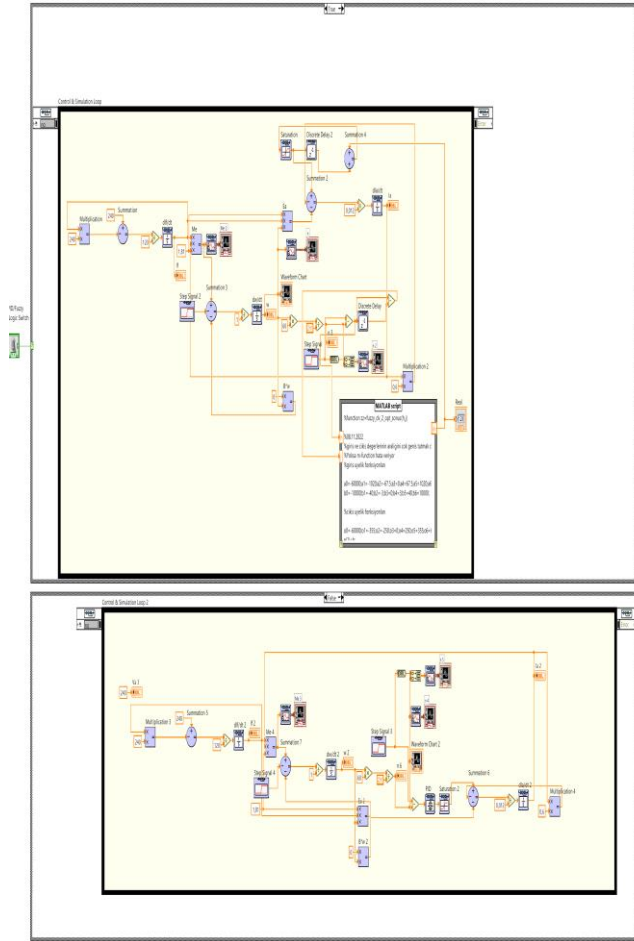
K_p	K_i	K_d
50	0.93683	0.2638

LabVIEW Platformunda DA Motor Kontrolü

LabVIEW grafik tabanlı bir programlama dili ve mühendislik geliştirme ortamıdır. Hızlı sayısal hesaplama ve görüntüleme yanında, geniş donanım uyumluluğu sayesinde gerçek zamanlı uygulamalarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1], [14], [19]. Bu programın en önemli özelliklerinden biri C++, Matlab ve Python gibi diğer

program dilleri ile entegrasyon sağlayabilmesidir. Böylece diğer programlama dillerinin sağlayabileceği imkân ve kütüphanelerden de faydalanılabilmektedir. LabVIEW, Blok Diyagramı ve Ön Panel olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Blok Diyagramı bölümünde grafiksel programlama işlemleri gerçekleştirilirken, Ön Panel bölümü kullanıcılara sonuçları analiz etme, kaydetme ve dışardan değer girişi yapabilmeye imkânı sunmaktadır. LabVIEW'in FPGA, DAQ, Arduino, Raspberry Pi vb. kartlarla uyumluluğu sayesinde gerçek zamanlı kontrol uygulamaları başarı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [12], [15], [16]. LabVIEW günümüzde sinyal işleme, robotik, sağlık, güç kalitesi analizi alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanında son zamanlarda motor kontrol uygulamalarında da sıkça kullanılmaktadır [1], [13], [14], [15], [20].

Bu çalışmada ilk olarak daha önce verilen denklemler kullanılarak DA motor modeli LabVIEW blok diyagramında modellenmiş ve bu modele Matlab m-function ile oluşturulan BMK yapısı ilave edilerek DA motorun BMK ile kapalı çevrim hız kontrol modeli elde edilmiştir. Aynı modelde BMK yerine PID kontrolör bloğu seçilerek DA motorun PID kontrollü kapalı çevrim hız kontrol modeli elde edilmiştir. Hem BMK hem de PID kontrolörde daha önce PSO ile belirlenen parametreler kullanılmıştır. Şekil 10'da LabVIEW platformunda oluşturulan DA motor kontrol blok diyagramı verilmiştir.



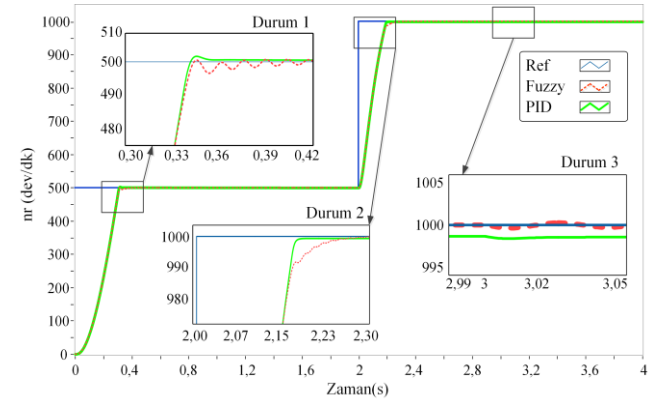
Şekil 10. LabVIEW platformunda oluşturulan DA motor kontrol blok diyagramı

Şekil 10'da görüldüğü gibi LabVIEW blok diyagramına bağlanan bir anahtar yardımıyla DA motor kontrolü BMK ve PID kontrolör ile gerçekleştirilebilmektedir. Böylece önerilen BMK ile geleneksel PID kontrolörün motor kontrol performansları karşılaştırılabilmektedir. LabVIEW blok diyagramında görüldüğü gibi BMK'nın girişleri hata (e) ve hatanın değişimi (Δe), çıkışı ise gerilim değişimi (ΔV)'dir. Bu gerilim değişimi bir önceki gerilim değeri olan $V_a(k-1)$ ile toplanarak motora uygulanan V_a gerilim değeri hesaplanmaktadır. DA motorun hızı ve yük momenti LabVIEW platformunda oluşturulan Ön Panel aracılığıyla dinamik olarak değiştirilebilmekte ve sonuçlar analiz edilebilmektedir.

Benzetim Sonuçları

Benzetim sonuçları, LabVIEW platformunda oluşturulan blok diyagramından $1e-3$ sn çalışma adımı için elde edilmiştir. Benzetim çalışmalarında motor farklı hız ve yük momentlerinde çalıştırılarak, BMK ve geleneksel PID kontrolörün performansları karşılaştırılmıştır.

Benzetim çalışmalarında DA motor, 0-2 sn aralığında 500 dev/dak referans hızda ve yüksüz, 2-3 sn aralığında 1000 dev/dak referans hızda ve yüksüz, 3-4 sn aralığında ise 1000 dev/dak referans hızda ve 10 Nm yük momentinde çalıştırılmıştır.



Şekil 11. Değişken hız ve yük momentini için motor hızının değişimi

Şekil 11'de değişken referans hız ve yük momentini için motor hızının değişimi verilmiştir. Verilen hız değişimi incelendiğinde her iki kontrolörlü durumda da motorun referans hızı kısa bir sürede yakaladığı ve kararlı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Tablo 4'de farklı çalışma durumları için BMK ve PID kontrolör performansları karşılaştırılmıştır. Hem Şekil 11 hem de Tablo 4 birlikte incelendiğinde BMK ve PID kontrolör performanslarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni PID kontrolörün parametrelerinin de BMK ile aynı şartlarda PSO ile belirlenmiş olmasıdır. Ancak özellikle değişken hız ve yük momentini değerleri için bu çalışmada DA motor kontrolü için önerilen BMK'nın PID kontrolöre göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir. Bu durum Tablo 4'de verilen J_{ITAE} değerlerinden de görülmektedir. Özellikle motorun 1000 dev/dak hızla yüksüz çalışırken 10 Nm ile

yüklenmesi durumunu içeren Durum 3’de BMK’lı durumda motor hızında çok kısa süreli bir salınım olmasına rağmen hızın düşmediği, PID kontrolörlü durumda ise zaten mevcut olan sürekli durum hatasının daha da artarak, motor hızının yüklenme ile düştüğü görülmektedir. Şekil 11’de görüldüğü gibi BMK’lı durumda, referans hıza erişilirken ve yüklenme durumunda motor hızında kısa süreli bir salınım olduğu görülmektedir. Genel olarak motor kontrol sistemlerinde hız salınımı durumunda mekanik titreşim meydana gelmekte ve bunun sonucu olarak motorun ömrü azalmaktadır. Bu durum çalışmada DA motor kontrolü için önerilen BMK’nın en önemli dezavantajıdır. Ancak bu çalışmada hız salınımı çok kısa süre sürdüğünden motor üzerindeki olumsuz etkilerin de sınırlı olacağı öngörülmektedir.

Tablo 4. BMK ve PID kontrolör performanslarının karşılaştırılması

Durum	Performans Kriteri	BMK	PID
Durum 1	Yükselme Zamanı (tr)	0.1971	0.1969
	Yerleşme Zamanı (ts)	0.3063	0.3040
	Aşma (%)	0.2267	0.6733
	Sürekli Durum Hatası	0	0.5
Durum 2	Yükselme Zamanı (tr)	2.0135	2.0137
	Yerleşme Zamanı (ts)	2.1841	2.1814
	Aşma (%)	0	0
	Sürekli Durum Hatası	0	1
J _{ITAE}		12.23	12.45

Sonuçlar

DA motor basit yapısı ve kolay kontrol edilebilirliği nedeniyle kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada üyelik fonksiyonlarının parametreleri PSO ile belirlenen BMK ile DA motorun kontrolü gerçekleştirilmiştir. Önerilen kontrolörün performansını karşılaştırmak için aynı şartlarda PID kontrolör parametreleri de PSO ile belirlenerek geleneksel PID ile DA motor kontrolü de gerçekleştirilmiştir. Parametreleri PSO ile belirlenen BMK ve PID kontrolör ile DA motor kontrolüne ilişkin benzetim çalışmaları geniş donanım uyumluluğu nedeniyle son zamanlarda motor kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan LabVIEW platformunda gerçekleştirilmiştir. Böylece benzetim çalışmaları için LabVIEW ortamında oluşturulan kontrolör yazılımları ilerleyen dönemlerde gerçekleştirilecek olan deneysel çalışmalarda da kullanılabilir olacaktır. Bu durum çalışmanın en önemli özgülüğüdür. Benzetim çalışmalarında motor farklı referans hız ve yük momenti için çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlara göre BMK ve PID kontrolör karşılaştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçlarının verildiği Şekil 11 ve Tablo 4 incelendiğinde, özellikle değişken hız ve yük şartlarında önerilen BMK’nın

geleneksel PID kontrolörden daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda BMK üyelik fonksiyonlarının parametrelerinin PSO ile belirlenmesinin yanında kural tablosu da PSO ile belirlenerek BMK’nın performansı artırılmaya çalışılacaktır. Optimizasyon çalışmalarında PSO yerine diğer yeni optimizasyon yöntemleri (MSA, BOA, KKO vb.) kullanılarak elde edilen sonuçlar irdelenecektir. Ayrıca LabVIEW uyumlu FPGA, DAQ, Arduino, Raspberry Pi vb. kartlarla, önerilen kontrol yapısının gerçek zamanlı uygulamasına yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilecektir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi biri kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Yazar 1 ve Yazar 2

-Çalışma konsepti ve tasarım

-Veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması

-Taslağın oluşturulması

Kaynaklar

- [1] J. O. Salim, “Fuzzy Based PID Controller for Speed Control of DC Motor Using Labview”, *WSEAS Trans. Syst. Control*, c. 10, ss. 154-159, 2015.
- [2] M. Tuna, “Kararsız Koşullarda SMDA Motorun Dayanıklı Hız Kontrolü için Bulanık-Tabanlı Akıllı Denetleyici Tasarımı”, *Acad. Platf. J. Eng. Sci.*, c. 8, sy 2, ss. 237-248, 2020.
- [3] H. Ahmed ve A. Rajoriya, “A Hybrid of Sliding Mode Control and Fuzzy Logic Control Using a Fuzzy Supervisory Switched System for DC Motor Speed Control”, *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, c. 25, sy 3, ss. 1993-2004, 2017.
- [4] Z. Has, A. H. Muslim, ve N. A. Mardiyah, “Adaptive-Fuzzy-PID Controller Based Disturbance Observer for DC motor Speed Control”, *2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, IEEE, 2017, ss. 1-6.
- [5] K. Kaplan, M. Kuncan, H. Polat, B. Tepe, ve H. M. Ertunç, “PID ve Bulanık Mantık Tabanlı DC Motorun Gerçek Zamanlı Konum Kontrolü”, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, c. 10, sy 2, ss. 900-916, 2020.
- [6] M. F. Özlük ve H. H. Sayan, “Matlab GUI ile DA Motor için PID Denetleyicili Arayüz Tasarımı”, *İleri Teknol. Bilim. Derg.*, c. 2, sy 3, ss. 10-18, 2013.
- [7] A. EmiRoğlu, T. Yaren, ve S. Kizir, “Kendinden Ayarlanabilir Denetleyici ile DA Motor Hız Kontrolü”, *Politek. Derg.*, c. 25, sy 2, ss. 757-765, 2022.
- [8] H. Celik ve T. Yigit, “Field-oriented control of the PMSM with 2-DOF PI controller tuned by using PSO”,

- 2018 International conference on artificial intelligence and data processing (IDAP), IEEE, 2018, ss. 1-4.
- [9] M. Nasri, H. Nezamabadi-Pour, ve M. Maghfoori, "A PSO-Based Optimum Design of PID Controller for a Linear Brushless DC Motor", *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, c. 26, sy 40, ss. 211-215, 2007.
- [10] R. Li ve P. Gong, "Fuzzy PID Speed Controller of DC Motor Based on MATLAB", *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 2417, sy 1, ss. 1-6, 2022.
- [11] M. Bulut, M. B. Kurt, ve M. Dem, "Genetik-Bulanık Kontrolörün DC Motora Uygulanması", *Politek. Derg.*, c. 7, sy 4, ss. 277-283, 2004.
- [12] P. Thepsatorn, A. Numsomran, V. Tipsuwanporn, ve T. Teanthong, "DC motor speed control using fuzzy logic based on LabVIEW", *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, IEEE, 2006, ss. 3617-3620.
- [13] D. Somwanshi, M. Bundeale, G. Kumar, ve G. Parashar, "Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW", *Procedia Comput. Sci.*, c. 152, ss. 252-260, 2019.
- [14] N. Patrascoiu, "Modeling and Simulation of the DC Motor Using Matlab and LabVIEW", *Int. J. Eng. Educ.*, c. 21, sy 1, ss. 49-54, 2005.
- [15] F. H. Ali, M. M. Hussein, ve S. M. B. Ismael, "LabVIEW FPGA Implementation of a PID Controller For D.C. Motor Speed Control", *Iraq J Electr. Electron. Eng.*, c. 6, sy 2, ss. 139-144, 2010.
- [16] S. Reza, A. A. Mamun, A. Rahman, ve M. Begum, "Design and Development of LabVIEW Based DC Motor Speed and Direction Control System", *Int. J. Eng. Res.*, c. 4, sy 5, ss. 96-99, 2015.
- [17] İ. Alışkan ve S. Ünsal, "Farklı Çıkarım Yöntemlerine Sahip Bulanık Mantık Denetleyicileri Kullanarak Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Hız denetimi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg.*, c. 24, sy 2, ss. 185-191, 2018.
- [18] E. S. Rahayu, A. Ma'arif, ve A. Çakan, "Particle Swarm Optimization (PSO) Tuning of PID Control on DC Motor.", *Int. J. Robot. Control Syst.*, c. 2, sy 2, ss. 435-447, 2022.
- [19] D. Handaya ve R. Fauziah, "Proportional-Integral-Derivative and Linear Quadratic Regulator Control of Direct Current Motor Position using Multi-Turn Based on LabView", *J. Robot. Control JRC*, c. 2, sy 4, ss. 332-336, 2021.
- [20] P. Vikhe, N. Punjabi, ve C. Kadu, "Real Time DC Motor Speed Control using PID Controller in LabVIEW", *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, c. 3, sy 9, ss. 12162-12167, 2014.



Hiyerarşik Bölücü Kümeleme ile Çok Sınıflı Sınıflandırma Performansının Geliştirilmesi: Kümeleme Algoritmaları Üzerine Karşılaştırmalı Bir Analiz

Improving Multiclass Classification Performance with Hierarchical Divisive Clustering: A Comparative Analysis on Clustering Algorithms

Celal Alagöz*

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, celal.alagoz@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9812-1473>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 2 Şubat 2024
Revizyon 5 Mayıs 2024
Kabul 14 Haziran 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Çok Sınıflı Sınıflandırma,
Hiyerarşik Sınıflandırma,
Otomatik Hiyerarşik Üretme,
Kümeleme Algoritmaları,
Hiyerarşik Bölücü Kümeleme

ÖZ

Çok sınıflı sınıflandırma problemini hiyerarşik biçime dönüştürerek performans gelişimi elde etmek araştırılan bir konudur. Böylesi bir dönüşümü otomatik olarak gerçekleştirmede kritik bir bileşen, hiyerarşik oluşturma sürecidir. Bu çalışma, standard kümeleme algoritmaları olan K-Medoids (K-Med), K-Means ve Gaussian Karışım Modelleri'in (GMM) bir hiyerarşik inşa etme tekniği olan Hiyerarşik Bölücü Kümeleme (HDC) yönteminde bölücü işlevinde kullanılmasıyla otomatik olarak elde edilen hiyerarşilerin çok sınıflı veri setlerinin sınıflandırma performansına etkisini incelemektedir. İki farklı performans metriği olan F1 skoru ve doğruluk skoru kullanılarak yapılan analizler, K-Means ve GMM'nin K-Med'e göre genellikle daha etkili olduğunu göstermektedir. Ancak, sonuçlar performans iyileştirmesi ve öğrenme veriminin, sınıf sayısına ve veri setinin bazı karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir. Sonuçta, hiyerarşik biçime dönüştürmenin sınıflandırma performansına önemli ölçüde etkisi olduğu ve farklı veri setlerinin farklı tepkiler verdiği bulunmuştur. Çalışmanın kısıtları ve gelecek araştırmalar için sağladığı potansiyel de tartışılmıştır. Bu çalışma, kümeleme algoritmalarının HDC yöntemindeki rolünü ve gelecekteki araştırmalara bakan yönlerini anlamak için önemli bir katkı sağlamaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 February 2024
Received in revised form 5 May 2024
Accepted 14 K-June 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Multiclass Classification,
Hierarchical Classification,
Automated Hierarchy Generation,
Clustering Algorithms,
Hierarchical Divisive Clustering

ABSTRACT

Transforming a multi-class classification problem into a hierarchical form to achieve performance improvement is a topic of research. An essential aspect in automating such transformation is the process of hierarchy building. This research examines how standard clustering algorithms, including K-Medoids (K-Med), K-Means, and Gaussian Mixture Models (GMMs), contribute as partitioning functions within the Hierarchical Divisive Clustering (HDC) method, a technique for building hierarchies, and their effects on the classification performance of multi-class datasets. Analyses conducted using two different performance metrics, namely F1 score and accuracy score, indicate that K-Means and GMM are generally more effective compared to K-Med. However, the findings indicate that performance improvement and learning efficiency may vary depending on the number of classes and some characteristics of the dataset. It is found that hierarchical transformation significantly influences classification performance, and different datasets exhibit different responses. The study also discusses its limitations and future research directions. This study contributes to understanding the role of clustering algorithms in Hierarchical Divisive Clustering and potential avenues for future research.

Doi: 10.24012/dumf.1430306

* Sorumlu Yazar

Giriş

Hiyerarşik Sınıflandırma (HC), veri veya nesnelerin bir ağaç benzeri yapı içinde düzenlendiği Makine Öğrenme (ML) alanında bir sınıflandırma yaklaşımıdır. Bu yöntem, kategorilerin ve alt kategorilerin bir hiyerarşi içinde organize edildiği bir yapı oluşturmayı amaçlar. HC, özellikle karmaşık ve çok katmanlı veri setlerini işlemek için kullanışlıdır.

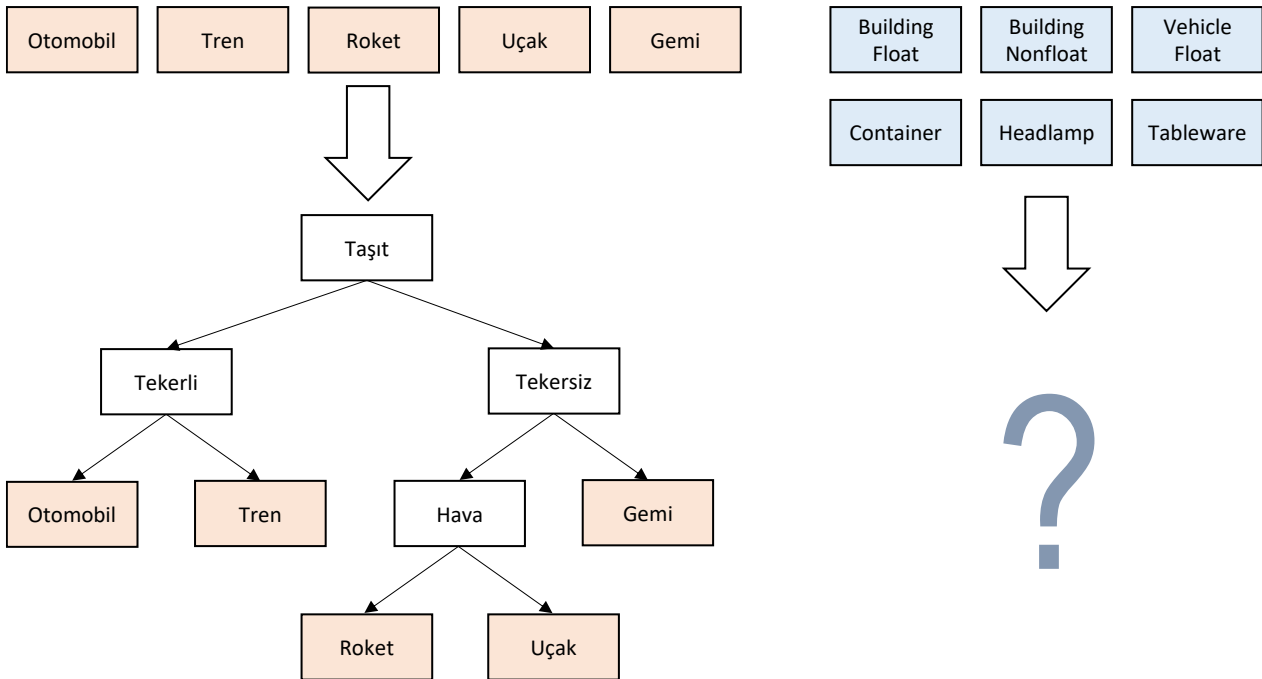
Bazı veri setleri hazır ve tanımlanmış bir hiyerarşi yapısı ile gelir. Çünkü bazı taksonomilerde sınıflar veya etiketler arasındaki hiyerarşi ilişkisi sezgisel ve iyi kurulmuş olduğundan yerleşmiş bir aşinalık hissiyle bağlantılıdır. Örneğin, Şekil 1'deki sınıf hiyerarşisine bakıldığında, hiyerarşinin anlaşılması genellikle zor değildir. Örnekteki hiyerarşi basit olduğu kadar güçlüdür, bu nedenle hiyerarşinin aksini veya alternatifini düşünmek zordur.

Ağaç benzeri yapı içerisindeki hiyerarşide her kategori veya sınıf bir düğüm ile ifade edilir. Bu düğümler, dallar aracılığıyla birbirlerine bağlanır. Bu yapı genellikle, üst düzey kategorilerden başlayarak giderek daha spesifik alt kategorilere doğru dallanır. Üst düzey kategorilere doğru ilerledikçe, ortak özellikler ve karakteristikler artar. Örneğin, Şekil 1'deki "Taşıt" kategorisi içinde "Gemi" ve "Tren" arasında ortak özellikler bulunurken, bunları ayıran spesifik özellikler de vardır. Başka bir deyişle, ağaç benzeri hiyerarşideki düğümler arasındaki ilişki, bir atasal ilişkiye, yani bir soy ilişkisine benzetilebilir. Genellikle, ağacın kökü en yukarıda olduğu için aşağıya doğru ilerlerken evlat düğümlere, yukarı doğru ilerlerken ise atalara ulaşılır. Bu, hiyerarşinin en yalın ve temel algısıdır. Ancak, daha karmaşık ve detaylı ilişki ağları da mevcut olmasına rağmen, kullanışsız oldukları için genellikle önemsenmemiştir [1].

Bu sebepten dolayı, bu çalışmadaki analizde ağaç tipi ve daha spesifik olarak ikili ağaç tipi hiyerarşi incelendi ve bu hiyerarşi yapısı içinde ikili ağaç yapısı özellikle ele alındı.

Literatürde ikili ağaç tipi, iç içe geçmiş dikotomiler olarak da adlandırılır [2]. İkili ağaç şeklindeki sınıf hiyerarşisi yapısında ata (non-leaf) düğümler ve (leaf) yaprak düğümler bulunur. Her ata düğümün tam olarak iki evladı, her evladın tam olarak bir atası ve bir kardeşi bulunur. Ağacın başlangıçta ve en yukarıda yer alan kök düğümün atası yoktur. Diğer taraftan, en uç ve en aşağı nokasındaki yaprak düğümlerin evladı yoktur. Böylece, ata düğümler birden fazla sınıfı içerir, dolayısıyla bu sınıf etiketlerini ve karşılık gelen veri örneklerini kapsayan bir üst kategori gibidirler. Bu durumda, kök düğüm çok sınıflı sınıflandırma problemindeki bütün orijinal sınıf etiketlerini (düz etiketler) ve karşılık gelen veri örneklerini içerir. Buna karşılık, yaprak düğümlerin her biri düz etiketlerden sadece birini içerir. Böyle bir hiyerarşide düz etiketli sınıf sayısını n olarak adlandıralım. O halde bu hiyerarşide toplam $2n-1$ düğüm ve bunlardan $n-1$ tanesi ata düğüm olacaktır. Bununla birlikte toplam $2(n-1)$ dal olacaktır.

Bir hiyerarşi yapısı ile birlikte işlenen veri setleri literatürde yaygın şekilde çalışılmıştır. Sözelimi veri setlerinin sınıf etiketleri arasında yapısal bir ilişki hazır bulunmaktadır. Örnek olarak metin madenciliği ve analizi alanında metin sınıflandırma [3],[4], metinden ve de özellikle de web ortamından bilgi çekme ve bağlam çıkarma [5] gibi görevlerde metnin en temel birimi olan kelimeler arasında hem semantik hem de dilbilgisel hiyerarşi yapıları kullanılmıştır. Görüntü analizi alanında görüntü etiketleme [6] ve açıklama [7], sahne anlama [8] ve görüntü bölütleme [9] görevlerinde gerek zamansal, gerek mekansal ve gerek ise semantik hiyerarşiyi kullanmak avantaj sağlamıştır. Bunların yanında Biyoinformatik disiplinde DNA, RNA, proteinler ve metabolitler ile bunların değişimleri gibi temel aktörlerin eylemlerini ve etkileşimlerini tanımlamayı amaçlayan araştırma alanı olan fonksiyonel genomik analizinde gerek gen işlevlerini kategorize etmek [10] gerekse hücre veya bireyin gözlemlenebilir bir dizi özelliğini (fenotipi), temel genetik özellikler arasındaki fonksiyonel



Şekil 1. Basit bir hiyerarşi örneği (solda). Her hangi bir hiyerarşi ile gelmeyen sınıf etiketleri (sağda).

etkileşimle (genotipi) ve çevresel koşullarla ilişkilendirmek için [11] hiyerarşi düzenin dikkae almak faydalı olmaktadır.

Bir hiyerarşi yapısı eşliğinde çalışılan veri setlerinin yanı sıra, sadece düz etiket bilgilerine sahip olduğumuz bir veri setini alıp hiyerarşik bir yapıya dönüştürme fikri araştırılan bir konudur. Bu araştırmalar “Böyle bir dönüşüm nasıl gerçekleştirilir?” ve “Bu dönüşümün veri analizine, özellikle de sınıflandırma performansına nasıl etki eder veya bu etki nasıl ölçülür?” gibi sorular etrafında şekillenmiştir. Sezgiye dayalı olarak, el ile basit ve sorunsuz bir şekilde bir hiyerarşi oluşturmak suretiyle ilk sorunu çözmenin mümkün olmadığı görülmektedir. Çünkü bir veri setinin etiketlerine baktığımızda, algımızda oluşan yüksek seviye semantik ipuçlarını, mevcut ölçüm kısıtlarıyla elde edilmiş olan nicel açıdan daha karmaşık özelliklerden çıkarmak veya çözümlenmek zordur. Bu tür düşük seviyeli bilgileri daha hızlı ve tutarlı bir şekilde işlemek, bilgisayarlar veya diğer tabirle hesap makineleri için daha uygundur. Öte yandan, yüksek seviye semantik algımız itibarıyla etiketler arasında her zaman açık bir hiyerarşi bulunmayabilir. Örneğin, Şekil 1’de düz etiketleri verilen cam tipleri (*glass*) veri setinde, sınıflar arasında net bir hiyerarşi yapısı oluşturmak her zaman mümkün olmayabilir. Bir açıdan cam tipinin yapısal olarak float veya non-float olması esas alınarak bir üst kategori tavsiye edilebilirken başka bir açıdan cam tipinin işlevsel olarak pencere için olup olmadığı bir üst kategori olarak tavsiye edilebilir. Hangisinin daha iyi bir taksonomi olduğu en azından Şekil 1’deki “Taşıt” örneğindeki gibi açık değildir. Ayrıca, yüksek seviye semantik yardımıyla oluşturulan hiyerarşinin sınıf tahmini performansını artırdığına dair bir kanıt bulunmamıştır; aksine, böyle elle oluşturulan hiyerarşinin daha düşük sınıflandırma isabetliliği sonuçları doğurduğu bulunmuştur [12]-[14]. Bu nedenle, bilgisayarın veri setinde gördüğüne dayanarak oluşturulan hiyerarşiler, sınıflandırma performansı açısından daha pratik ve işlevseldir. Bu tür hiyerarşik yapıların oluşturulmasına ise otomatik hiyerarşi üretme denir. Böylelikle eğitim seti kullanılarak kullanıcı tanımlı veya uzamanlık alanı bilgisi gerektirmeden bir hiyerarşi oluşturulur ve etiketi bilinmeyen yeni veri örneklerinin sınıfı bu hiyerarşi üzerinden tahmin edilir.

Otomatik hiyerarşi üretme bağlamında çeşitli yöntemler benimsenmiştir. Bunlar arasından veri analizi açısından en hafif ve tavizkar olanı rastgele hiyerarşi üretmektir. Ancak düz etiketli sınıf sayısı arttıkça mümkün olan farklı hiyerarşi yapısı sayısı üssel olarak arttığından bu seçenek uygulanabilir görünmemektedir. Sözgelimi, n adet düz etiketli olan bir veri setinin mümkün olan birbirinden farklı ikili ağaç hiyerarşik yapı sayısı T aşağıdaki gibi özyinelemeli olarak ifade edilebilir:

$$T[n] = \binom{n}{n-1}T[n-1] + \binom{n}{n-2}T[n-2] + \dots + \binom{n}{[n/2]}T[[n/2]] \quad (1)$$

Burada $[.]$ küsüratlı sayıyı bir üst tamsayıya yuvarlama operatörünü ifade eder. Bu hesaba göre, örneğin, düz etiketli 10 sınıflı bir çoklu sınıf veri setinden yaklaşık 20 milyon farklı ikili ağaç hiyerarşi yapısı üretileceği anlamına gelir, ki bu çok geniş bir arama uzayıdır ve hesaplamayı mümkün kılmaz. Diğer yandan, rastgele üretilen ikili ağaç hiyerarşi

yapılarından en iyilerini seçmek için meta-sezgisel algoritmalar kullanılmıştır [15].

Diğer otomatik hiyerarşi üretme yöntemleri veri örneklerini kullanarak hiyerarşi üretir. Otomatik hiyerarşi üretme sürecinde sınıflar arasında yapısal bir ilişki olduğu şeklinde bir ön kabul olduğundan, veri örneklerinin analizindeki amaç, bu ilişkiyi belirginleştirmektir. ML alanında hemen akla gelen ilişki türü bir mesafe ölçüsü veya iyi tanımlanmış bir ölçev (metrik) ile ifade edilen benzersizlik ilişkisidir. Bu nedenle, sınıflar arasındaki benzersizlik ölçüsünün veri örnekleri üzerinden belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, veri örnekleri, bağlı oldukları sınıfları temsil edebilirler. Diğer bir yaklaşım ise, veri örneklerinin iç yapısını kullanmaktan ziyade, veri örnekleri üzerinde çalışan bir operatörün -bir sınıflandırıcı bu görev için en elverişli ve pratik model olarak düşünülebilir- tetkiki ve yönlendirmesiyle sınıflar arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Veri seti iç yapısını kullanarak elde edilen benzersizlik ölçüsü temsilci tabanlı benzersizlik diye adlandırılırken bir sınıflandırıcının veri örnekleri üzerindeki performansını kullanarak elde edilen benzersizlik ölçüsü sınıflandırıcı tabanlı benzersizlik diye adlandırılır [16].

Temsilci tabanlı benzersizlik yaklaşımında, bir sınıfla ilişkili veri örnekleri o sınıfı ya toplu olarak ya da bir çeşit soyutlama yoluyla temsil edebilir. Toplu temsil yaklaşımında, sınıfla ilişkili veri örnekleri bir dağılım oluşturur ve dağılımlar arasında bilgi teorisi çerçevesinde diverjans veya mesafe ölçüleri kullanılır [17]. Alternatif olarak, soyutlama yaklaşımında, sınıfla ilişkili veri örneklerinin ağırlık merkezi (centroid) hesaplanarak ilgili sınıfın veri uzayında bir temsili elde edilir [18],[19].

Sınıfların temsili elde ettikten sonraki evre hiyerarşi inşa etmektir. Bu işlem iki metod aracılığıyla gerçekleştirilebilir: hiyerarşik toplayıcı kümeleme (HAC) ve HDC. HAC, aşağıdan yukarı doğru ilerler; ilk aşamada, tüm sınıflar kendi ayrı kümelerindedir ve sınıflar arasındaki mesafenin de üzerinde, HAC algoritmasında ayrıca tanımlanan bir çeşit meta-mesafe ile sınıf toplulukları arası mesafe belirlemesiyle sınıflar kademeli birleşerek son adımda tek bir küme haline gelirler. Bu bağlamda, HAC algoritmasında kullanılan çeşitli meta-mesafeler bulunmaktadır. Diğer yandan, HDC algoritması yukarıdan aşağı doğru ilerler; ilk aşamada bütün sınıflar tek bir kümede toplanmışken, bütün sınıflar kendi ayrı kümesinde olana dek bir bölücü fonksiyon aracılığıyla sınıf kümeleri kademeli olarak bölünür. Burada bölücü fonksiyon için en uygun ve olası aday standard ML kümeleme algoritmalarıdır.

Hiyerarşiyi elde ettikten sonraki aşamada sınıflandırma görevinde hiyerarşiden nasıl istifade edileceği belirlenir. Bu kapsamda, sınıflandırıcı veya sınıflandırıcıları hiyerarşinin farklı bölgelerine empoze etme yöntemleri vardır [1]. Bunun için iki ana yaklaşım vardır. Birincisi, bir sınıflandırıcının hiyerarşideki bütün etiketleri aynı anda değerlendirdiği Global Sınıflandırma (GC) şeması; ikincisi ise hiyerarşinin farklı strateji yaklaşımlarına bağlı olarak farklı noktalarına lokal sınıflandırıcıların konumlandırıldığı ve bunların senkronize şekilde çalıştığı lokal sınıflandırma varyasyonlarıdır.

Hiyerarşi kalitesini ölçmenin farklı yolları mümkündür. Denetimsiz (unsupervised) bir yaklaşımla, hiyerarşi yapısındaki kümelemelerin, bunlar ata düğümlerde bulunur, kolektif kalitesi hesaplanabilir. Bu kapsamda, kümeleme

kalitesi, farklı kümelerdeki sınıfların birbirinden ne kadar kolay ayırt edilebildiği ve aynı kümelerdeki sınıfların birbirinden ne kadar zor ayırt edilebildiğiyle orantılıdır. Hiyerarşi içerisindeki kümelemelerin bütünü düşünüldüğünde ata düğümlerin hiyerarşi içerisindeki stratejik konumu gibi faktörler de hesaba katılabilir. Bununla birlikte, daha pragmatik bir yaklaşımla, HC performansı ile düz sınıflandırma (FC) performansı karşılaştırılarak hiyerarşi kalitesi denetimli (supervised) biçimde hesaplanabilir.

Bu çalışmada, sınıf koşullu ortalamalar (CCMs) aracılığıyla sınıf temsili elde edildi. Temel sınıflandırıcı olarak son teknoloji sınıflandırma algoritmalarından eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) kullanıldı. Hiyerarşi inşaa aşamasında HDC algoritması kullanıldı ve bu süreçte hiyerarşi kalitesi açısından kritik öneme sahip bölücü fonksiyon için standard kümeleme algoritmalarından K-Means, Gaussian Mixture Method (GMM) ve K-Medoids (K-Med) algoritmaları kullanılarak bunların hiyerarşi kalitesine etkileri karşılaştırmalı olarak incelendi. HC her ata düğümde bir sınıflandırıcı (LCPN) şemasında çalıştırıldı. Hiyerarşi kalitesi HC performansı ile FC performansı karşılaştırılarak ölçüldü. Deneyler, 6 tane gerçek dünya veri seti kullanılarak gerçekleştirildi.

Önerilen yaklaşım, Python dilinde standart programlama kütüphaneleri ve araçları kullanılarak uygulanmıştır, bu da uygulanmasını nispeten kolay hale getirmektedir. Kaynak kodunun açık kaynak¹ olarak sunulması ve çalışma materyallerindeki detaylı açıklamalar, hiyerarşi üretme için kullanılan hiyerarşik kümeleme yöntemlerinin yanısıra hiyerarşik sınıflandırma uygulamasını keşfetmekle ilgilenen araştırmacılar ve uygulayıcılar için yaklaşımın erişilebilirliğini ve kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bu makaledeki sonuçlar tekrarlanabilir niteliktedir ve kod, farklı sınıflandırıcılar ve farklı veri kümeleri ile çalışacak şekilde kolayca uyarlanabilir.

Metnin yapısı şu şekildedir: Materyal ve metod bölümünde önce çalışmada kullanılan otomatik hiyerarşi üretme aşamaları açıklanmış, ardından performans ölçme ve değerlendirme yöntemleri tanıtılmıştır. Bulgular ve tartışma bölümünde, üretilen hiyerarşilerin performansları analiz edilmiş ve bulgular yorumlanmıştır. Son olarak sonuç bölümünde çalışmada elde edilen dikkate değer sonuçlara vurgu yapılarak çalışma özetlenmiştir.

Materyal ve Metod

Bu bölümde, gelecekteki açıklamaların daha iyi anlaşılması için bazı notasyonlar tanıtılmıştır. N örnek ve m öznitelige sahip bir veri kümesi D olsun, her bir veri örneği $x^i = \{x^{i1}, x^{i2}, \dots, x^{im}\}$ olarak temsil edilsin. Sınıf sayısı ve dolayısıyla düz etiket sayısı n olan böyle bir veri setinde düz etiketler $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ kümesi ile ifade edilir.

İkili ağaç tipi hiyerarşi yapısını göstermek için iç içe geçmiş küme $P = \{P_1, P_2, \dots, P_{n-1}\}$ kullanılır. Burada P_i , i 'inci ata düğümü gösteren bir küme olup $P_i = \{P_{i,0}, P_{i,1}\}$ ifadesinde gösterildiği gibi alt kümeleri içerir. Burada $P_{i,0}$ ve $P_{i,1}$ evlat düğümler olup sırasıyla sol ve sağ evlatları gösterir ve her biri hiyerarşik yapıya göre düz etiketler içeren bir kümedir.

Sınıflar Arası Benzersizlik Elde Etme

Sınıflar arası benzersizlik elde etmek için ön şart her bir sınıfın uzayda bir nesne olarak tanımlanmasıdır. Bu tanıma uygun olarak uzaydaki mesafe üzerinden benzersizlik ölçüsü elde edilmesi yolu sağlanmış olur. Bu çalışmada CCMs yoluyla ön şart sağlandı. Yalnız, CCMs hesaplanmadan önce veri örnekleri üzerinde boyut azaltma işlemi uygulandı. Sınıflar uzayda tanımlandıktan sonra, sınıflar arası mesafe, hiyerarşi inşaa sürecinde kullanılacak metriğe bağlıdır.

Doğrusal Ayrımcı Analizi

CCMs'ı hesaplamadan önce boyut azaltmanın uygulanması, hiyerarşik kümelemenin kalitesini artırmak için değerli bir strateji olarak hizmet eder [20]. Bu yaklaşım, verideki gürültünün etkisini azaltırken en ayırt edici özellikleri seçmeye odaklanır. Bu amaçla, Doğrusal Ayrımcı Analizi (LDA) boyut azaltma tekniği olarak seçilir.

LDA, orijinal olarak 1936'da Fisher tarafından önerilen [21], güçlü bir boyut azaltma yöntemi ve etkili bir sınıflandırma aracı olarak hizmet eder. Temel amacı, farklı sınıflar arasındaki kritik ayırt edici bilgiyi korurken bir veri kümesinin boyutunu azaltmaktır. Esasen, LDA, sınıf merkezleri arasındaki mesafeyi maksimize ederken her sınıf içindeki varyansı minimize edecek şekilde yeni bir boyut seti tanımlar, orijinal özelliklerin lineer kombinasyonları olarak ifade edilir.

En yüksek toplam varyansı belirleyen Temel Bileşen Analizinin (PCA) aksine, LDA, sınıf merkezleri arasındaki mesafeyi maksimize etmek ve sınıflar arasında yayılımı minimize etmek için yeni eksenler oluşturur. Bu yaklaşım, genel değişkenliği yakalamaktan ziyade sınıflar arasındaki ayrımı artırmak amacıyla avantaj sağlar.

LDA'nın ayırt edici özelliği, boyut azaltma sürecinde sınıf etiketlerini içermesidir. Sınıf ile ilişkili varyans üzerinde odaklanarak, LDA, sınıflar arasında ayırt etmeye yarayan en uygun özellikleri belirler. Bu denetimli özellik, daha etkili kümeleme ve sınıflandırma sonuçlarına katkıda bulunur.

Bu bağlamda boyut azaltma, veriyi yüksek boyutlu uzaydan, \mathbb{R}^m , daha düşük boyutlu uzaya, \mathbb{R}^k , dönüştürmeyi içerir. Azaltılmış boyut sayısı k için uygun değerin seçimi otomatik bir süreç olarak uygulanır. Gerçek boyut azaltma işleminden önce, kullanılan boyut azaltma algoritması tüm m bileşeni kullanarak eğitilir. Bu eğitim süreci, her bir bileşenin açıklanan varyans yüzdesini sağlar. Sonuç olarak, tüm bileşenlerin açıklanan varyanslarının toplamı 1.0'a eşittir. k seçimi, açıklanan varyansın kümülatif toplamının 0.95'i aşması veya eşit olması durumunda belirlenir. Başka bir deyişle, bileşenlerin varyansları toplamının en azından 0.95 olduğu bileşen sayısı k olarak belirlenir. Bu yöntem, verideki varyansın önemli bir kısmının daha düşük boyutlu temsilde korunduğundan, boyut azaltmayı bilgi koruması ile dengelemeye yardımcı olur.

Sınıf Koşullu Ortalamalar

Sınıf koşullu ortalamalar, her sınıf içindeki özniteliklerin ortalama değerlerini belirtir. Formel olarak her sınıf c_j , ($1 \leq j \leq n$) için sınıf koşullu ortalamalar şu şekilde hesaplanabilir:

$$\mu(c_j) = \{\mu(c_j^1), \mu(c_j^2), \dots, \mu(c_j^k)\} \quad (2)$$

¹ https://github.com/alagoz/hge_extended

Algoritma 1. HDC Algoritma Adımları

1. Başlatma:

- Boş bir küme, $P = \{\}$, tanımla.
- Toplam nesne (sınıf) sayısı n olmak üzere bütün nesneleri içeren $C_0 = \{c_0, c_1, \dots, c_{n-1}\}$ kök kümeyi P birleşik kümesine yerleştir. Böylece başlangıç biçimlenimi $P = \{C_0\}$ ve $|P| = 1$ şeklinde olacaktır.
- Bir sonraki bölünecek küme C_0 olduğundan $i = 0$ ayarla.

2. Bölme Adımı:

- $|P_i| > 2$ ise P_i kümesini bölücü fonksiyon $f_c(\cdot)$ yardımıyla böl ve evlat kümeleri elde et. Böylece $P_{i,0}, P_{i,1} \leftarrow f_c(P_i)$
- $|P_i| \leq 2$ ise bölme için kontrol edilecek küme indisini güncelle: $i = i + 1$

3. Güncelleme Adımı:

- Evlat kümelerden çapı (eleman sayısı) en büyük olanı tespit et:

$$P_{i,j} = \operatorname{argmax}_{j \in \{0,1\}} \{P_{i,0}, P_{i,1}\}$$

- Evlatları çaplarına göre birleşik kümeye yerleştir:

$$|P_{i,j}| > 1 \text{ ise } P_{|P|+1} = P_{i,j}$$

$$|P_{i,\{0,1\} \setminus j}| > 1 \text{ ise } P_{|P|+2} = P_{i,\{0,1\} \setminus j}$$

- Bölme için kontrol edilecek küme indisini güncelle: $i = i + 1$

4. Adım 2 ve 3'ü Tekrarla:

Bölme ve güncelleme adımlarını $n - 1$ kez tekrarla.

Burada, $\mu(c_j^i)$, c_j sınıfına ait tüm örneklerin üzerinde bulunduğu j özelliğinin ortalamasını temsil eder. Sonuç olarak, bir sınıfa ait olan tüm veri örnekleri, k -boyutlu bir uzayda vektörler olarak temsil edilir ve bu uzayda tek bir noktaya konsolide edilir. HDC bağlamında, bu sınıf koşullu ortalamalar kümeleme algoritmasının girdi verileri olarak hizmet eder.

Hiyerarşik Bölücü Kümeleme

HDC yukarıdan aşağı çalışan bir algoritma olup benimsenen temel prensip bütün nesneleri kapsayan bir kümeyi özyinelemeli olarak daha küçük kümelere bölmektir. Çalışmada uygulanan hiyerarşik bölücü sınıflandırmanın amacı otomatik hiyerarşi üretme olduğundan ve hiyerarşik sınıflandırmada kullanılan sınıflandırıcılar her ata düğümde konumlandığından oluşturulan hiyerarşi özellikle ata düğüm bilgilerini içermek için tasarlanmıştır.

Çalışmada kullanılan HDC adımları Algoritma 1'de verilmiştir. Algoritmanın amacı ata düğümlerden oluşan bir P üst kümesi oluşturmaktır. Her ata düğüm, kendi atasından gelen sınıfların iki kümeye bölünmesiyle oluşan kümeleri içeren bir birleşik kümedir. Ata-evlat ilişkisi P kümesi içeriği itibarıyla dolaylı olarak verili iken bu çalışma için geliştirilen programda açık bir şekilde de kodlanmıştır.

Algoritmanın etkililiğinde en temel faktör aralarındaki benzersizliğin olabildiğince yüksek ve heterojen olduğu alt kategoriler oluşacak şekilde üst kategorileri bölmektir.

Burada bölücü fonksiyonun kümeleme yetneği önem arz ediyor. Metnin devamında bu çalışmada seçilen fonksiyonlar tanıtılmıştır.

Bölücü Fonksiyon Olarak Kümeleme Algoritmaları

Hiyerarşi inşa etmek için kullanılan HDC algoritmasının etkililiğinde en temel faktör birbirinden olabildiğince benzersiz ve heterojen alt kategoriler oluşacak şekilde üst kategorileri bölerek alt kategorileri oluşturmaktır. Bu görev için denetimsiz öğrenme yöntemiyle çalışan kümeleme algoritmaları başat adaylardır. Bu algoritmalar denetimsiz çalışmaları itibarıyla veri noktalarının iç yapısının keşfine göre çalışırlar.

Farklı kümeleme modeline sahip çok sayıda kümeleme algoritmaları mevcuttur. Kümeleme yaklaşımlarına göre mesafe ve ağırlık merkezi, dağılım, yoğunluk, grafik-temelli veya bağlantı modelleri başlıca kümeleme algoritma kategorileridir. Bu çalışma çerçevesinde kümelenecek amaçlanan nesnelere sınıfların tipik özellikleri i) sınıf sayısı ortalama bir veri setindeki örnek sayısından çok daha düşük, ii) veri örneklerinin ortalaması olarak ifade edilen sınıflar mesafe modelinde kullanılmaya daha meyilli olduğu için en yaygın olarak kullanılan K-Means algoritmasını kullanmak en beklenen tercih olarak gözükmüyor. K-Means algoritmasına ek olarak aynı kümeleme yaklaşımında çalışan ve aykırı örnekler daha dayanıklı olan K-Medoids algoritması da tercih edildi. Son olarak, her ne kadar örnek setinin küçüklüğü itibarıyla dağılım modeli oluşturmak zorlama bir yöntem gibi olsa da karşılaştırma amacıyla GMM algoritması da deneylerde kullanıldı. Sırada bu algoritmaların nispeten kısa tanımları vardır.

K-Means Algoritması

K-means, benzer veri noktalarını bir araya getirme görevi olan kümeleme için kullanılan popüler bir denetimsiz makine öğrenimi algoritmasıdır. Algoritma, bir veri kümesini K kümesine bölmeyi amaçlar, her bir veri noktası en yakın ortalamaya sahip kümelere aittir.

Algoritma 2. K-Means Algoritma Adımları

1. Başlatma:

- Küme sayısını $r = 2$ olarak tanımla.
- r küme merkezini temsil eden rastgele başlatılmış r küme merkezini seçin.

2. Atama Adımı:

Her veri noktasını, en yakın ortalamaya sahip kümesine ata. Yakınlık genellikle Öklidyen mesafe kullanılarak ölçülse de, diğer mesafe metrikleri de kullanılabilir.

3. Güncelleme Adımı:

Her kümenin merkezini, o kümeye atanmış tüm veri noktalarının ortalamasını alarak yeniden hesapla.

4. Adım 2 ve 3'ü Tekrarla:

Atama ve güncelleme adımlarını yakınsama sağlanana kadar tekrarla. Yakınsama, merkez noktaları artık önemli ölçüde değişmiyorsa veya önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına ulaşıldığında gerçekleşir.

Algoritma, küme içindeki karelerin toplamını minimize etmeyi amaçlar, bu da her küme içindeki veri noktalarını mümkün olduğunca benzer yapmaya çalışır. Küme sayısı seçimi önemlidir ve genellikle alan bilgisi veya deneme yanılma gerektirir. Bu çalışmada amaç ikili ağaç hiyerarşisi üretmek olduğu için küme sayısı 2 olarak ayarlanmıştır.

K-means, merkez noktalarının başlangıç konumuna duyarlıdır. Farklı başlatmalar farklı nihai kümeleri üretebilir. Algoritma, bir yerel minimuma ulaşabilir ve bu sorunu azaltmak için farklı başlatmalarla birden fazla çalıştırma yapılabilir. K-Means uygulama adımları Algoritma 2'de verilmiştir. Noktalar arası mesafe için farklı mesafe metrikleri kullanılabilir. Bu çalışmada "euclidean" mesafe tercih edilmiştir.

K-Medoids Algoritması

K-Med algoritması [22], K-Means algoritmasının bir varyasyonu olan kümeleme algoritmasıdır. Hem K-Means hem de K-Med, bir veri kümesini r kümesine bölmeyi amaçlarsa da, temel fark kümelerin merkezlerini nasıl temsil ettiklerindedir. K-Med uygulama adımları Algoritma 3'te verilmiştir.

K-Means'ten farklı olarak, K-Med medoid kullanır, bu da bir kümenin içindeki tüm diğer noktalara olan benzerliklerin toplamını en aza indiren veri noktasıdır. Medoid, bir küme içinde, tüm diğer noktalara olan benzerliklerin toplamını en aza indiren veri noktasıdır. Özellikle aykırı değerlerin bulunduğu durumlarda, medoid ortalama'dan daha güvenilir bir ölçüdür.

K-Med algoritmasında benzersizlik ölçüsü (veya mesafe metriği) seçimi kritiktir. Verinin doğasına bağlı olarak Euclidean mesafe, Manhattan mesafe veya diğer benzerlik ölçüleri kullanılabilir. Ortalama yerine temsilci bir nokta (medoid) kullanılması nedeniyle K-means'a göre aykırı değerlere daha dayanıklıdır. Ortalamanın anlamlı veya temsilci bir merkez olamayacağı durumlar için uygundur.

Diğer yandan K-means'a göre hesaplama maliyeti daha yüksektir, özellikle medoid değiş tokuşu içerdiği için. Ayrıca başlangıç medoidlerin seçimine duyarlıdır.

Algoritma 3. K-Medoids Algoritma Adımları

1. Başlatma:

- Küme sayısı K 'yi seç.
- K küme merkezini temsil eden rastgele başlatılmış K küme merkezini seçin.

2. Atama Adımı:

Her veri noktasını, en yakın ortalamaya sahip kümesine ata. Yakınlık genellikle Öklidyen mesafe kullanılarak ölçülse de, diğer mesafe metrikleri de kullanılabilir.

3. Güncelleme Adımı:

Her kümenin merkezini, o kümeye atanmış tüm veri noktalarının ortalamasını alarak yeniden hesapla.

4. Adım 2 ve 3'ü Tekrarla:

Atama ve güncelleme adımlarını yakınsama sağlanana kadar tekrarla. Yakınsama, merkez noktaları artık önemli ölçüde değişmiyorsa veya önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına ulaşıldığında gerçekleşir.

Algoritma 4. EM Algoritma Adımları

1. E adımı:

Her veri noktasının her bir Gauss bileşenine ait olma olasılığını (sorumluluk) tahmin et.

2. M adımı:

Sorumluluklara bağlı olarak parametreleri (ortalama, kovaryans ve ağırlıklar) güncelle.

3. Adım 1 ve 2'yi Tekrarla:

E ve M adımlarını yakınsama sağlanana kadar tekrarla. Yakınsama, parametreler artık önemli ölçüde değişmiyorsa veya önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına ulaşıldığında gerçekleşir.

Özetle, K-Medoids algoritması, K-Means algoritmasının bazı sınırlamalarına çözüm sunan dayanıklı bir kümeleme algoritmasıdır, özellikle aykırı değerlerin küme merkezlerini önemli ölçüde etkileyebileceği durumlarda kullanılır. Medoid, kümeler için daha anlamlı bir merkez sağlamak adına geniş bir uygulama alanında kullanılır.

Gauss Karışım Modelleri Algoritması

GMMs, bir karışım modelini temsil eden, çeşitli Gauss (normal) dağılımların bir karışımını içeren olasılık modelleridir. Bir GMM, verinin birkaç Gauss dağılımının karışımı tarafından oluşturulduğunu varsayar. Karışımındaki her Gauss bileşeni, verideki bir küme veya gizli alt grubu temsil eder.

GMM'lerin olasılık yoğunluk fonksiyonu, bireysel Gauss bileşenlerinin Olasılık Dağılım Fonksiyonlarının (PDF) ağırlıklı toplamıdır. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$P(x) = \sum_{i=1}^k \pi_i \mathcal{N}(x|\mu_i, \Sigma_i) \quad (3)$$

Burada π_i ağırlığı, yani her Gauss bileşeninin genel karışıma katkısını temsil eder. μ_i ortalamayı, yani her Gauss bileşeninin merkezini belirler. Σ_i kovaryansı, yani her Gauss dağılımının yayılmasını veya şeklini belirtir. GMM'lerin eğitilmesi bu parametrelerin ayarlanması ile karakterizedir. Bu yaygın olarak yinelemeli biçimde Maksimum Olabilirlik Tahmini (MLE) problemini gizli parametreler aracılığıyla çözen Beklenti - Maksimizasyon (EM) algoritmasıyla sağlanır. EM uygulama adımları Algoritma 4'te verilmiştir.

GMM'ler başlangıca duyarlıdır. Ortalama başlatmak için genellikle K-Means kümeleme veya hiyerarşik kümeleme kullanılır, kovaryanslar için kimlik matrisleri, ve ağırlıklar eşit olabilir.

GMM'ler belirli bir veri noktasının belirli bir kümeye ait olma olasılığını ölçen olasılık temellidir. GMM'ler genellikle veri noktalarının birden çok kümeye farklı olasılıklarla ait olabileceği yumuşak kümeleme için kullanılır. Diğer yandan, ilk parametre seçiminin sonuçları etkilemesi şeklinde başlangıca duyarlılık hassasiyeti ve bileşen sayısının arttığı oranda GMM'leri eğitime maliyetinin artması GMM'nin kısıtlarındandır.

Özet olarak GMM'ler, verinin altında yatan veri dağılımını anlamak veya olasılıksal kümeleme gerçekleştirmek gereken çeşitli alanlarda uygulama bulan çok yönlü modellerdir.

Tablo 1. Deney için kullanılan veri setleri

Veri Seti	n	m	N	F1 Skoru	Doğruluk Skoru
LED-display-domain-7digit	10	7	500	0.683±0.044	0.684±0.044
ecoli	8	7	336	0.739±0.113	0.859±0.025
anacatdata_broadwaymult	7	3	267	0.144±0.036	0.212±0.045
glass	6	9	214	0.721±0.075	0.780±0.055
eucalyptus	5	14	641	0.621±0.033	0.628±0.030
prnn_cushings	4	2	27	0.629±0.211	0.700±0.163

Deney Kurgusu ve Performans Değerlendirme

Temel Sınıflandırıcı

Çalışmada temel sınıflandırıcı olarak son teknoloji ML sınıflandırıcı modellerinden XGBoost kullanıldı [23]. XGBoost, özellikle yapılandırılmış/tablo verileri ve regresyon problemleri için tasarlanmış geniş çapta benimsenen açık kaynaklı bir ML kütüphanesidir. Denetimli (supervised) öğrenme görevleri için tasarlanmıştır. Gradyan artırma yönteminden yararlanarak zayıf öğrencilerin (genellikle karar ağaçları) ardışık olarak birleşimini oluşturur. XGBoost, karmaşık modelleri cezalandırarak aşırı uyumlanmayı azaltan L1 (Lasso) ve L2 (Ridge) düzenleme terimlerini içerir. Model basitleştirme için “ağaç budama” ve hiperparametre ayarlaması için yerleşik çapraz doğrulama gibi dikkate değer özellikler bulunur. XGBoost, özellik seçimi ve model yorumlanabilirliğine yardımcı olan bir özellik önem puanı sağlar.

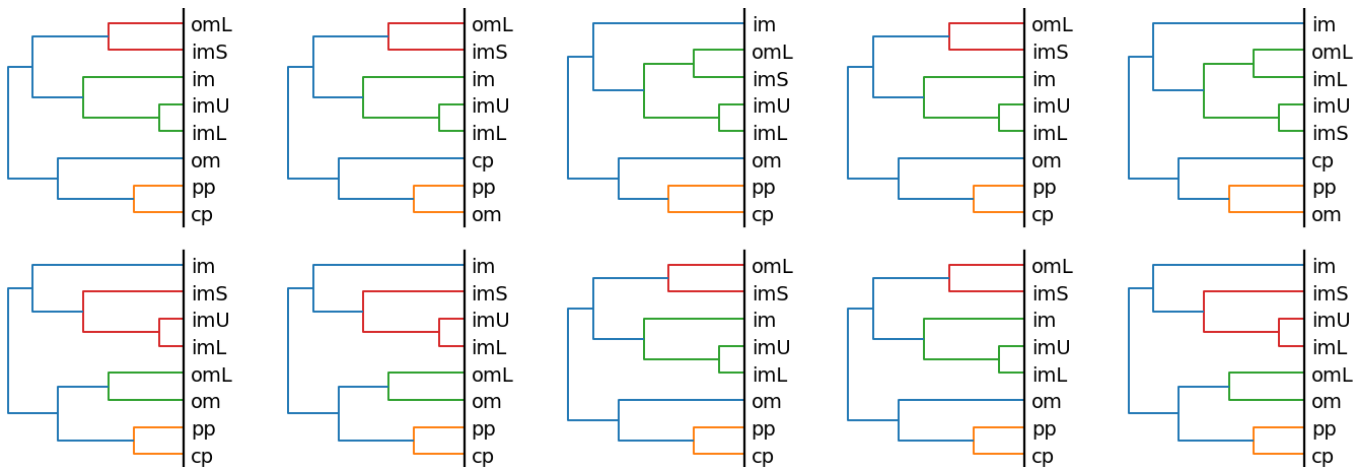
Kullanılan Veri Setleri

Kümele algoritmalarının HC performansı etkisini ölçmek için çok sınıflı gerçek dünya veri setleri kullanıldı. Veri setleri ML araştırma ve deneylerini kolaylaştırmayı amaçlayan açık kaynaklı bir çevrimiçi platform olan OpenML deposundan [24] elde edildi. Farklı sınıf sayısına ait 6 veri seti Python ortamında OpenML API [25] aracılığıyla indirildi. Kullanılan veri setlerine genel bir bakış Tablo 1’de gösterildi.

Performans Değerlendirme

Sınıflandırma modellerinin görünmeyen veri üzerindeki performansını değerlendirmek için Monte Carlo çapraz doğrulama yöntemi kullanıldı. Tekrar edilmiş rassal alt örnekleme olarak ta bilinen Monte Carlo çapraz doğrulama sürecinde veri seti birden fazla iterasyon için rassal eğitim ve test setlerine bölünür. Eğitim ve test setlerinin farklı çalıştırmalarda yeniden üretilebilirliğini sağlamak için rassal karıştırma (shuffling) nüvesi (seed) iterasyon numarası olarak belirlendi. Bu çalışmada Monte Carlo 20 kez çalıştırıldı ve her defasında test kümesinin oranı %20 tutuldu. Böylelikle her yinelemede farklı bir eğitim seti olduğundan potansiyel olarak –her ne kadar tercih edilmese de– farklı bir hiyerarşi üretilebilir. Şekil 2’de bir örnek vaka çalışması olarak “ecoli” veri seti kullanılarak 10 yinelemede üretilen hiyerarşiler gösterildi. Dikkat edildiğinde bazı yinelemelerde eş hiyerarşilerin üretildiği gözlemleniyor. Bir veri setinde farklı eğitim setleri kullanılması durumunda üretilen hiyerarşilerin emsalliliğinin değişmemesi oranında otomatik hiyerarşi kararlılığından söz edilebilir. Bu kararlılık en azından sezgisel olarak hiyerarşi kalitesinin yüksek olduğu anlamına gelebilir. Yine de bu kanaatin, yani hiyerarşik kararlılık ile hiyerarşi kalitesi arasında korelasyon olduğunun yeterli, yani istatistiksel anlamı (statistical significance) gösterecek miktarda deneysel testlerle doğrulanması gerekmektedir.

Performans değerlendirme metriği için doğruluk ve F1 skoru kullanıldı. Her iki metrik te çoklu Monte Carlo çalıştırmalarından elde edilen ortalama ve ± sembolünü takip eden standard sapma ile gösterildi. Küsürat 3 dijital ile gösterildi. Doğruluk, sınıflandırıcının genel doğruluğunu, doğru tahmin edilen örneklerin toplam örneklerle oranını



Şekil 2. Monte Carlo sürecinde *ecoli* veri set için üretilen hiyerarşiler: Düz etiketler hücre içerisinde protein konumunu gösterir: cp (cytoplasm), im (inner membrane without signal sequence), pp (periplasm), imU (inner membrane, uncleavable signal sequence) 35 om (outer membrane) 20 omL (outer membrane lipoprotein) 5 imL (inner membrane lipoprotein) 2 imS (inner membrane, cleavable signal sequence) 2

Tablo 2. Performans iyileşmesi sonuçları.

Veri Seti	n	Skor	FC	K-Med	K-Means	GMM
LED-display-domain-7digit	10	F1	0.683±0.044	0.692±0.042	0.713±0.037 ↑	0.713±0.037 ↑
		Doğruluk	0.684±0.044	0.695±0.043 ↑	0.711±0.039 ↑	0.711±0.039 ↑
ecoli	8	F1	0.739±0.113	0.743±0.089	0.825±0.064 ↑	0.825±0.064 ↑
		Doğruluk	0.859±0.025	0.855±0.022	0.867±0.025	0.867±0.025
analcadata broadwaymult	7	F1	0.144±0.036	0.160±0.041	0.159±0.038	0.158±0.038
		Doğruluk	0.212±0.045	0.233±0.054 ↑	0.233±0.051 ↑	0.232±0.051 ↑
glass	6	F1	0.721±0.075	0.686±0.093	0.687±0.093	0.687±0.093
		Doğruluk	0.780±0.055	0.756±0.064 ↓	0.762±0.069	0.762±0.069
eucalyptus	5	F1	0.621±0.033	0.646±0.042 ↑	0.648±0.037 ↑	0.648±0.037 ↑
		Doğruluk	0.628±0.030	0.649±0.039 ↑	0.651±0.034 ↑	0.651±0.034 ↑
prnn cushings	4	F1	0.629±0.211	0.759±0.173 ↑	0.716±0.170	0.716±0.170
		Doğruluk	0.700±0.163	0.775±0.142	0.750±0.144	0.750±0.144

* Ortalama skorun FC performansından yüksek olması kalın yazıtı ile farkın istatistiksel anlamın olması ise ↑ sembolüyle gösterildi.

ölçerek nicelendirir. Sınıflandırıcının performansının sezgisel bir değerlendirmesini sağlar.

Diğer yandan ikili sınıflandırma görevlerinde yaygın olarak kullanılan F1 skoru, hassasiyet (precision) ve geri çağırma (recall) arasında denge sağlayan, bir sınıflandırıcının performansının tek bir sayısal ölçüsünü sunan bir metriktir. Hassasiyet, model tarafından yapılan pozitif tahminlerin doğru olma oranını ölçerken, recall (sensitivite olarak da bilinir) modelin veri kümesindeki tüm pozitif örnekleri doğru bir şekilde tanıma yeteneğini ölçer. Sınıflar arasında dengesizlik olduğu durumlarda özellikle yararlı olup yanlış pozitifler ve yanlış negatiflerin kapsamlı bir değerlendirmesini sağlar.

Çoklu sınıflandırma bağlamında, tahmin edilecek iki sınıftan ötesinde daha fazla sınıf olduğunda, sınıflandırıcının performansını değerlendirmek için F1 skoru genişletilebilir. Ancak, çoklu sınıflı durumlar için F1 skorunun hesaplanması, ikili sınıflandırma durumuna kıyasla bazı ayarlamalar gerektirir. Bu ayarlar her sınıfa ya da her örneğe eşit önem verilmesine veya her sınıfın önemi frekansıyla orantılı olmasına göre değişir. Bu çalışmada her sınıfa eşit önem verildiğinden çoklu sınıf durumuna ayarlamalar için Makro-Ortalama F1 skoru yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşımda, her sınıf için F1 skorları ayrı ayrı hesaplanır ve ardından tek bir F1 skoru elde etmek için ortalanır. Her sınıf, büyüklüğüne bakılmaksızın hesaplamada eşit ağırlığa sahiptir.

Hiyerarşi kullanmanın performansa olan etkisini ölçmek için öğrenme verimi tanımlandı. Öğrenme verimi basitçe HC ortalama F1 skorunun FC ortalama F1 skoruna oranının 100 katı olarak değerlendirildi. Oranın >100 olması performansta artma, <100 olması ise azalma olduğunu gösterir.

İstatistiksel Test

Bu çalışmada bir veri seti üzerinde hiyerarşik ve düz sınıflandırma performanslarını karşılaştırmak amaçlanmaktadır. Bilindiği gibi bir veri seti için Monte Carlo çapraz doğrulama yöntemiyle 20 kez HC ve FC skoru

üretiliyor. Bu iki süreçte elde edilen skorlar arasında istatistiksel anlama sahip bir fark olduğunu göstermek için parametrik olmayan bir istatistiksel hipotez testi, Wilcoxon işaretli sıralama testi (Wilcoxon signed-rank test) kullanıldı [26]. İkili ölçümleri karşılaştırmak için kullanılan parametrik çiftli T-testi (paired T-test) özelinde kabul edilen verilerin normal dağıldığı gibi varsayımları üstlenmemek için bu yöntem tercih edildi. Ancak, bu test eşleştirilmiş gözlemler arasındaki farkların sürekli olduğunu ve en azından sıralı (ordinal) bir ölçekte ölçüldüğünü varsayar. Testte kullanılan nul hipotezi şu şekilde ifade edilir:

H_0 : Popülasyonda eşleştirilmiş gözlemler arasında fark yoktur.

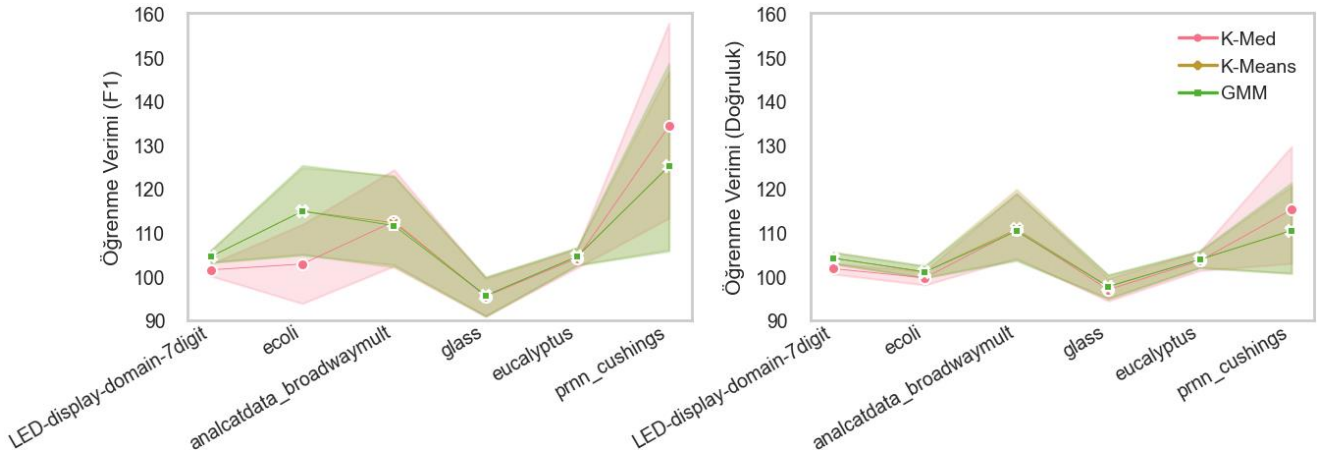
Test sürecinde elde edilen test istatistiği W şu şekilde ifade edilir:

$$W = \sum_{i=1}^{N_r} \text{sgn}(x_{2,i} - x_{1,i})R_i \quad (4)$$

Burada N_r popülasyondaki gözlem sayısını –bu, çalışmada Monte Carlo çapraz doğrulama yönteminin kaç kez çalıştırıldığına karşılık gelir–, $\text{sgn}(\cdot)$ işaret fonksiyonunu, $x_{1,i}$ ve $x_{2,i}$ i 'inci gözlemden karşılaştırılan örnekleri –bu çalışmada FC ve HC skorlarına karşılık gelir– ve son olarak R_i x_1 ve x_2 arasındaki mutlak farkların mutlak büyüklüğüne dayalı sıralamayı ifade eder. Test istatistiği W değeri işaretli sıralama dağılımıyla karşılaştırarak p değeri üretilir. Bu çalışmada nul hipotezi reddetmek için $p < 0.05$ seçildi.

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma standard kümeleme algoritmalarından K-Med, K-Means ve GMM'nin hiyerarşik bölücü kümeleme yönteminde bölücü işlevinde kullanılmasıyla otomatik olarak elde edilen hiyerarşilerin çok sınıflı veri setlerinin sınıflandırma performansına etkisini 6 gerçek dünya veri seti üzerinde deney yaparak incelemektedir. Temel sınıflandırıcı algoritması XGBoost, Python dilinde xgboost paketi



Şekil 3. F1 ve doğruluk skoru için elde edilen öğrenme verimlerinin bölücü fonksiyonlar, veri setleri ve performans metrikleri açısından karşılaştırması. Monte Carlo sürecinde meydana gelen öğrenme verimlerinin ortalaması işaretçilerle, güvenlik aralığı ise gölgelendirilmiş alan ile vurgulandı

kullanılarak çalıştırıldı. Her hangi bir veri seti özelinde sınıflandırıcının hiperparametre ayarı yapılmadı; onun yerine pakette tanımlı öndeğer parametreler kullanıldı.

Performans İyileşmesi Analizi

HC ile FC F1 ve doğruluk skoru açısından performans karşılaştırması Tablo 2’de özetlendi. Başlıca dikkat çeken gözlemlerden biri K-Means ve GMM *analcatdata broadwaymult* veri setinde görünen ufak fark hariç bütün durumlarda aynı performans göstermesi oldu. Sonuçlar toplamda 6 veri setinin içerisinde kaç tanesinde performans iyileşmesi elde edildiği bakımından incelendiğinde K-Med kullanılarak üretilen hiyerarşilerde F1 skoru açısından 2’si istatistiksel anlama sahip 5 veri setinde ortalama skorda artış gözlemlenirken doğruluk skoru açısından 3’ü istatistiksel anlama sahip 4 veri setinde ortalama skorda artış gözlemlendi. K-Means ve GMM kullanılarak üretilen hiyerarşilerde hem F1 hem doğruluk skoru açısından 3’ü istatistiksel anlama sahip 5 veri setinde ortalama skorda artış gözlemlendi. Bu sayılar hiyerarşi oluşturma için K-Means ve GMM’nin K-Med’e nispeten daha terich edilebilir kümeleme algoritmaları olabileceğini ima ediyor.

Sonuçlar veri setlerinin sınıf sayıları ile ilişkisi çerçevesinde incelendiğinde, F1 skoru açısından, K-Med kullanımında 4 ve 5 sınıflı *eucalyptus* ve *prnn_cushings* gibi daha az sınıflı veri setlerinde performansta istatistiksel anlama sahip gelişme elde edildi. K-Means ve GMM kullanımında 10 ve 8 sınıflı *LED-display-domain-7digit* ve *ecoli* gibi nispeten daha çok sınıflı veri setleri ile birlikte 5 sınıflı *eucalyptus* veri setinde performansta istatistiksel anlama sahip gelişme elde edildi. Diğer yandan doğruluk skoru açısından, K-Med kullanımında 10, 7 ve 5 sınıflı *LED-display-domain-7digit*, *analcatdata broadwaymult* ve *eucalyptus* gibi hem çok hem az sınıf sayılı veri setlerinde istatistiksel anlama sahip performans gelişimi elde edildi. K-Means ve GMM kullanımında da aynı veri setlerinde istatistiksel anlama sahip performans gelişimi elde edildi. Bu sonuçlar K-Med bölücü fonksiyonunun daha az sınıf sayılı veri setlerinde kullanılmasını daha çok sınıf sayılı veri setlerinde kullanılmasından daha avantajlı olabileceğine işaret etse de bu gözlemi istatistiksel anlamda desteklemek için yeterli sayıda veri seti kullanılmamıştır.

Hiyerarşik biçime dönüştürmenin sınıflandırma performansına etkisi veri setleri açısından değerlendirildiğinde her veri setinin hiyerarşik biçime

yatkınlığı açısından farklı karakter sergilediği gözlemlendi. Spesifik olarak veri setleri tek tek incelendiğinde *eucalyptus* veri seti gerek hiyerarşi üretme tasarısı gerekse kullanılan performans metriği farketmeksizin istatistiksel anlamlı performans gelişimi gösterdi. Bu bulgu, bu veri setinin hiyerarşik biçime dönüşmeye elverişli olduğunu gösterir. Benzer şekilde, *LED-display-domain-7digit* veri seti de tek bir istisna dışında her durumda istatistiksel anlamlı performans gelişimi gösterdiğinden bu veri setinin de hiyerarşik biçime dönüşmeye yatkın olduğu söylenebilir. Diğer taraftan *glass* veri tipi her durumda, hatta K-Med ve doğruluk skoru surumunda istatistiksel anlamlı olacak şekilde performans gerilemesi gösterdi. Bu bulgu, bu veri setinin hiyerarşik biçime pek yatkın olmadığını gösterir. Ancak yine de bu veri setinin başka bir hiyerarşik biçime dönüşmesi durumunda efektif olarak performansta iyileştirme elde edilmesinin mümkün olmadığı iddia edilemez; çünkü farklı bir hiyerarşi üretme konfigürasyonu ve farklı bir temel sınıflandırıcı kullanılması durumunda performans iyileşmesi deneysel olarak bildirilmiştir [20]. Belki bu veri seti için verimli ve efektif bir hiyerarşinin bu çalışmada kullanılan hiyerarşi üretme yöntemler marifetiyle henüz bulunmadığı kaydı düşülebilir. Diğer veri setlerinde nispeten değişken hiyerarşi yatkınlığı karakterleri gözlemlendi. Spesifik olarak *ecoli* veri setinde K-Means ve GMM kullanılarak üretilen hiyerarşiler daha kaliteli olmaya yatkın iken *prnn_cushings* veri setinde K-Med kullanılarak üretilen hiyerarşilerin daha verimli olduğu izlenimi oluştu. *Analcatdata broadwaymult* veri setinde ise genelde efektif hiyerarşi elde etme elverişliliği gözlemlendi ama bu etkinlik sadece doğruluk performans metriği açısından istatistiksel anlam kazandı.

Öğrenme Verimi Analizi

Şimdiye kadarki analizlerde performans iyileştirmesinin olup olmaması ve bu iyileştirmenin istatistiksel anlamının olup olmaması dikkate alınırken iyileştirmenin hangi oranda olduğu incelenmedi. İyileşme oranını nicel olarak gösteren öğrenme verimlerinin bölücü fonksiyonlar, veri setleri ve performans metrikleri arasında karşılaştırmasını içeren grafik Şekil 3’te gösterildi. İlk göze çarpan genel olarak F1 skoru kriterinde doğruluk skoru kriterine göre genelde daha yüksek verim elde edilmesidir.

Bölücü fonksiyonlar eşliğinde elde edilen öğrenme verimi açısından sonuçlar genelde K-Means ve GMM kümeleme

algoritmalarının daha yüksek verime yol açtığını gösterdi. Daha detaylı incelendiğinde hem F1 hem doğruluk kriterine göre 10 sınıflı *LED-display-domain-7digit* ve 8 sınıflı *ecoli* veri setlerinde K-Means ve GMM daha iyi iken 7 sınıflı , 6 sınıflı ve 5 sınıflı veri setlerinde yakın verim gözlemlendi. Sadece 4 sınıflı veri setinde K-Med biraz daha iyiydi.

Veri setlerinde elde edilen öğrenme verimi açısından incelendiğinde F1 skoru kriterinde *prnn_cushings*, *ecoli* ve *analcatdata_broadwaymult* veri setlerinde diğer veri setlerine nispeten daha yüksek verim elde edildi; sadece *ecoli* ve K-Med kombinasyonu bu trendin haricindeydi. Doğruluk skoru kriterine göre ise *prnn_cushings* ve *analcatdata_broadwaymult* veri setlerinde daha yüksek verim gözlemlendi.

Kısıtlar ve Gelecek Çalışmalar

Çalışma standard kümeleme algoritmalarının otomatik hiyerarşi üretme mekanizmasında bölücü fonksiyon olarak kullanılmasının farklı açılardan kapsamlı analizini içerse de hiyerarşi üretme ve HC çok farklı yönler ve bileşenler içerdiğinden bazı kısıtlar ve ihmaller bulundurmaktadır.

Öncelikle, her bir veri setinin kendi içinde anlamlı bir sonuç çıkaracak düzeyde istatistiksel test yapılmasına rağmen çalışmada toplamda sadece 6 veri seti kullanıldı. Her ne kadar bu veri seti örnekleri üzerinden gerek sınıf sayısı açısından gerekse performans değerlendirme metriği açısından bulgular analiz edildiyse de, bu çalışmada incelenen hiyerarşi üretme yöntemlerinin, genel olarak her hangi bir veri seti üzerinde etkisini istatistiksel anlamda göstermek için 6'dan çok daha fazla veri seti örneğine ihtiyaç olduğundan, çalışma bu açıdan eksiklik içermektedir. Gelecekte daha büyük sayıda veri seti ile çalışmak hedeflenmektedir.

Hiyerarşi inşa etmek sınıflar arasındaki yapısal bağı keşfetmeye bağlıdır. Bu bağı ortaya çıkarılması için gerekli olan sınıf temsili için bu çalışmada CCMs kullanılsa bile veri örneklerinden farklı sınıf temsili elde etme seçenekleri de inceleme kapsamına dahi edilebilir. Farklı sınıf temsili seçenekleri literatürde araştırılmış ve denenmiştir. Sınıflara özgü veri noktalarının dağılımını kullanarak sınıfa özgü dağılımlar arasında benzersizlik oluşturma [17] bunlardan biridir. Başka seçenekler eğitim seti üzerinde sınıflandırıcı çalıştırarak sınıflar arası ilişkiye dair çıkarım yapmaktır [27-29].

Çalışmada sadece HDC düşünüldü, HAC düşünülmedi. Ayrıca, temel sınıflandırıcı olarak sadece XGBoost kullanıldı. Gelecekte hiyerarşi üretme ve HC'nin zikredilen bileşenleri de incelemeye katılıp daha kapsamlı analizler yapılabilir.

Özet

Çalışma bulgularına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- K-Means ve GMM, HDC yönteminde kullanılarak elde edilen hiyerarşilerin sınıflandırma performansını iyileştirmede potansiyel olarak daha etkili olabilir. Bu algoritmalar, genellikle K-Med'e göre daha tercih edilebilir olabilir.

- Farklı sınıf sayılarına sahip veri setlerinde, performans iyileştirmesi ve öğrenme verimi farklılık göstermektedir. Daha az sınıflı veri setlerinde K-Med'in, daha çok sınıflı veri

setlerinde ise K-Means ve GMM'nin daha etkili olabileceği gözlemlenmiştir.

- Hiyerarşik biçime dönüşüm, sınıflandırma performansını önemli ölçüde etkileyebilir ve bu etki veri setinin özelliklerine bağlıdır. Bazı veri setleri için hiyerarşik biçime dönüşüm daha etkili olurken, diğerleri için performans gerilemesine neden olabilir.

- Çalışmanın kısıtları ve eksiklikleri göz önüne alındığında, gelecekte daha geniş kapsamlı çalışmalar ve daha fazla veri seti kullanılarak yapılan analizlerle sonuçların daha iyi genelleştirilmesi hedeflenmelidir.

- Bu çalışma, otomatik hiyerarşi üretme mekanizmasında kümeleme algoritmalarının kullanımının sınıflandırma performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Ancak, daha fazla araştırma, farklı kombinasyonlar ve yöntemlerin incelenmesini gerektirmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, kümeleme algoritmalarının HDC yönteminde nasıl kullanılabileceğini ve sınıflandırma performansı üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir adım atmıştır. Gelecekteki araştırmaların, daha geniş veri setleri ve farklı yöntemlerle yapılan analizlerle bu konuda daha fazla bilgi sağlaması beklenmektedir.

Kaynaklar

- [1] C. N. Silla, and A. A. Freitas, "A survey of hierarchical classification across different application domains," *Data mining and knowledge discovery*, vol. 22, pp. 31-72, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s10618-010-0175-9>
- [2] E. Frank and S. Kramer, "Ensembles of Nested Dichotomies for Multi-Class Problems," in *Proc. 21st Int'l Conf. Machine Learning (ICML '04)*, Banff, Alberta, Canada, p. 39, 2004, doi: <https://doi.org/10.1145/1015330.1015363>
- [3] F. Sebastiani, "Machine learning in automated text categorization," in *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 34, no. 1, pp. 1-47, Mar. 2002, doi: <https://doi.org/10.1145/505282.505283>
- [4] A. Sun, E. P. Lim, and W. K. Ng, "Hierarchical text classification methods and their specification," in *Cooperative internet computing*, The Springer International Series in Engineering and Computer Science, vol 729. Springer, Boston, MA, USA: 2003, ch. 14, pp. 236-256, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0435-1_14
- [5] S. Dumais and C. Hao, "Hierarchical classification of web content," in *Proceedings of the 23rd annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, Athens, Greece. 2000, pp. 256-263, doi: <https://doi.org/10.1145/345508.345593>
- [6] I. Dimitrovski, D. Kocev, S. Loskovska, and S. Dzeroski, "Hierarchical annotation of medical images," *Pattern Recognition*, vol. 44, no. 10-11, pp. 2436-2449, Oct. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.03.026>

- [7] L. Li, S. Jiang and Q. Huang, "Learning Hierarchical Semantic Description Via Mixed-Norm Regularization for Image Understanding," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 14, no. 5, pp. 1401-1413, Oct. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/TMM.2012.2194993>
- [8] J. Spehr, D. Rosebrock, D. Mossau, R. Auer, S. Brosig and F. M. Wahl, "Hierarchical scene understanding for intelligent vehicles," in *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden, Germany, 2011, pp. 1142-1147, doi: <https://doi.org/10.1109/IVS.2011.5940566>
- [9] P. Arbeláez, M. Maire, C. Fowlkes and J. Malik, "Contour Detection and Hierarchical Image Segmentation," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 33, no. 5, pp. 898-916, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.161>
- [10] H. Blockeel, L. Schietgat, J. Struyf, S. Dzeroski and A. Clare, "Decision trees for hierarchical multilabel classification: A case study in functional genomics", in *Proc. 10th Eur. Conf. Principle Pract. Knowl. Discovery Databases: Lecture Notes in Computer Science()*, vol 4213. Springer, Berlin, Heidelberg, doi: https://doi.org/10.1007/11871637_7
- [11] A. Breschi, M. Muñoz-Aguirre, V. Wucher, C. A. Davis, D. Garrido-Martín, S. Djebali, J. Gillis et al., "A limited set of transcriptional programs define major cell types," *Genome research*, vol. 30, no. 7, pp. 1047-1059, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1101/gr.263186.120>
- [12] K. Punera, S. Rajan and J. Ghosh, "Automatically learning document taxonomies for hierarchical classification," *Special interest tracks and posters of the 14th international conference on World Wide Web*, pp. 1010-1011, 2005, doi: <https://doi.org/10.1145/1062745.1062843>
- [13] M. Sun, W. Huang and S. Savarese, "Find the Best Path: An Efficient and Accurate Classifier for Image Hierarchies," *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, Sydney, NSW, Australia, 2013, pp. 265-272, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.40>
- [14] H. Lei, K. Mei, N. Zheng, P. Dong, N. Zhou, and J. Fan, "Learning group-based dictionaries for discriminative image representation," *Pattern Recognition*, vol. 47, no. 2, pp. 899-913, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2013.07.016>
- [15] V. Melnikov and E. Hüllermeier, "On the effectiveness of heuristics for learning nested dichotomies: An empirical analysis", *Mach. Learn.*, vol. 107, no. 8, pp. 1537-1560, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s10994-018-5733-1>
- [16] P. del Moral, S. Nowaczyk, A. Sant'Anna, S. Pashami, "Pitfalls of assessing extracted hierarchies for multi-class classification," *Pattern Recognition*, vol. 136, pp.109-225, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.109225>
- [17] K. Punera, S. Rajan and J. Ghosh, "Automatic Construction of N-ary Tree Based Taxonomies," *Sixth IEEE International Conference on Data Mining - Workshops (ICDMW'06)*, Hong Kong, China, 2006, pp. 75-79, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2006.35>
- [18] B. Larsen, C. Aone, "Fast and effective text mining using linear-time document clustering," in *Proc.5th ACM SIGKDD (KDD'99)*, San Diego, CA, USA, 1999, pp. 16-22, doi: <https://doi.org/10.1145/312129.312186>
- [19] T. Li, S. Zhu and M. Ogihara, "Hierarchical document classification using automatically generated hierarchy," *J. Intell. Inf. Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 211-230, Oct. 2007, doi: <https://doi.org/10.1007/s10844-006-0019-7>
- [20] C. Alagoz, "Performance Improvement in Multi-class Classification via Automated Hierarchy Generation and Exploitation through Extended LCPN Schemes," arXiv preprint arXiv:2310.20641, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.20641>
- [21] R.A. Fisher, "The Use of Multiple Measures in Taxonomic Problems", *Ann. Eugenics*, vol. 7, pp. 179-188, Sep. 1936, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x>
- [22] L. Kaufman and P. J. Rousseeuw, "Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis," New York, NY, USA:Wiley, 1990, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470316801>
- [23] J. H. Friedman, "Greedy function approximation: A gradient boosting machine", *Ann. Statist.*, pp. 1189-1232, Oct. 2001.
- [24] J. Vanschoren, J. N. van Rijn, B. Bischl and L. Torgo, "OpenML: Networked science in machine learning", *ACM SIGKDD Explor. Newslett.*, vol. 15, no. 2, pp. 49-60, Jun. 2014, doi: <https://doi.org/10.1145/2641190.2641198>
- [25] M. Feurer et al., "OpenML-Python: An extensible Python API for OpenML," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 22, no. 100, pp. 1-5, 2021.
- [26] F. Wilcoxon, "Individual Comparisons by Ranking Methods," in: Kotz, S., Johnson, N.L. (eds) *Breakthroughs in Statistics*. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY, 1992, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_16
- [27] S. Godbole, "Exploiting confusion matrices for automatic generation of topic hierarchies and scaling up multi-way classifiers," *Technical report*, IIT Bombay, 2002.
- [28] S. Bengio, J. Weston and D. Grangier, "Label embedding trees for large multi-class tasks," *Proc. Neural Inform. Process. Syst.*, pp. 163-171, 2010.
- [29] D. Silva-Palacios, C. Ferri and M. J. Ramírez-Quintana, "Probabilistic class hierarchies for multiclass classification", *J. Comput. Sci.*, vol. 26, pp. 254-263, May 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.01.006>



V2G Uygulamalarında Elektrikli Araçların Dağıtım Şebekesine Optimum Entegrasyonunun Analizi İçin Newton Raphson Temelli Yeni Bir Model

A New Newton Raphson Based Model For Analysis Of Optimum Integration Of Electric Vehicles Into The Distribution Network In V2G Applications

Bünyamin Kuzu¹, Ozan Akdağ², Mustafa Nurm Muhammed³, Teoman Karadağ^{4*}

¹ İnönü Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, bunyamin.kuzu@inonu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2120-7284>

² Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ozanakdag@live.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8163-8898>

³ İnönü Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, mustafa.nurm Muhammed@inonu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5957-3255>

⁴ İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, teoman.karadag@inonu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7682-7771>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 23 Şubat 2024
Revizyon 23 Haziran 2024
Kabul 26 Haziran 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli Araç, Modelleme,
Simülasyon, V2G, Yük Akışı.

ÖZ

Son yıllarda, Elektrikli Araç (EA) üretimi ve kullanımı hızla artmaktadır. EA'lar, yapısı gereği enerji depolama kapasitesine sahip olduklarından, elektrik şebekesi üzerinde yedek güç kaynağı ve yardımcı hizmetler sağlama gibi işlevleri yerine getirebilecekleri fikirleri ortaya çıkmıştır. Bu fikirlerden biri, araçtan şebekeye enerji transferi olan Vehicle-to-Grid (V2G) konseptidir. Bu çalışmada, EA'lara ait şarj istasyonlarının şebekeye optimum şekilde entegrasyonu ve EA'ların V2G konsepti ile şebekeye elektrik enerjisi aktarımının incelenmesi için Newton Raphson temelli yeni bir model önerilmektedir. Önerilen çalışmanın etkinliğinin incelenmesi için öncelikle IEEE 33 bara sistemi DigSilent yazılımı ile modellenmiştir. Sonrasında bu çalışmada sunulan yeni model ile güç sisteminde EA şarj istasyonlarının optimum entegrasyonu sağlatılmıştır. Çalışma kapsamında, EA'ların şarj/deşarj durumları simüle edilerek V2G konsepti analiz edilmiştir. Böylece, bu çalışma ile EA'ların hem mevcut şebeke üzerindeki etkileri hem de çevresel etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Analiz sonucunda, 156 EA radyal dağıtım şebekesine (optimum) entegre edilmiş ve 10 saatte toplam 4464 kWh elektrik enerjisi şebekeye aktararak yaklaşık 1519 kg CO₂ salınımı azaltılmıştır. Bu çalışma, V2G konsepti ile elektrik şebekesine pik talep saatlerinde destek olmak, yük dengelenmesi, araçlarda depolanan yenilenebilir enerjinin kullanılabilmesi, sistemdeki darboğazların ve karbon salınımının azaltılması için EA'ların şebeke entegrasyonunu teşvik etmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 February 2024
Received in revised form 23 June 2024
Accepted 26 June 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Electric Vehicle, Modelling, Load
Flow, Simulation, V2G

Doi: 10.24012/dumf.1441551

ABSTRACT

In recent years, Electric Vehicle (EV) production and use has been rapidly increasing. Since EVs have energy storage capacity by nature, the ideas that they can perform functions such as providing backup power supply and auxiliary services on the electricity grid have emerged. One of these ideas is the Vehicle-to-Grid (V2G) concept, which is the transfer of energy from the vehicle to the grid. In this study, a new Newton Raphson based model is proposed for the optimum integration of EV charging stations into the grid and for examining the electrical energy transfer from EVs to the grid with the V2G concept. In order to analyze the effectiveness of the proposed study, firstly, the IEEE 33 bus system is modeled with DigSilent software. Afterwards, with the new model presented in this study, optimum integration of EV charging stations in the power system is achieved. Within the scope of the study, the charge/discharge states of EVs are simulated and the V2G concept is analyzed. Thus, in this study, both the effects of EVs on the existing grid and their environmental impacts are examined in detail. As a result of the analysis, 156 EVs are integrated into the radial distribution network (optimum) and a total of 4464 kWh of electrical energy is transferred to the network in 10 hours, reducing approximately 1519 kg of CO₂ emissions. With the V2G concept, this study encourages the grid integration of EVs supporting the electricity grid during peak demand hours, load balancing, using the renewable energy stored in the vehicles, and reducing the bottlenecks and carbon emissions in the system.

* Sorumlu Yazar

Giriş

EA'lar, içten yanmalı motora sahip araçlara göre daha erken yıllarda üretilmiş ve kullanılmıştır. Tarihte ilk elektrikli araç 1835 yılında Prof. Stratingh tarafından Hollanda'da geliştirilmiştir. Daha sonra 1838 yılında Robert Davidson tarafından 6.4 km/s hıza ulaşabilen elektrikli lokomotif, 1882 yılında ise Siemens firması tarafından Elektromote adı verilen elektrikli trolleybüs üretilmiştir. Elektromote isimli araç 2.2 kW güce ve saatte 12 km/s hıza çıkmayı başarmıştır [1-3].

Günümüzde otomobil üreticileri içten yanmalı motora sahip araçlar ile EA da üretmeye başlamışlardır. İçten yanmalı motorlu araçların sebep olduğu sera gazları ve hava kirliliğinden dolayı EA'ların popülerliği artmıştır [4]. Bu popülerliğin bir başka sebebi de elektrik prizi olan her yerden şarj edilebilir olması ve devletlerin bu araç satışlarını artırmak için verdiği teşviklerdir [5-10]. Özellikle Çin, Norveç, İngiltere, Fransa ve Almanya gibi ülkelerin sağladığı teşvikler bu araçlara olan ilgiyi artırmıştır. Uluslar arası enerji ajansı (IEA) verilerine göre dünya genelinde elektrikli araç satışları 2022 yılında 7.3 milyon, 2023 yılında ise 9.5 milyon adet gerçekleşmiştir [51]. EA'ların sayısının artması enerji ihtiyacını artıracığından elektrik dağıtım şebekesinin bu durumdan etkileneceği öngörülmektedir. EA'ların dağıtım sistemi üzerindeki etkilerini inceleyen literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Güven ve arkadaşları EA hızlı şarj istasyonlarının yüksek akım ve voltaj ile güç aktarımı yaptıklarından dolayı şebekede karşılanamayan taleplerin olabileceğini belirtmişlerdir [10]. Nurmuhammed vd., kullanıcıların bu araçları şarj etmeleri o bölgedeki EA yoğunluğuna bağlı olarak şebekeye ek yükler getirebileceği ve faz/gerilim sapmalarına sebep olabileceğini bildirmişlerdir [11]. Yılmaz, elektrikli araçların orta gerilim dağıtım şebekesine etkilerini incelemiş ve EA sayısı, toplam araç sayısının üçte biri seviyesini aşması durumunda dağıtım şebekesinin olumsuz etkilenebileceğini belirtmiştir [24]. Boynuoğlu, EA'ların şarj işlemi sırasında harmoniklerin oluşması ve transformatörlerin aşırı ısınması sonucu güç kalitesi sorunları ve transformatörlerin ömrünün kısalmasına sebep olacağını belirtmiştir [12]. EA şarj işleminin yoğun kullanımına bir örnek olarak aynı bölgede bulunan 1000 EA, 50 kW şarj hızı ile şarj edildiğinde dağıtım şebekesi üzerinde 50 MWh'lik enerji talebi oluşturacaktır. 50 MW elektrik tüketimi orta ölçekli bir enerji santralinde üretilen enerjiye eşdeğerdir. Özetle EA'lar: Harmoniklere neden olma, güç kalitesi sorunları, karşılanamayan talepler, faz dengesizliği gibi sorunlarla şebekeyi etkileyebilmesine rağmen fosil yakıtlara bağımlı olmaması (sıfır emisyon) sayesinde canlılar ve çevre üzerinde daha az etkiye sahip araçlardır. EA'ların bu etkisi küresel ısınma sorunu ve dünyamızın yeşil geleceği için önem arz etmektedir.

EA'lar teknolojik altyapıları sayesinde sıfır egzoz emisyonuna sahip olduklarından çevreye doğrudan zararlı gaz salınımı yapmamaktadır. Fosil kökenli yakıtları kullanan içten yanmalı motora sahip araçlar ise azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_x), karbon oksitler (CO_x) ve bir takım zararlı partikülleri doğaya bırakırlar. Günümüzde içten yanmalı motora sahip araçların CO₂ emisyonu 100-120 g/km seviyesine kadar

düşürülebilmektedir [13]. Bu yüzden EA'ların yaygınlaşması, içten yanmalı motora sahip araçların ürettiği zararlı gazları önemli ölçüde azaltacaktır. Zararlı gazların azaltılması sonucu küresel ısınmanın etkilerinin gerilemesi, çevre kirliliğinin azalması yönüyle; canlılar ve dünyamızın geleceği için oldukça önemlidir. EA'lara yenilenebilir enerji kullanılarak şarj sağlanması, çevre kirliliğinin önlenmesi ve sera gazlarının azalmasına katkı sağlayabilir.

EA'larda kullanılan teknoloji sayesinde araçların bataryasında depolanan enerji, enerji kaynağı olarak ihtiyaçlar doğrultusunda farklı kaynakları besleyebilir. Bu noktada yeni nesil batarya yönetim sistemlerine ihtiyaç duyulacaktır [14-20]. EA'larda depolanan bu enerjinin dağıtım şebekesinde enerji kaynağı olarak kullanılmasıyla Vehicle-to-Grid (V2G) araçtan şebekeye enerji transferi konsepti ortaya çıkmıştır [21]. Bu bağlamda EA'ların dağıtım şebekesinde frekans düzenleyici, aktif ve reaktif güç desteği sağlayabileceği, pik voltaj ve harmonik önleyici olarak kullanılabilmesi de öngörülmüştür [22-24]. Akıllı otopark sistemleri için hazırlanan bir benzetim çalışmasında otopark ile EA'lar arası V2G uygulaması sayesinde işletmeye %16 kârlılık sağlanmıştır [25]. V2G konsepti uygulamaya alındığında depolanan enerjinin şebekeye satışı sayesinde enerji fiyatlarının ucuzlayacağı belirtilmiştir [22].

Bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak EA'ların şarj olma ve araçtan şebekeye enerji aktarımı konusunun hem çevresel etkileri hem de şebekeye etkileri bir bütün olarak ele alınmıştır. Bu etkileri aynı anda gösterebilmek için DigSilent programında bir plan dâhilinde sanal model oluşturulmuş ve detaylı analiz yapılmıştır. Bu sanal modelde V2G konsepti IEEE 33 test bara sistemi üzerinde uygulanmıştır. DigSilent programında oluşturulan sanal modeldeki ölçüm sonuçlarının, şarj ve deşarj işleminin etkilerini görebilmek için Matlab programında yapılan benzetim çalışmasına girdi olarak verilmesi sağlanmıştır.

Benzetim çalışması sonuçlarına göre EA'ların şebekeye optimum entegrasyonu sağlanarak V2G ile CO₂ emisyonunun azaltılabileceği gösterilmiştir. Özetle bu çalışmanın literatüre üç kolda katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bu katkılar aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Önerilen sanal model ile EA'ların mevcut şebekeye optimum entegrasyonu bir plan dahilinde sağlatılmıştır.
- 2- Bu sanal model ile EA'ların mevcut şebekede şarj ve deşarj durumlarının olası sonuçları simülasyon ile detaylı olarak analiz edilmiştir.
- 3- Oluşturulan sanal model sayesinde EA'ların çevresel etkileri sayısal verilerle gösterilmiştir.

Teorik Altyapı

Bu bölümde EA'ların genel yapısı, şebekeye etkileri, şarj işlemleri ve kullanılan programlar sunulmuştur.

EA'ların genel yapısı

EA'lar tamamen elektrikli araç (TEA)'lar ve hibrit elektrikli araç (HEA)'lar olmak üzere ikiye ayrılır. TEA'lar konvansiyonel araçlar gibi içten yanmalı motora ve egzoz sistemine sahip değildir. Bu özellikleri sayesinde

fosil kökenli yakıtlara ihtiyaç duymazlar, zararlı gaz salınımı yapmazlar. Bu araçlar bataryalarında depoladıkları enerjiyi elektrik motoruna aktarılmasıyla hareket eden araçlardır. TEA'lar konvansiyonel araçlara göre daha basit yapıya sahiptirler.

HEA'lar ise içten yanmalı motora sahip olmakla birlikte bir batarya ve elektrik motoruna da sahiptirler. HEA'lar, TEA'lara göre daha fazla parçaya sahip olduğundan yapı olarak karmaşıktır. TEA yapısı temel olarak batarya, elektrik motoru ve iletim elemanlarından; HEA yapısı ise içten yanmalı motor, yakıt deposu, iletim elemanları, batarya ve elektrik motoru/jeneratörden oluşmaktadır [4-7].

TEA'lar ev, ofis, alışveriş merkezleri gibi yerlerde mevcut elektrik şebekesi üzerinden şarj edilebilirler. Ayrıca elektrik birim maliyetinin, akaryakıt birim maliyetine oranla daha düşük olmasından ötürü içten yanmalı motora sahip araçlara göre yakıt maliyeti daha az ve zararlı gaz salınımı yapmadıkları için de çevrecidirler. Bu avantajlara rağmen uzun şarj süresi, menzil yetersizliği gibi sorunları da mevcuttur. Ayrıca şarj işleminin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmadığı durumlarda EA'ların çevreci yönünden pek de söz edilemez. Aynı şekilde, araç bataryalarının ömürlerinin önündeki geri dönüşüm süreçleri de hala büyük bir soru işaretidir. HEA'lar ise yapısındaki akü sayesinde araçların yakıt tüketimini ve zararlı gaz salınımını azaltmak amacıyla üretilmişlerdir. Bu sayede düşük emisyon, daha uzun menzile ve düşük yakıt tüketimine sahiptir [1, 4, 26]. Bu araçların dezavantajları ise yapılarının karmaşıklığı sebebiyle tamir ve bakım maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

EA'ların şebekeye etkisi

EA'ların menzilin, konvansiyonel araçlara göre daha kısa olması, şarj ihtiyacının sık olmasına ve mevcut şebekede uzun süre şarj durumunda kalmasına sebep olabilir. Bu durum EA'ların yaygınlaşmasıyla birlikte şebeke üzerinde ek yükler sebep olabilir [12]. İnsanların araç kullanım alışkanlıklarına bakıldığında puant saatlere denk gelen şarj işlemleri planlı şarj yapılması gerektiğini göstermektedir [10, 27, 28]. Hızlı şarj işlemleri ise çok yüksek seviyede güç aktarımı ile yapıldığından, şebeke elemanlarının zorlanmasına sebebiyet verebilir.

Puant saatlere denk gelen şarj işlemleri pik talep yüküne sebebiyet vereceğinden enerji trafolarına ve iletim elemanlarına zarar verme potansiyeline sahiptir. Trafo ömrü; üretim aşamasında 40-50 yıl olarak tahmin edilmekte ancak pratikte ortalama 17 yıl kadardır [30]. Ayrıca aynı anda farklı fazlardan farklı sayıda aracın güç çekmesi faz dengesizliğine sebebiyet verebilir. EA'ların şarj işlemi sırasında AC gerilim DC'ye dönüştürülmektedir. Daha sonra DC gerilim DC/DC dönüştürücü yardımıyla bataryayı şarj etmek için kullanılır. Bu aşamaların her adımı harmonik bileşenler üretilebileceğinden güç kalitesi sorunları ortaya çıkabilir [29, 30].

EA'ların şarj işlemleri

EA'lar elektrik şebekesinden aldıkları elektrik enerjisini bataryalarında kimyasal olarak depolarlar; depolanan bu enerji de aracın hareket etmesi için tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür. Enerji depolamak için yapılacak şarj işleminin hızı oldukça önem arz etmektedir. Şarj hızı, şebekenin izin verdiği güce, EA bataryalarının kapasitesine, EA üzerinde bulunan ve şarj kontrolü yapan elektronik devrelere bağlıdır. Şarj seviyeleri üç kategoride incelenebilir [22, 30].

Seviye 1 : En yavaş şarj işlemidir. Evlerde, otoparklarda ve iş yerlerinde tek faz elektrik beslemesi ile yapılır. Ek bir alt yapıya ihtiyaç duyulmaz, erişimi kolay ve ucuzdur.

Seviye 2: Orta hızlı şarj işlemidir. Özel ve kamu tesislerinde tek faz veya üç faz elektrik beslemesi ile yapılabilir. Seviye 1'e göre daha güçlü akım çekilerek yapılır. Ek bir alt yapı ihtiyacı vardır.

Seviye 3 : Yüksek hızlı şarj işlemidir. Şehirlerin dışında, akaryakıt istasyonlarında veya dinlenme tesislerinde bulunurlar. Çok güçlü alt yapıya ihtiyaç duyarlar.

Araçtan şebekeye enerji aktarımı

V2G, elektrikli araçların enerji kaynağı olarak şehir şebekesinde kullanılmasıdır. İlk olarak 1997 yılında Willett Kempton ve Steven Letendre tarafından yapılan bir çalışma ile tanıtılmıştır [21]. V2G fikri; enerji ihtiyacının artması, sera gazlarının yayılımının artması, EA'ların yaygınlaşması ve enerji talep sorununa çözüm amaçlı ortaya çıkmıştır.

V2G konsepti iyileştirmeler ile birlikte pik talebi karşılamak için etkin bir çözüm olabileceği ihtimali olmasına karşın; teknik, ekonomik ve sosyal problemlerle karşı karşıyadır. Akıllı şebekelerin ve resmi düzenlemelerin olmaması, batarya maliyetlerinin yüksek olması bu problemlerden bazılarıdır [8, 22, 30, 31].

V2G konseptinin uygulanabilmesi için EA şarj istasyonlarının yapısında iki yönlü güç akışını sağlayan dönüştürücüler olmalıdır. Bu dönüştürücüler EA şarj işlemi sırasında şarj istasyonundan EA'ya doğru güç akışını gerçekleştirir. V2G modunda ise DC-AC evirici gibi çalışarak EA bataryalarından şebekeye güç akışını sağlar [32-34].

Gerilim kararlılık indeksi

Güç sistemleri, farklı karakteristik yapısı bulunan elemanlardan oluştuğundan, çalışan sistem içerisindeki bazı elemanların parametrelerinde bozulmalar meydana gelebilir. Güç sistemlerinin dengeli ve kararlı çalışması beklense de yük artışı, gerilim düşümü, frekans düşümü gibi nedenlerle, sistem bozulmalara maruz kalabilir. Gerilim kararlılığı bu bozulmalara maruz kalan güç sisteminin tekrar dengeli ve kararlı duruma gelmesiyle ilgilidir ve kısaca üretim, iletim ve dağıtım sistemleri arasındaki dengenin korunmasıdır [42]. Bu dengenin korunmadığı durumlarda sorunlu olan barayı belirlemek için VSI kullanılabilir [7]. VSI, aktif ve reaktif güç denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu çalışmada VSI, Denklem (1)'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır [43], [44].

$$2V_k^2 V_{k+1}^2 - 2V_{k+1}^2 (P_{k+1}r + Q_{k+1}x) - |Z|^2 (P_{k+1}^2 + Q_{k+1}^2) \geq 0 \quad (1)$$

Benzetim çalışmasında kullanılan yazılımlar

DigSilent, "Digital Simulation of Electrical Networks", kelimelerinin kısaltılmış hali olup bu program güç sistemlerinin planlanması, işletilmesi, ve optimizasyonunu yapabilmeyi sağlayan bir yazılımdır [35, 36]. Elektrik sistemleri üzerinde yapılması zor olan yük akış analizi, kısa devre analizi, harmonik hesaplama vb. işlemlerin yapılabilmesini sağlayan bu program ile modelleme yapılarak öngörüler değerlendirilebilir ve çıkarımlar elde edilebilir [36, 37].

Matlab, Mathworks Company tarafından geliştirilmiş; istatistiksel, matematiksel ve teknik problemlerin yüksek performans ile çözülebildiği bir programdır. Problemlerin çözümü için hem kodlama yapılabilen hem de görsel tasarım desteği sunan bu dilin üniversitelerin özellikle mühendislik bilim dalında kullanımı oldukça yaygındır. [38–41].

Önerilen Metot

Bu bölüm EA'ların ilgili dağıtım şebekesine optimum entegrasyonu için önerilen metodu içermektedir [7].

Adım 1: Modellenmesi yapılan radyal dağıtım sisteminde öncelikle Newton Raphson Metoduna göre yük akış analizi yapılır. Bu yük akış analizi sonrası, dağıtım trafoları ve hatların yüklenmeleri, ilgili baraların voltaj değerleri, hat kayıpları ve VSI değeri elde edilir.

Adım 2: Dağıtım sistemindeki dağıtım trafolarının tam yük kapasitesine ulaşmak için ne kadar daha yükü kaldırabileceği tespit edilir. Burada Denklem (2) 'deki bağıntı kullanılacaktır.

$$DT_i(kW) - Toplamkayıp_k(kW) - Toplamyük_i(kW) = kalanyük_i(kW) \quad (2)$$

Burada DT_i , i. dağıtım trafosunun maksimum yükünü (etiket değeri), $Toplamkayıp_k$, i. dağıtım trafosuna bağlı tüm hatların toplam kaybı (kW), $Toplamyük_i(kW)$ i. dağıtım trafosuna bağlı mevcut tüketicilerin (müşteriler) çektiği maksimum yüküdür.

Adım 3: Elektrikli araç şarj istasyonu sayısı Denklem (3) 'teki gibi bulunur.

$$\frac{kalanyük_i(kW)_i}{şarjistasyonu(kW)} = n \quad (3)$$

Burada şarj istasyonu, bir şarj istasyonunun toplam yük kapasitesi iken; n, şarj istasyonunun adetini belirtir.

Adım 4: Bu adımda IEEE-33 bara radyal dağıtım şebekesine, hesaplanan toplam yüke göre segmentasyon işlemi uygulanır. Bu işleme göre ilgili baralar segmentlere ayrılır.

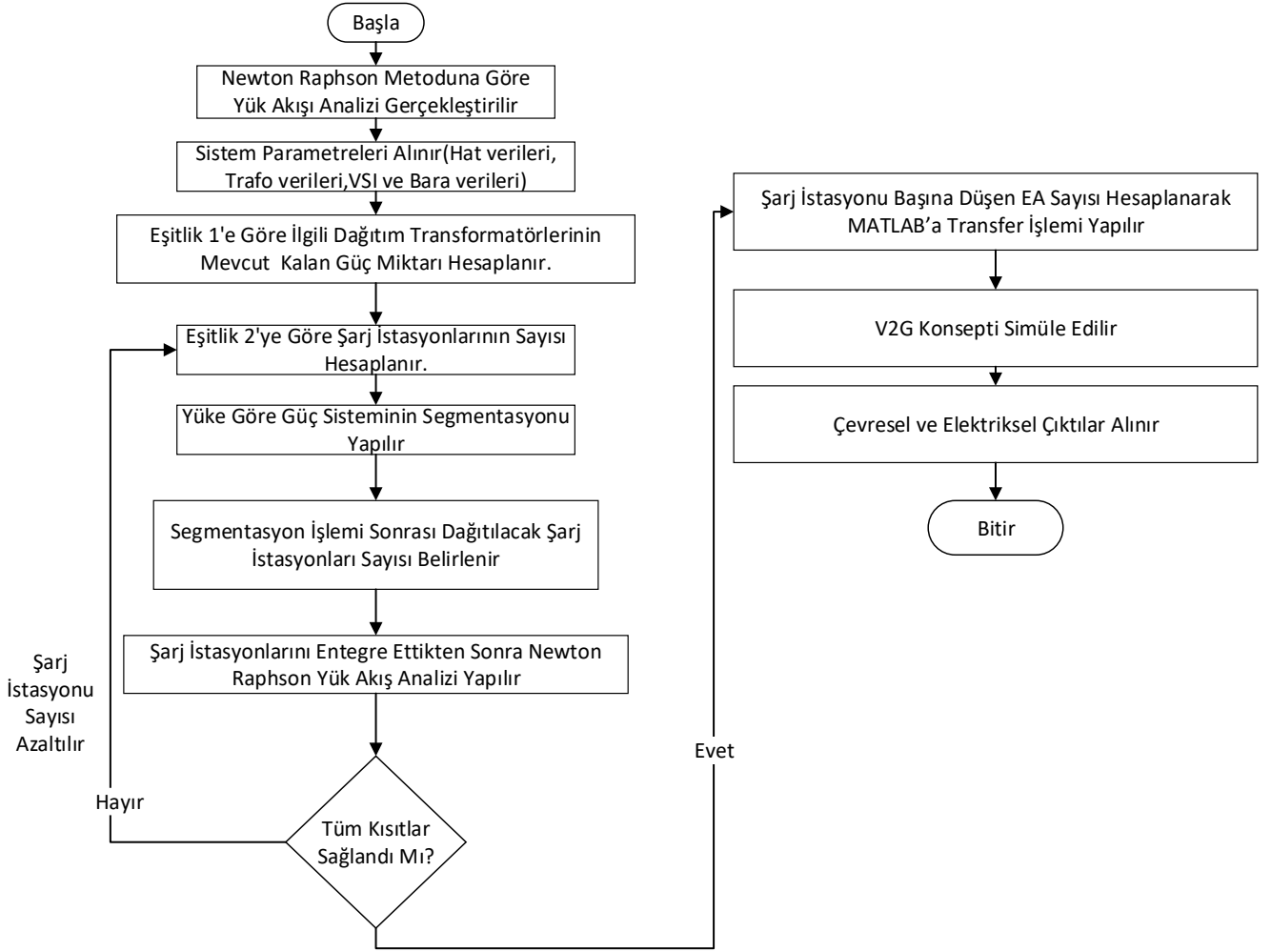
Adım 5: Bu adımda adım 4'teki segmentasyon işleminden sonra baraların V ve VSI değerine göre, deneme yanılma

tabanlı metotla şarj istasyonlarının dağıtım yapılıdır. Bu dağıtımda ilgili dağıtım trafolarının, Adım 1'de hesaplanan bara voltaj değerlerine göre dağıtım baralarının bara voltajı 1 pu'ya yakın olan (0.90 pu üssü, 1.10 pu altı) ve bu adımda hesaplanan VSI (şarj istasyonları eklenmeden VSI hesaplanır) değeri 0.7 pu üzeri olan baralara eklenir.

Adım 6: Elektrikli araç şarj istasyonları ilgili baralara ilave edildikten sonra, bu modelde yeniden Newton Raphson metodu uygulanarak yük akış analizi yapılır. Yük akış analizi sonucunda elde edilen trafo ve hat yüklenmelerinin ve bara gerilim değerlerinin istenilen limitlerde olup olmadığı kontrol edilir. Uygun limitlerde ise Adım 7'ye geçilir; değil ise Adım 3'e geçilerek, voltaj ve hat yüklenmelerinin sınırı ihlal ettiği baraların yakınındaki şarj istasyonu sayısı düşürülür ve sonraki adıma geçilir.

Adım 7: Bu adımda toplam Elektrik şarj istasyonuna eklenecek EA sayısı, Matlab programına transfer edilerek, EA'ların şarj ve deşarj (V2G konsepti) durumları simüle edilir.

Adım 8: Simülasyon çalışması son bulur. Önerilen metoda ait akış diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur.

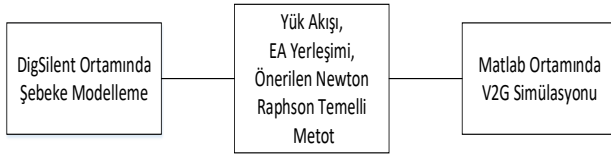


Şekil 1. Önerilen Metodun Akış Diyagramı.

Simülasyon ve Test Sonuçları

Benzetim çalışması

Bu benzetim çalışmasında öncelikle IEEE 33 test bara sistemi DigSilent ortamında modellenmiştir. Daha sonra bu güç sistemindeki baralara EA'ların şarj istasyonları önerilen metoda göre entegre edilmiştir. Sonrasında bu metod kapsamında V2G sayesinde şebekeye verilebilecek enerjinin çevresel ve elektriksel sonuçlarını detaylı inceleyebilmek için Matlab yazılımı kullanılarak, bir benzetim yapılmıştır. Bu çalışmada Şekil 1'de adımları gösterilen bu yeni metoda ait özet şema ise Şekil 2 'te verilmiştir.



Şekil 2. Modelleme ve benzetim çalışması.

IEEE 33-bara radyal dağıtım sistemi

Dağıtım sistemindeki baralar 12,66 kV seviyesinde olup gerilim limitleri $\pm\%10$ toleranslı varsayılmıştır. Sistemin toplam yük talebi 3.175 MW ve 2.3 MVAR'dır. Dağıtım sistemine ait hat ve yük verileri [45]'ten alınmıştır. Dağıtım sistemi DigSilent yazılımıyla modellenmiş olup, bu çalışmaya özgü 1 numaralı baraya 20/12.66 kV ve 6.5 MVA gücünde bir transformatör eklenmiştir [7].

Önerilen metoda göre öncelikle şarj istasyonları devreye alınmadan 33 bara sisteminde Newton Raphson metoduna göre yük akış analizi yapılmıştır (adım 1). Elde edilen sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2'te verilmiştir.

Tablo 1. IEEE 33 bara test sistemine ait yük akış analizi sonuçları.

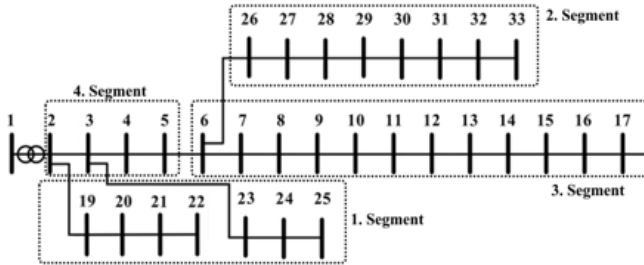
Bara adı	Vpu/deg	VSI/Başlangıç	Bara adı	Vpu/deg	VSI/başlangıç
Bara1	0.991/-0.66	0.999	Bara18	0.9/-1.57	0.6701
Bara2	0.99/-0.65	0.999	Bara19	0.99/-0.66	0.9881
Bara3	0.976/-0.57	0.988	Bara20	0.98/-0.73	0.979
Bara4	0.97/-0.5	0.934	Bara21	0.985/-0.75	0.9745
Bara5	0.961/-0.45	0.912	Bara22	0.984/-0.77	0.9655
Bara6	0.942/-0.52	0.889	Bara23	0.972/-0.6	0.9402
Bara7	0.94/-0.76	0.819	Bara24	0.965/-0.69	0.9119
Bara8	0.925/-0.91	0.761	Bara25	0.962/-0.73	0.887
Bara9	0.923/-1.11	0.745	Bara26	0.94/-0.48	0.819
Bara10	0.917/-1.17	0.744	Bara27	0.94/-0.42	0.809
Bara11	0.916/-1.16	0.721	Bara28	0.931/-0.69	0.801
Bara12	0.915/-1.15	0.7187	Bara29	0.923/-0.62	0.759
Bara13	0.91/-1.25	0.7122	Bara30	0.92/-0.62	0.739
Bara14	0.906/-1.33	0.7004	Bara31	0.916/-0.6	0.7211
Bara15	0.905/-1.37	0.6904	Bara32	0.914/-0.64	0.7101
Bara16	0.903/-1.39	0.6851	Bara33	0.914/-0.64	0.702
Bara17	0.901/-1.48	0.6802	Ploss	0.2 MW	
Pg	3.91 MW		Qloss	0.21 MVAR	
Qg	2.51 MVAR		TRload	77	

Tablo 2. IEEE 33 bara test sistemine ait hat yüklenmeleri.

Hat adı	Hat baş.	Hat bitiş	Hat yükü %	Hat adı	Hat baş.	Hat bitiş	Hat yükü%
1	1	2	23	17	17	18	1.1
2	2	3	41	18	2	19	4
3	3	4	29.5	19	19	20	3
4	4	5	28	20	20	21	2
5	5	6	27.5	21	21	22	1
6	6	7	12.9	22	3	23	10.6
7	7	8	10.5	23	23	24	9.6
8	8	9	8.1	24	24	25	4.8
9	9	10	7.4	25	6	26	14.6
10	10	11	6.7	26	26	27	13.6
11	11	12	6.2	27	27	28	13
12	12	13	5.4	28	28	29	12.4
13	13	14	4.7	29	29	30	11
14	14	15	3.1	30	30	31	5.1
15	15	16	2.5	31	31	32	3.3
16	16	17	1.8	32	32	33	0.8

Tablo 1’de bara gerilimleri ve VSI değerleri, Tablo 2’te dağıtım hattı verilerinin normal sınırlarda olduğu görülmektedir. Özellikle bara gerilim değerlerinin 0.9 – 1.1 pu aralığında olması istenilmektedir. VSI değerinin ise 0’dan büyük olması şebekenin kararlı olduğunu göstermektedir. Bu iki verinin Tablo 1’de normal sınırlarda olduğu görülmektedir. Bu güç sisteminde senkron generator 3.91 MW/2.51MVAR aktif/reaktif güç üretmiştir. Bu dağıtım sisteminde hat kayıpları 0.2 MW/0.21 MVAR’dır.

Önerilen metoda göre ilgili dağıtım sistemindeki dağıtım trafolarının ne kadar daha yük kaldırabileceği Denklem (2)’ye göre belirlenir (adım 2). Denklem (3)’e göre ilgili dağıtım sistemine dahil edilecek tahmini EA sayısı belirlenir (adım 3). Bu işlem sırasında IEEE 33 bara test sisteminin yüküne göre segmentlere ayrılır. Segmentlere ayırma işleminde sistemin toplam yük değerinin dengeli dağıtılması baz alınmıştır. Segmentlere ayrılmış IEEE 33 test bara sistemi Şekil 3’te verilmiştir (adım 4).



Şekil 3. Segmentlere ayrılmış IEEE 33 bara radyal dağıtım sistemi.

İlgili baraların gerilim ve VSI değerlerine göre EA’ların ilgili baralara entegrasyonu sağlanır (VSI ve bara gerilimi değeri 1’e yakın olan bara ve bara yakınlarına öncelikle EA şarj istasyonları dağıtılır). Sonrasında yeniden yapılan yük akış analizine göre dağıtım sisteminin kısıtları ihlal edip etmediği kontrol edilir. Kısıtların ihlal edildiği durumda, kısıtı bozan baranın yakınındaki elektrikli araç şarj istasyonu azaltılır ve tekrar yük akış analizi yapılır. Bu işlem kısıtların ihlal durumu ortadan kaldırılana kadar devam eder. Optimum EA yerleşiminden sonra yapılan yük akış analizi sonuçları Tablo 3 ve 4’te verilmiştir. Tablolar incelendiğinde ilgili baraların gerilim değerlerinin 0.9-1.1 pu değeri aralığında olduğu, VSI değerlerinin ise her bara için 0’dan yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca hatlara/trafolara ait yüklemeler istenen sınırlarda kaldığı gözlemlenmiştir. Bu verilerin %100-110 değerlerini aşmadığı görülmektedir (Adım 5-6). Devamında şarj istasyonu sayısına göre bulunan EA sayısı Matlab ortamındaki V2G simülasyonuna transfer edilir. V2G simülasyonuna göre EA şarj ve deşarj durumuna göre çıktılar elde edilir (Adım 7-8).

Tablo 3. EA şarj istasyonları yerleşim sonrasında ait yük akış analizi sonuçları.

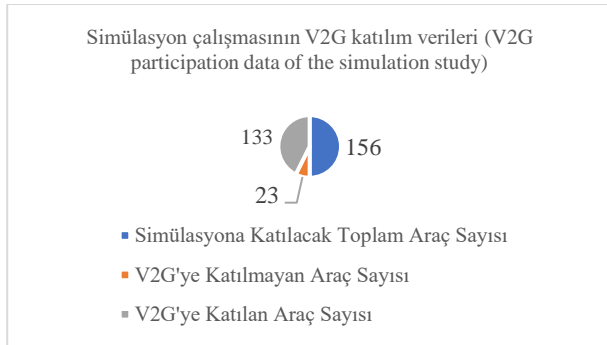
Bara adı	Vpu/deg	VSI	Bara adı	Vpu/deg	VSI
Bara1	0.99/-0.9	0.997	Bara18	0.90/-2,3	0.661
*Bara2	0.99/-1,0	0.994	*Bara19	0.99/-1,1	0.972
*Bara3	0.97/-1,0	0.981	*Bara20	0.97/-2,0	0.972
*Bara4	0.96/-1,0	0.930	*Bara21	0.96/-2,3	0.970
Bara5	0.93/-1,0	0.9002	*Bara22	0.96/-2,5	0.962
Bara6	0.93/-1,3	0.875	*Bara23	0.97/-1,1	0.925
Bara7	0.93/-1,5	0.812	*Bara24	0.96/-1,3	0.90
Bara8	0.91/-1,8	0.744	Bara25	0.95/-1,3	0.882
Bara9	0.91/-2,0	0.74	Bara26	0.93/-1,2	0.812
Bara10	0.90/-2,0	0.725	Bara27	0.92/-1,2	0.801
Bara11	0.90/-2,0	0.721	Bara28	0.92/-1,5	0.791
Bara12	0.90/-2,0	0.709	Bara29	0.91/-1,4	0.752
Bara13	0.90/-2,1	0.704	Bara30	0.90/-1,3	0.732
Bara14	0.90/-2,2	0.684	Bara31	0.90/-1,4	0.71
Bara15	0.90/-2,2	0.678	Bara32	0.90/-1,4	0.701
Bara16	0.90/-2,2	0.675	Bara33	0.90/-1,4	0.684
Bara17	0.90/-2,3	0.672	Ploss	0.2 MW	
Pg	3.91MW		Qloss	0.21 MVAR	
Qg	2.51MVAR		TRload	77%	

*Bu sembol olan baralarda uygulanan metoda göre şarj istasyonu entegrasyonu yapılmıştır

Tablo 4. EA şarj istasyonları yerleşim sonrasında ait hat yüklenmeleri.

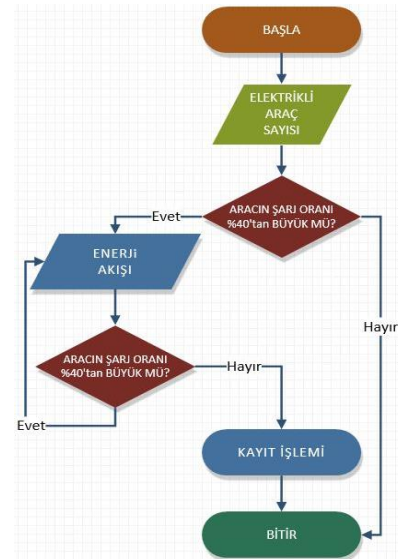
Hat adı	Hat baş.	Hat bitiş	Hat yükü %	Hat adı	Hat baş.	Hat bitiş	Hat yükü%
1	1	2	56,1	17	17	18	1,1
2	2	3	36,8	18	2	19	4
3	3	4	35,3	19	19	20	21,0
4	4	5	34,6	20	20	21	2
5	5	6	15,1	21	21	22	17,6
6	6	7	11,7	22	3	23	12,6
7	7	8	8,2	23	23	24	5,8
8	8	9	7,5	24	24	25	18,2
9	9	10	6,9	25	6	26	16,6
10	10	11	6,3	26	26	27	13
11	11	12	5,5	27	27	28	12
12	12	13	4,7	28	28	29	11
13	13	14	3,2	29	29	30	5,2
14	14	15	2,5	30	30	31	3,3
15	15	16	1,8	31	31	32	0,8
16	16	17	1,1	32	32	33	43,3

Benzetim çalışmasında kullanılacak tüm EA'ların bataryası [46, 47] çalışmalarında sunulduğu gibi 100 kWh olarak kabul edilmiştir. Bu araçların günde bir kez V2G'ye katılım sağlayacağı varsayılmıştır. Benzetim çalışması 156 EA ile V2G'ye katılma veya katılmama durumu Şekil 4'da gösterilmiştir. Her araca rassal olarak %30 ile %99 arasında anlık şarj seviyesi atanmaktadır. Batarya şarj seviyesi %40'ın altında olan EA'lar diğer araçlardan ayrıştırılarak V2G sistemine dahil edilmemiştir. Kalan EA'ların şarj durumu %40 seviyesinden daha düşük olana kadar şebekeye, her saat 6 kW enerji aktarımı yapacak şekilde bir sistem kurgusu tasarlanmıştır.



Şekil 4. Simülasyon çalışmasının V2G katılım verileri.

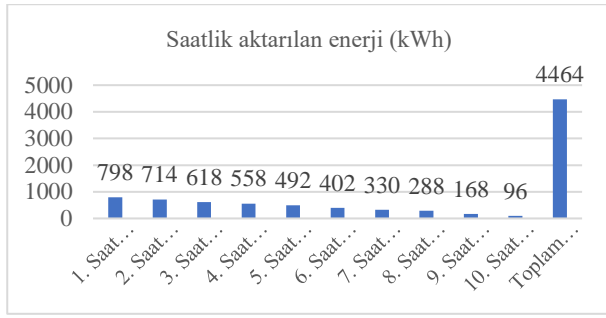
Benzetim çalışması V2G'ye katılacak EA'ların ayrıştırma işlemini yaptıktan sonra şebekeye enerji aktarımını hesaplayıp araçların enerji aktarım işlemlerini kaydetmektedir. Enerji aktarımının nasıl yapıldığını açıklayan akış diyagramı Şekil 5'de verilmiştir.



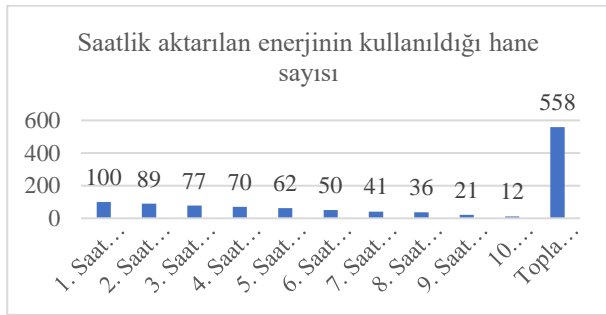
Şekil 5. Enerji aktarımına ait akış diyagramı.

Simülasyona katılan araçlar her saat 6 kW enerji aktarımı yapar. Daha sonra araçların şarj durumu kontrol edilerek batarya şarj durumu %40'ın altına düşen araçlar ayrıştırılır. Kalan araçlarla simülasyon 10 saat boyunca devam eder. Her saat kaç hanenin enerji ihtiyacının karşılandığı hesaplanır. Şekil 6a ve Şekil 6b'de V2G konseptiyle şebekeye aktarılan enerji miktarı ve bir evin saatlik ortalama enerji ihtiyacı 8 kWh olarak varsayılarak, enerji ihtiyacı karşılanan hane sayısı gösterilmiştir. Bu analiz çalışmasında sayısal çıktıları net analiz edebilmek için Akdağ ve Yeroğlu (2019) tarafından yapılan çalışmada, kömür kullanılarak üretilen her 1000 kWh elektrik için ortalama 800-1000 kg CO₂ açığa çıktığı belirtilen veriler kullanılmıştır [48]. Açığa çıkan CO₂ yetişkin kayın ağaçları ile ortalama 2,35 kg/sa hızında yok edilebilmektedir [49]. Ayrıca ülkemizde üretilen elektrik enerjisi için %20 oranında kömür, %24 oranında doğalgaz kullanılmaktadır [50]. Çalışma

sonucunda 1519 kg CO₂ salınımının önlenilebileceği görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 6. Simülasyon çalışmasında a) şebekeye enerji transferi ve b) aktarılan enerjinin kullanıldığı hane sayısı

Sonuçlar ve Tartışma

Günümüzde sayıları hızla artan EA'ların şarj işleminin dağıtım şebekesi üzerinde oluşturduğu ilave yük talebi, faz dengesizliği, gerilim düşümü gibi etkilerin azaltılması üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmada, elektrikli araçların dağıtım ağına optimum entegrasyonunu sağlayan ve V2G konseptinin çevre/mevcut ağ üzerindeki olası etkilerini gösterebilmek için matematiksel bir model önerilmiştir. Modele göre hat, trafo, bara ve VSI verileri kullanılarak sistemin kaldırabileceği şarj istasyonu sayısı belirlenmiştir. Ayrıca şarj istasyonlarının hangi baralara yerleştirilebileceği ve istasyon adedi hesaplanmıştır. Modelin uygulanabilirliğini ve kararlılığını test etmek amacıyla IEEE 33 bara test sistemi kullanılmıştır. EA şarj istasyonları DigSilent ortamında modellenerek, önerilen metoda göre radyal dağıtım sistemine optimum entegrasyonu sağlatılmıştır. Elde edilen veriler MatLab ortamında hazırlanan simülasyona aktarılmıştır. Simülasyonda EA'ların depoladığı enerjinin şebekeye aktarılması belli kriterler dahilinde kurgulanmıştır. Bu model ve simülasyon çıktılarına göre 156 EA'nın şebekeye toplam 4464 kWh enerji akışı sağladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, şebekeye verilen enerjiyi karşılamak için 1519 kg CO₂ salınımının önlenilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte 646 yetişkin kayın

ağacının 1 saatte temizleyeceği CO₂ doğaya salınmamış olacaktır. Dolayısıyla bu çalışmada, hem EA'ların mevcut ağ üzerindeki etkileri hem de ilgili lokasyondaki çevresel etkileri önerilen model ile detaylı olarak analiz edilmiştir.

İlerleyen zamanlarda yapılacak V2G çalışmalarında optimizasyon algoritmalarının kullanımı, farklı şebeke parametrelerinin kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ve araçların batarya ömrünün göz önünde bulundurulması ile daha somut sonuçların elde edilebileceği öngörülmektedir.

Özetle çalışmanın önemi aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilir:

1. Şebeke Yük Yönetimi: Çalışmada sunulan model, elektrikli araçların şarj işleminin dağıtım şebekesi üzerindeki ilave yük talebi, faz dengesizliği ve gerilim düşümü gibi olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik çözümler sunar.
2. Optimum Entegrasyon: Elektrikli araçların dağıtım ağına optimum entegrasyonunu sağlayarak, şarj istasyonlarının en verimli şekilde yerleştirilmesi ve istasyon adedinin belirlenmesi konusunda araştırmacı ve işletmelere yol gösterir.
3. V2G Konseptinin Değerlendirilmesi: V2G konseptinin çevresel ve mevcut dağıtım şebekesi üzerindeki olası etkilerini analiz ederek, bu teknolojinin uygulanabilirliği hakkında önemli ve yol gösterici veriler sağlar.
4. Enerji Depolama ve Geri Kazanım: Elektrikli araçların depoladığı enerjinin şebekeye aktarılması ile enerji geri kazanımı sağlanarak, enerji verimliliği artırılır ve karbon salınımı azaltılabilir.
5. Çevresel Faydalar: Çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda, CO₂ salınımının önemli ölçüde azaltılabileceği ve dolayısıyla çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanabileceği gösterilir. Çalışmada özellikle gelecekte EA'ların enerjisinin tamamının yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması bu etkiyi dahada artıracaktır.
6. Model ve Simülasyon Kullanımı: Matematiksel model ve simülasyonlar kullanılarak elde edilen veriler, gerçek dünya uygulamaları için güvenilir ve uygulanabilir çözümler sunar. Gerçek sistemde risk almadan öngörülemez durumlar önceden yorumlanıp, önlem alınabilir.
7. Gelecek Çalışmalar İçin Yol Gösterici: İleride yapılacak V2G çalışmalarında optimizasyon algoritmalarının kullanımı, farklı şebeke

parametrelerinin değerlendirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu gibi konularda yol gösterici olur.

Kaynaklar

- [1] N. Ünlü *et al.*, *Elektrikli Araçlar*. Kocaeli: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, 2003.
- [2] A. Kerem, “Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri,” Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 5, no. 1, pp. 1–13, 2014.
- [3] M. Singh, “Green Energy for Metropolitan Transport,” *Int. J. Power Eng. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 338–342, 2013, doi: 10.12986/ijpee.2013.002.
- [4] H. Özbay, C. Közkurt, A. Dalcı, and M. Tektaş, “Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar,” *Akıllı Ulaşım Sist. ve Uygulamaları Derg.*, vol. 3, no. 1, pp. 34–50, 2020.
- [5] YE Ekici, İC Dikmen, M Nurm Muhammed, T Karadağ, “Efficiency analysis of various batteries with real-time data on a hybrid electric vehicle” *International Journal of Automotive Science And Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 214–223, 2021.
- [6] İC Dikmen, YE Ekici, T Karadağ, T Abbasov, SE Hamamcı “Electrification in Urban Transport: A Case Study with Real-time Data” *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 9 (1), 69-77, 2021.
- [7] M Nurm Muhammed, O Akdağ, T Karadağ, “A Novel Newton Raphson-Based Method for Integrating Electric Vehicle Charging Stations to Distribution Network. ”, *Electrica* vol. 23, no. 2, pp. 310-317, 2023.
- [8] G. Şen, “Şarj Edilebilen Elektrikli Araçların Kesintisiz Güç Kaynağı Olarak Kullanılmasını Sağlayan Bir Güç Ünitesinin Tasarımı Ve Uygulaması,” *Yıldız Teknik Üniversitesi*, 2012.
- [9] X. Li *et al.*, “A cost-benefit analysis of V2G electric vehicles supporting peak shaving in Shanghai,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 179, no. 106058, 2020, doi: 10.1016/j.epr.2019.106058.
- [10] A. F. Güven and S. B. Akbaşak, “Elektrikli Araçlarda DA Hızlı Şarj Ünitelerinin Şebeke Altyapısına Etkilerinin İncelenmesi,” *Sinop Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, vol. 6, no. 1, pp. 42–54, 2021, doi: 10.33484/sinopfd.886985.
- [11] M. Nurm Muhammed and T. Karadağ, “Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması A Review on Locating the Electric Vehicle Charging Stations and Their Effect on the Energy Network,” vol. 8, no. 2, pp. 218–233, 2021.
- [12] A. R. Boynueğri, “Elektrikli Taşıtların Güç Yönetimi Ve Akıllı Şebekeler İle Bağlantısı,” *Yıldız Teknik Üniversitesi*, 2014.
- [13] Volkswagen Türkiye, “volkswagen golf broşür,” 2022. <https://ebrosur.vw.com.tr/araclar/golf-8/golf-8.html> Accessed: 12 July 2022 (accessed Jul. 14, 2022).
- [14] T Karadağ, İC Dikmen, “Yeni Nesil, Modüler ve Akıllı Batarya Yönetim Sistemi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Ejosat Special Issue (RDCONF)*, 1103-1112. 12 December 2021 DOI: 10.31590/ejosat.1045564
- [15] İC Dikmen, N Yıldırım, T Karadağ, “Multi-Chemistry Battery Management System for Electric Vehicles”, *The European Journal of Research and Development*, vol. 2, no. 4, pp. 126-134, 2022.
- [16] İC Dikmen, K Kartaca, T Karadağ, T Abbasov, “An Overview Of Battery Technologies”, *3rd International Energy Engineering Congress*, 2018.
- [17] İC Dikmen, T Karadağ, “Elektrikli Araç Batarya Yönetim Sistemleri Ve Yeni Trendler”, ISBN: 978-625-6971-84-4
- [18] ÖF Özcan, T Karadağ, M Altuğ, Ö Özgüven, “Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması”, *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation* vol. 8, no. 2, pp. 276-298, 2021.
- [19] İC Dikmen, T Karadağ, “Onboard Battery Type Determination,” 2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 2021, pp. 360-365, doi: 10.1109/ISMSIT52890.2021.9604658.
- [20] İC Dikmen, T Karadağ “Electrical Method for Battery Chemical Composition Determination,” in *IEEE Access*, vol. 10, pp.6496-6504,2022,doi: 10.1109/ACCESS.2022.3143040.
- [21] W. Kempton and S. E. Letendre, “Electric vehicles as a new power source for electric utilities,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 2, no. 3, pp. 157–175, 1997, doi: 10.1016/S1361-9209(97)00001-1.
- [22] Ş. Kuşdoğan, “Akıllı Şebekelere Elektrikli Araçların Entegrasyonu ve Taşıttan Şebekeye V2G Uygulamaları,” 2017, no. III. Güç ve Enerji Sistemleri Sempozyumu, İzmir.
- [23] H. Tarlak, “Elektrikli Araçlar İçin İki Yönlü Şarj Devresi Tasarımı,” *Kırklareli Üniversitesi*, Kırklareli, 2018.
- [24] S. C. Yılmaz, “Türkiye’de Elektrikli Araçların Orta Gerilim Dağıtım Şebekesine Etkisinin Değerlendirilmesi,” *Hacettepe Üniversitesi*, Ankara, 2021.
- [25] İ. Verim, “Elektrikli Araçların Dağıtılmış Enerji Üretim Ve Depolama Sistemi Olarak Değerlendirilmesi,” *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2013.
- [26] H. Tarlak and E. İşen, “Elektrikli Araçlar ve Akü Şarj Sistemleri,” *Kırklareli Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 124–141, 2018.
- [27] B. Yıldız, H. Çiftçi, O. Ayan, and B. E. Türkay,

- “Elektrikli Araçların Dağıtım Şebekesine Etkisinin Maliyet Analizi ve Genetik Algoritma ile Optimizasyonu Cost Analysis of the Effect of Electric Vehicles on Distribution Network and Optimization with Genetic Algorithm,” *Güç Sist. Konf.*, pp. 7–12, 2018, doi: 10.5281/zenodo.1482364.
- [28]G. T. Heydt, “The impact of electric vehicle deployment on load management strategies,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 5, pp. 1253–1259, 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.318071.
- [29]B. Zoroğlu, A. T. Yapıcı, and G. Kurt, “Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Standartları ve Türkiye’deki Elektrikli Araç Durumu,” in *International Marmara Sciences Congress*, 2020, pp. 301–310.
- [30]G. Şen, A. R. Boynuegri, and M. Uzunoglu, “Elektrikli Araçların Şarj Yöntemleri ve Araçların Şebekeyle Bağlantısında Karşılaşılan Problemlere Yönelik Çözüm Önerileri,” *Elektr. ve Bilgi. Sempozyumu, Elazığ*, no. 2011, pp. 357–362, 2011.
- [31]Academia.edu, “Akıllı Şebeke Sistemlerinin ve Bileşenlerinin İncelenmesi”, Aydın Ö.F., Özdemir B.
- [32]L. Shi, A. Meintz, and M. Ferdowsi, “Single-phase bidirectional AC-DC converters for plug-in hybrid electric vehicle applications,” *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2008*, pp. 3–7, 2008, doi: 10.1109/VPPC.2008.4677506.
- [33]V. Monteiro, H. Gonalves, J. C., and J. L. “Batteries Charging Systems for Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” in *New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering*, 2012, pp. 149–168.
- [34]G. Y. Choe, J. S. Kim, B. K. Lee, C. Y. Won, and T. W. Lee, “A Bi-directional battery charger for electric vehicles using photovoltaic PCS systems,” *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2010*, pp. 3–8, 2010, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729223.
- [35]M. Saygılı and S. S. Tezcan, “Enerji İletim Hattı Koruma Modellemesi ve Analizi ile Ankara Bölge Uygulaması,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 7, no. 2, pp. 303–316, 2019, doi: 10.29109/gujsc.498867.
- [36]O. Akdağ, D. Peköz, and C. Yeroğlu, “154/34,5 kV Güç Transformatörleri için Diferansiyel Koruma Rölesi Koordinasyonu Benzetimi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 22, no. 2, p. 1070, 2018, doi: 10.19113/sdufbed.04605.
- [37]Y. Sarıkaya and R. Yumurtaçı, “Dağıtılmış Üretim Kaynaklarının Elektrik Dağıtım Sistemlerine Etkilerinin DigSilent Powerfactory Programı ile Analizi,” in *V. Ulusal Elektrik Tesisat Kongre ve Sergisi, İzmir, Türkiye*, 2017, pp. 1–15
- [38]H. İmamoğlu and S. M. Bağdatlı, “Mühendislik Problemlerinin Matlab Simulink Programı Desteğiyle Matematiksel Modellenmesi,” *Soma Mesl. Yüksekokulu Tek. Bilim. Derg.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–15, Jul. 2022, doi: 10.47118/somatbd.1112039.
- [39]H. Çakar and M. T. Gençoğlu, “GSAP: Güç Sistem Analizi Uygulaması için Matlab Tabanlı Grafik Paketi,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 32, no. 1, pp. 179–188, Mar. 2020, doi: 10.35234/fumbd.622077.
- [40]M. Takaoglu and F. Takaoglu, “K-means ve hiyerarşik kümeleme algoritmasının weka ve matlab platformlarında karşılaştırılması,” *İstanbul Aydın Üniversitesi Derg.*, no. 3, p. 11, 2017.
- [41]N. F. Naim, M. F. K. Faisal, S. S. Sarnin, and N. Ya’acob, “Electrical Engineering Educational Software Based on Matlab and Its Graphic User Interface (Gui),” *IJAEDU- Int. E-Journal Adv. Educ.*, vol. IV, no. 10, pp. 24–34, 2018, doi: 10.18768/ijaedu.415396.
- [42]İ. Poyraz, “Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı İndekslerinin Uç Öğrenme Algoritması İle Tahmini,” *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ*, 2019.
- [43]S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, and P. Mahanta, “Impact of electric vehicle charging station load on distribution network,” *Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 1–25, 2018, doi: 10.3390/en11010178.
- [44]U. Eminoglu and M. H. Hocaoglu, “A network topology-based voltage stability index for radial distribution networks,” *Int. J. Power Energy Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 131–143, 2009, doi: 10.2316/Journal.203.2009.2.203-4280.
- [45]S. Murali, N; Gobimohan, “Power Flow Analysis of IEEE 33 Bus Radial Distribution Systems using DigSilent,” *Int. J. Innov. Manag. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 1–9, 2021.
- [46]S. Kocabey, “Elektrikli Otomobillerin Dünyü, Bugünü ve Geleceği,” in *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 2018, pp. 16–23.
- [47]A. Çiçek and O. Erdinç, “PV-Batarya Hibrit Sistemi İçeren Elektrikli Araç Otoparkının Şarj Yönetimi,” *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 15, pp. 466–474, 2019, doi: 10.31590/ejosat.527350.
- [48]O. Akdağ and C. Yeroğlu, “An evaluation of an offshore energy installation for the Black Sea region of Turkey and the effects on a regional decrease in greenhouse gas emissions,” *Greenh. Gases Sci. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 531–544, 2020, doi: 10.1002/ghg.1963.
- [49]“Orman Genel Müdürlüğü,” *Orman Genel Müdürlüğü*, 2022. <https://www.ogm.gov.tr/tr/bunlari-biliyor-muydunuz> (accessed Jul. 25, 2022).
- [50]“Haziran 2022 Kurulu Güç Raporu,” *TEİAŞ*, 2022. <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>. Accessed 14 July 2022 (accessed Jul. 25, 2022).
- [51]“Trends in electric cars”, “Global EV Outlook 2024”, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars>. Accessed 11 June 2024



Bulanık Mantık Tabanlı Rogers ve IEC metotlar Kullanarak Güç Transformator Arızalarının Belirlenmesi

Determination of Power Transformer Faults Using Fuzzy Logic Based Rogers and IEC Methods

Abdurrahim TURAN^{1*}, Abuzer ÇALIŞKAN²

¹ TEİAŞ, abdurrahimtrn@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8582-9720>

² Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elazığ, acaliskan@firat.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8262-7912>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Şubat 2024
Revizyon 11 Mayıs 2024
Kabul 24 Haziran 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Transformator arızaları, Bulanık mantık, Gaz analizi

ÖZ

Elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında kullanılan teçhizatlardan biri olan güç transformatorlerinde meydana gelebilecek arızaların önceden tespit edilmesi; sistemin ve teçhizatın korunmasını sağlar. Arızaların tespiti için kullanılan yağda çözünmüş gaz analizi ile daha arızanın başlangıç aşamasında arızaya müdahale edilebilmektedir. Arızalar sonucu oluşan bu gazlar transformator yağından örnekler alınarak yağda çözünmüş gaz analiz (DGA) sistemlerinde değerlendirilir. DGA temel olarak iki şekilde uygulanır. Bunların en bilineni klasik yöntemler ve son zamanlarda geliştirilen akıllı sistemler yani esnek hesaplama yöntemleridir. Klasik sistemlerin arıza belirlemedeki doğruluğunu arttırmak için akıllı sistemler kullanılır. Bu çalışmada gaz oranları kullanarak bulanık mantık tabanlı Rogers ile IEC (International Electrotechnical Commission) oran ve klasik IEC ve Rogers oran yöntemleri kullanarak arızaların tespiti yapılmıştır. Bulanık mantık tabanlı yöntemlerin klasik yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği bulunmuştur.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 February
Received in revised form 11 May
Accepted 24 June
Available online 30 June 2024

Keywords:

Transformer faults, Fuzzy logic, Gas analysis

ABSTRACT

Preliminary detection of malfunctions that may occur in power transformers, one of the equipment used in the transmission and distribution of electrical energy; Provides protection of the system and equipment. With the oil dissolved gas analysis used to detect malfunctions, the malfunction can be intervened at the initial stage of the malfunction. These gases formed as a result of malfunctions are evaluated in DGA systems by taking samples from the transformer oil. DGA is basically implemented in two ways. The most well-known of these are classical methods and recently developed intelligent systems, that is, flexible calculation methods. Intelligent systems are used to increase the accuracy of classical systems in fault detection. In this study, faults were detected using fuzzy logic-based Rogers and IEC (International Electrotechnical Commission) ratio and classical IEC and Rogers ratio methods using gas ratios. It has been found that fuzzy logic-based methods give better results than classical methods.

Doi: 10.24012/dumf.1442331

* Sorumlu Yazar

Giriş

Elektrik enerjisini, kayıpları azaltarak daha verimli bir şekilde iletebilmek için gerilim seviyesi yükseltilmektedir. Elektrik enerjisi tüketileceği yere iletdikten sonra dağıtım merkezlerinde gerilim seviyesi düşürülmektedir. Elektrik enerjisinin sabit güç ve frekansta gerilim seviyesini yükseltip/azaltmak için güç transformatörleri kullanılmaktadır. Güç transformatörleri farklı gerilim, güç ve yalıtım malzemesine göre sınıflandırılabilir. Güç transformatörlerinde normalde meydana gelen arızalar; ark, kısmi deşarj, düşük enerjili kıvılcım, aşırı yüklenme ve yalıtım sisteminin aşırı derecede ısınmasıdır. Güç transformatörlerinde yalıtım için kullanılan yağlar arızalar sebebiyle çeşitli termal ve elektriksel streslere maruz kalırlar. Bu streslere bağlı olarak güç transformatörlerinde yalıtım malzemesinin bozulmasına ve farklı konsantrasyonlarda çeşitli gazların oluşmasına sebep olurlar. Meydana gelen bu gazlar; Etan (C₂H₆), Hidrojen (H₂), Asetilen (C₂H₂), Metan (CH₄), Etilen (C₂H₄) ve selülozik yalıtıktan oluşan Karbondioksit (CO₂) ve Karbon monoksit (CO) gazlarıdır. Ayrıca montaj aşamasında bağlantı gevşekliğinde Oksijen(O₂) ve Azot(N₂) gazları da ortaya çıkar. Transformatörlerde yağda çözünmüş gaz analiz yöntemi kullanılarak arızanın daha başlangıç aşamasında arızaya müdahale edilebilmektedir. Farklı arıza türleri farklı gaz türlerini ürettiğinden, belirli gazların varlığı arıza tipini belirlemek için kullanılabilir [1].

Genel kısmi deşarj arızasında Hidrojen ve Metan oluşurken, termal arızalarda Etan, Etilen, ark arızasında ise Hidrojen ve Asetilen gazları ortaya çıkar [2]. Gazın artış hızı arızanın ciddiyetini belirlemektedir. Arızalı gazların tespit edilmesinde çeşitli teknikler vardır. Yağda çözünmüş gaz analiz yöntemi (DGA) en etkili yöntem olarak kabul edilmiştir. Bu yöntemde transformatörden küçük hacimli yağ numuneleri alınıp laboratuvarında analiz edilerek arıza değerlendirmesi yapılır. DGA'da çeşitli yöntemler vardır ve en yaygın olanları; Anahtar Gaz (Key Gaz), Rogers oranı, Doernenburg oranı, Logaritmik nomograf, IEC oranı ve Duval üçgenidir. Bu yöntemler klasik metot olarak tanımlanmaktadır. Klasik teşhis metotları, tek bir arızadan veya birden fazla arızadan ancak bir baskın yapıya sahip olan gazların oranına dayanır. Bir transformatörde birden fazla arızadan kaynaklanan gazlar toplandığında, farklı gazlar arasındaki ilişki çok karmaşık hale gelir ve bunlar önceden tanımlanmış kodlarla eşleşmeyebilir. Bu durumları teşhis etmek için akıllı yöntemler kullanılmaktadır [3]. Akıllı sistemler olarak da tanımlanan bu yöntemlerin bazıları şunlardır; bulanık mantık, destek vektör makinaları, bayes ağları, yapay sinir ağları ve genetik algoritmalarıdır [4]. Bulanık mantık kolay analiz edilmeyen çok karmaşık sistemlerin davranışını etkili bir şekilde ortaya koyar. Klasik yöntemlerde 0 veya 1 olan sonucu, bulanık mantık 0 ile 1 değerleri arasında bir değer olarak bulabilir [5].

Atalar ve Kuntman tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güç transformatöründen yağ numuneleri alınarak, IEC oran yöntemi ve bulanık mantık yöntemi ile yağda çözünmüş gaz arıza analiz değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan çalışmada, bulanık mantık yönteminin klasik yöntemlere göre daha doğru arıza analizi yaptığı belirtilmiştir [6].

Abdullayev tarafından gerçekleştirilen güç transformatörlerinin güvenilirliğinin artırılması isimli çalışmada arıza teşhisinde kromatografik analiz yöntemi kullanılmıştır. Güç transformatöründen alınan yağ numuneleri General Electric Kelman Transport X tarafından kromatografik olarak analiz edilmiştir. Açık gaz analizi ve duval üçgen diyagramı ile değerlendirilen analiz sonuçları ENTRA test cihazı ile elde edilmiştir. Farklı yöntemlerle edilen bu sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada daha detaylı sonuç elde etmek için DGA analizlerinin 6-12 ay sonra tekrarlanması istenmiştir [7].

Khan vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, IEC-60599 standardından kaynaklanan sınırlamaları aşmak için bulanık mantık ve ANFIS yöntemi kullanılmıştır. Yağda çözünmüş gaz analiz yöntemlerinden olan Rogers ve Doernenburg oran yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntem de transformatör arızalarını tespit etmek için uygun bulunmuştur. Ancak ANFIS'in tanı kapasitesinden elde edilen sonuçların bulanık mantık yöntemine göre daha iyi olduğu ortaya konmuştur. Bu çalışmada ANFIS de %98 doğruluk oranı, IEC standardı için kullanılan Rogers ve Doernenburg için ise sırasıyla %97 ve %99 doğruluk oranları bulunmuştur [8].

Ramesh ve Sushama tarafından yapılan çalışmada 138/13.8 kV, 100MVA'lık güç transformatörü simule edilmiştir. Aynı çalışmada %1, %3, %5, %10, %15 ve %25 gibi farklı sargı yüzdelerinde bir transformatörün primer ve sekonder sargılıları kısa devre edilerek terminallerde oluşan akım değerleri ölçülmüştür. Terminallerdeki kısa devre durumlarında oluşan iç arıza akımlarının ihmal edilebilir küçüklükte olduğu belirtilmiştir. Simetrik bileşen yaklaşımı kullanılarak negatif bileşen akımlarındaki önemli değişiklikler saptanmıştır. Negatif bileşen akım genliğindeki yüzdelik değişim (%MAG) ve arıza oluş periyodu sırasında transformatörde meydana gelen faz kaymaları (PS) değerlendirilerek bulanık mantık girişlerine uygulanmıştır. Burada bulanık mantık sadece transformatör şartlarını izlemek için değil aynı zamanda önerilen şemanın hassasiyetini geliştirmek içinde kullanılmıştır. Önerilen şemanın düşük seviyeli iç sargı arızalarını tespit etmede geleneksel diferansiyel koruma yöntemlerine göre arıza belirleme sınırlamalarını ortadan kaldırdığı belirtilmiştir. Bu nedenle mevcut güç transformatörü arıza tespit yöntemlerine çok iyi bir tamamlayıcı olduğu vurgulanmıştır [9].

Aziz vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak geleneksel arıza algılama hassasiyetlerini geliştirmek için yeni bir aktarma algoritması önerilmiştir. Önerilen bulanık tabanlı geçiş algoritması, akı-diferansiyel akım türevi eğrisi, harmonik kısıtlama ve yüzde diferansiyel karakteristik eğrisinden oluşturulmuştur. Algoritma MATLAB yazılım programıyla simule edilmiş, hızlı ve doğru bir şekilde açma ürettiği ortaya konmuştur [10].

Koroğlu vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada güç sisteminde bulunan gerçek bir transformatöre ait DGA sonuçları üzerinden arıza analizi yapılmıştır. DGA sonuçlarının değerlendirmesinde kılavuz gaz, Duval üçgen, Rogers gaz oranları ve Doernenburg gaz oranları gibi konvansiyonel değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Tüm değerlendirme yöntemlerine göre, arızanın yüksek enerjili deşarj olduğu belirtilmiştir. Transformatörde yüksek enerjili bir deşarj biçimi olan faz toprak kısa devre arızasının

meydana geldiği yapılan fiziksel kontrollerde görüldüğü belirtilmiştir [11].

Genç S. ve Karagöl S. tarafından yapılan çalışmada klasik yöntemlerden biri olan IEC oran yöntemi kullanılarak bulanık mantık tabanlı analiz yapılmış [12].

A. Abu-Siada vd. tarafından yapılan çalışmada, uzman personele bağımlılığı azaltmak ve DGA yorumlama tekniklerinin standartlaştırılmasına yardımcı olmak için yeni bir bulanık mantık yaklaşımı sunulmuştur [13].

Alawode ve Olowolafe tarafından yapılan çalışmada güç transformatörlerindeki arızaları tespit etmek için DGA'ya dayanan iki akıllı yöntem tanıtılmıştır. Yanlış teşhisler, herhangi bir kararın ortaya çıkmadığı ya da kural dışı durumların ortaya çıktığı durumlar gibi mevcut zorluklar ele alınmıştır. Rogers oranı, IEC oranı, Dornenburg oranı ve Duval üçgeni yöntemleri gibi geleneksel teknikler için bulanık mantık modelleri geliştirilmiştir [14].

Apte vd. tarafından yapılan çalışmada gazlar iki veya daha fazla arızadan oluştuğunda, farklı gazlar arasındaki ilişki çok karmaşık hale gelir ve önceden tanımlanmış oran kodlarıyla eşleşemez hale gelir ve bu durum teşhisin başarısız olduğunu ortaya koyar. Bu nedenle bu tür sorunlardan kaçınmak için bulanık mantığa odaklanılmış ve Rogers oranı ve IEC oran kodlarını kullanarak teşhis gerçekleştirilmiştir [15].

Dhote ve Helonde tarafından yapılan çalışmada özellikle DGA sonuçlarının standart dışı çıkması durumunda bazen tanı koymakta başarısız olduğu vurgulanmış ve geleneksel yöntem kodları veya transformatörde birden fazla arıza mevcut olduğunda bunları aşmak için bulanık çıkarım sistemi (FIS) önerilmiştir [16].

Hussein vd. tarafından yapılan çalışmada, güç transformatörlerinde arızaları teşhis etmek ve izolasyon yağının durumunu ve kalitesini değerlendirmek için bir ANFIS uzman sistemi kullanılmıştır. Yağdaki DGA'ya bağlı olarak Rogers oranı yöntemi önerilmiştir. MATLAB ortamındaki grafik kullanıcı ara yüzü kullanılmış, arıza teşhisi ve yağ kalitesi değerlendirmesi için etkili olduğu kanıtlanmıştır [17].

Nemeth, vd. tarafından yapılan çalışmada, hali hazırda mevcut verileri kullanarak güç transformatörleri için gerçekçi bir yöntem açıklanmıştır. Yönteme göre, veri elde etme konusundaki pratik sınırlamaları IEC, IEEE ve CIGRE kriterlerini kullanan parametreler üzerindeki olası kısıtlamaları dikkate almıştır. Yöntemde yalnızca tipik test sonuçları değil aynı zamanda fiziksel gözlemler, kademe değiştirici, buşing durumu, yük geçmişi, bakım iş emirleri, yaş, trafo arızalarının eğilimleri vb. gibi bilgiler de kullanılmıştır. Hesaplama, bulanık mantık kullanılarak durum derecelendirmelerini, ağırlıklandırma faktörlerini ve belirli durum parametrelerine atanan puanları içermiştir. İlk sonuca ulaşmak için öncelikle DGA sonuçlarını kullanan bir sinir ağı uygulanmıştır. Daha sonra ayrıntılı teşhisi gerçekleştirmek için çeşitli bulanık denklemler oluşturulmuştur. Farklı bulanık denklemlerde çok sayıda veri ve ilgili DGA bilgisi seçildiğinde, ayrıntılı teşhisin doğruluğunun daha yüksek olduğu vurgulanmıştır [18].

Taha vd. tarafından yapılan çalışmada, bulanık mantık tabanlı Rogers ve Duval üçgen metotları kullanılarak transformatör arıza değerlendirmesi yapılmıştır [19].

Permana vd. tarafından yapılan çalışmada, Endonezya'da bir jeotermal santralde kullanılan transformatörün gaz analiz değerlerinin Duval üçgen metodu kullanılarak yapıldığı belirtilmiştir [20].

Poonnoy vd. tarafından yapılan çalışmada, anahtar gaz, IEC oran, Duval üçgeni teknikleri ve bulanık mantık yaklaşımı kullanarak işletme sırasında güç transformatörlerinde meydana gelen arızalardan kaynaklanan çözünmüş gaz analizleri ile problemlerin tanımlanması tanımlanmıştır [21].

Wani vd. tarafından yapılan çalışmada, klasik çözünmüş gaz analizi (DGA) tekniğini çoklu arıza teşhisi yapacak şekilde geliştirmek için yeni bir akıllı sınıflandırma yaklaşımı önerilmiştir. Duval üçgeni tabanlı optimize edilmiş bulanık çıkarım sistemi ile hem tekli hem de çoklu başlangıç hatalarına duyarlı sinir ağı modelleri oluşturulmuştur [22].

Bulanık mantık yöntemi kullanılarak geliştirilecek sistemler güç transformatörünün ana yağ tankına monte edilerek ve belli aralıklarla yağ numunesi alıp analiz sonuçlarını değerlendirip ve bunları bir ağ haberleşmesi üstünden kullanıcılara iletilebilecek sistemler olarak geliştirilebilir. Geliştirilecek bu sistemler sayesinde transformatör arızaları önceden tespit edilebilecektir.

Bu çalışmada Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketinden (TEİAŞ) alınan gaz limit değerleri hesaba katılarak, bulanık tabanlı IEC oran, bulanık tabanlı Rogers oran, klasik IEC oran ve klasik Rogers oran metotlarıyla gaz konsantrasyon değerleri kullanılarak arıza değerlendirmesi yapılmıştır.

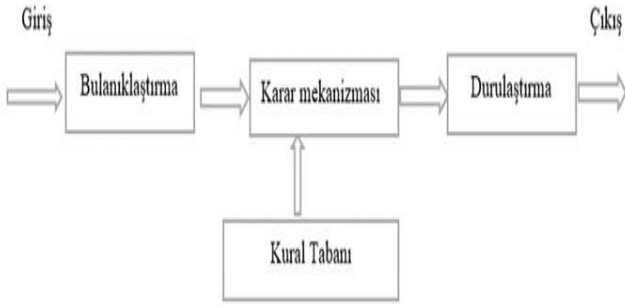
Bulanık Mantık Tabanlı Güç Transformatör Arızalarının Belirlenmesi

Bu bölümde ilk olarak bulanık mantık hakkında genel bilgiler verilmiş, devamında ise bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri kullanılarak MATLAB programında arıza tespit etme sistemleri geliştirilmiştir.

Bulanık Mantık

Bulanık mantık, insan matematiğini standart matematikle birleştirmek için bir çerçeve ve esneklik sağlayan, basit ve sağlam analitik çözümler üreten karmaşık veya yanlış tanımlanmış mühendislik problemlerini çözmeye yarar. Bulanık mantık algoritması belirli bir matematiksel ifadeyi işlemez, ancak dilbilimsel değişkenlere dayalı çıkarım kurallarını kullanır.

Bulanık mantık sistemleri bir uzmanın bilgi, beceri ve tecrübeleri numerik hesaplamalar için kullanarak, bunları bir otomatik kontrol sistem stratejisine çevirebilir. Temel olarak bulanık mantık sistemleri; giriş verisi, bulanıklaştırma, bilgi tabanı, karar mekanizması, durulaştırma ve çıkış verisinden meydana gelir. Şekil 1'de bulanık mantık yapısının genel yapısı verilmiştir.



Şekil 1. Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı [23]

Bulanık mantık yöntemi temel olarak üyelik derecesi [0, 1] aralığında olan üyelik fonksiyonlarından oluşur. Klasik yöntemlere göre insan algısına daha yakın olan bulanık mantık yöntemi daha doğru arıza analizi yapılmasına imkân sağlar. Bu sisteme IEC oran ve Rogers yöntemleri uyarlanabilir. Gaz oranları bulanık mantık sisteminin girişleri olarak kabul edilerek arıza değerlendirmesi yapılır. Özellikle çoklu arızaların saptanmasında daha iyi sonuçlar verir [13]. Bu çalışmada Mamdani karar mekanizması yöntemi kullanılmıştır.

IEC Yöntemi

Bulanık mantık tabanlı sistem için kullanılacak gaz oran değerleri dilsel değişkenler olarak ifade edilmiştir. Girişler klasik yöntemdeki 0, 1 ve 2 yerine düşük, orta ve yüksek olarak belirlenmiştir. Tablo 1'de bu girişlere denk gelen dilsel değişkenler verilmiştir.

Tablo 1. IEC gaz oranına karşılık gelen bulanık mantık girişleri tablosu [13]

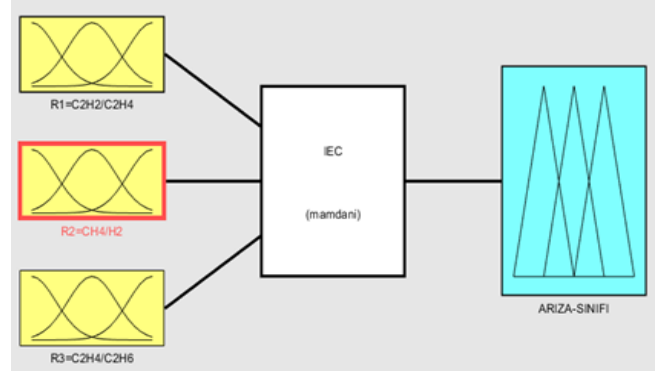
Gaz Oranları	Oran Değer Aralığı	Oran Kodu
$R1 = C2H2/C2H4$	$R < 0.1$	0 (Düşük =Low)
	$0.1 \leq R \leq 3.0$	1 (Orta = Med)
	$R > 3.0$	2(Yüksek =High)
$R2 = CH4/H2$	$R < 0.1$	1 (Düşük =Low)
	$0.1 \leq R \leq 1.0$	0 (Orta = Med)
	$R > 1.0$	2(Yüksek =High)
$R3 = C2H4/C2H6$	$R < 1.0$	0 (Düşük =Low)
	$1.0 \leq R \leq 3.0$	1 (Orta = Med)
	$R > 3.0$	2(Yüksek =High)

Tablo 2'de bulanık mantık çıkarım sisteminde R1, R2 ve R3 gaz oranlarına karşılık gelen kodlara göre meydana gelen arıza türü verilmiştir.

Tablo 2. IEC arıza tanımları tablosu [26]

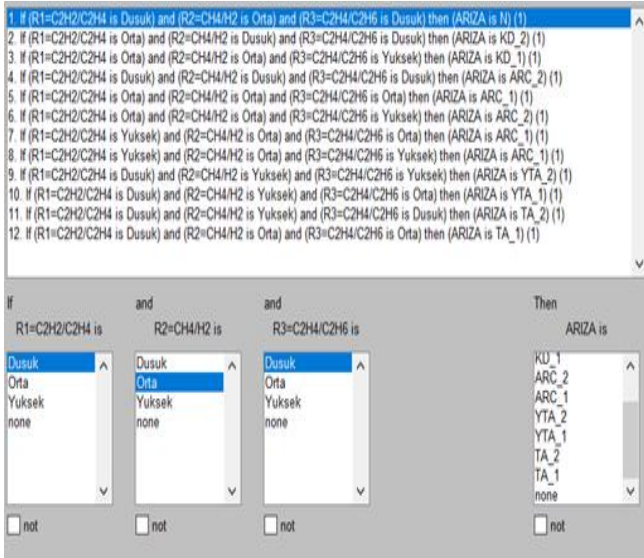
R1	R2	R3	Arıza	Kısaltma
0	0	1	Termik Arıza <150 C	TA_1
0	2	0	Termik Arıza 150C-300	TA_2
0	2	1	Termik Arıza 300C-700	YTA_1
0	2	2	Termik Arıza >700 C	YTA_2
1-2	0	1-2	Düşük Enerjili Ark	ARC_1
0	1	0	Yüksek Enerjili Ark	ARC_2
1	0	2	Düşük Enerjili Korona	KD_1
1	1	0	Yüksek Enerjili Korona	KD_2
0	0	0	Normal (Arıza Yok)	N

Bulanık mantık sisteminde her bir giriş ve çıkış bir üyelik fonksiyonudur. Bu üyelik fonksiyonları kullanılarak kurallar oluşturulur ve çıkışa ulaşılır. Şekil 2'de MATLAB programında oluşturulan bulanık mantık tabanlı IEC oran yönteminin çıkarım sistemi verilmiştir. Bu çıkarım sisteminde üyelik giriş fonksiyonları, Mamdani karar mekanizması ve kural tabanına göre oluşturulan arıza değerlendirme sınıfından oluşturulmuştur.



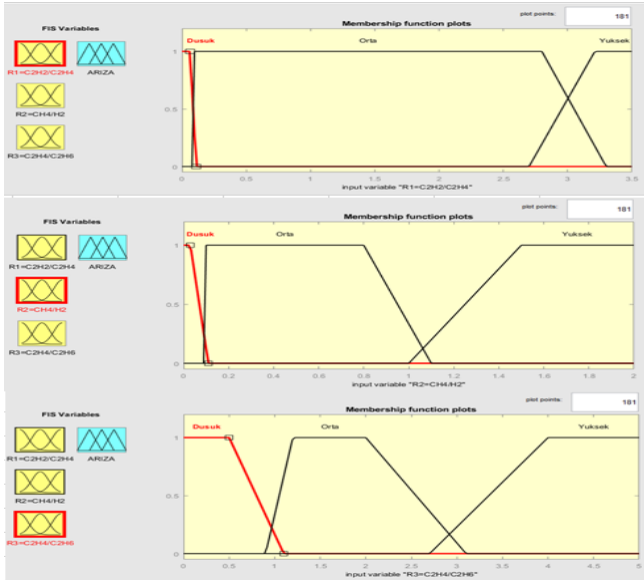
Şekil 2. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine ait çıkarım sisteminin genel görünümü

Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi ile transformatör arızalarını tespit etmek için Tablo 2'de verilen IEC arıza tanımları tablosu kullanılarak MATLAB programında oluşturulan on iki adet bulanık kural tabanı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yönteminde arızaların sınıflandırılması için kullanılan kural tabanı

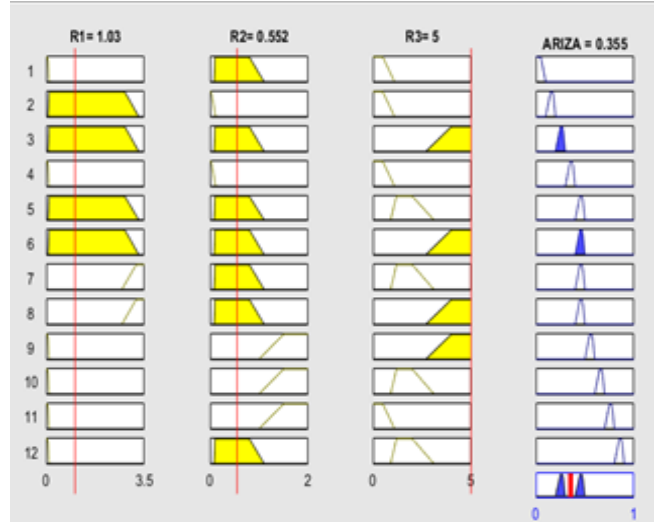
Şekil 4’de MATLAB programında oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Üyelik fonksiyonları Tablo 1’de belirtilen IEC gaz oranlarına karşılık gelen bulanık mantık girişlerine göre oluşturulmuştur.



Şekil 4. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi için oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları

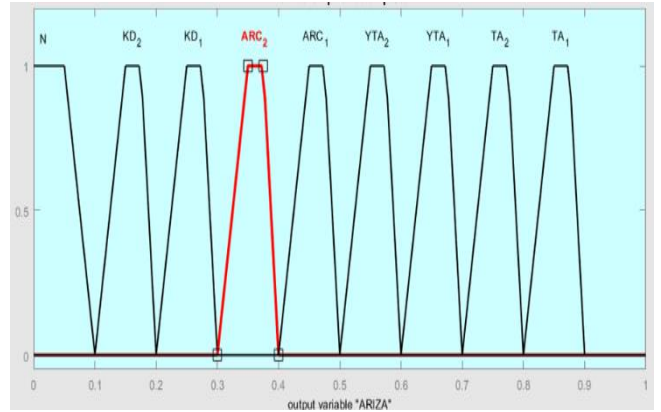
Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine ait oluşturulan modelde Tablo 5’te verilen ve TEİAŞ’tan alınan numune bilgilerinden ikincisi kullanıldığında Şekil 5’deki arıza çıktısı elde edilmiştir.

İkinci numune değerleri: H_2 :636, CH_4 :351, C_2H_4 :782, C_2H_6 :72, C_2H_2 :804, CO :920 ve CO_2 :2297



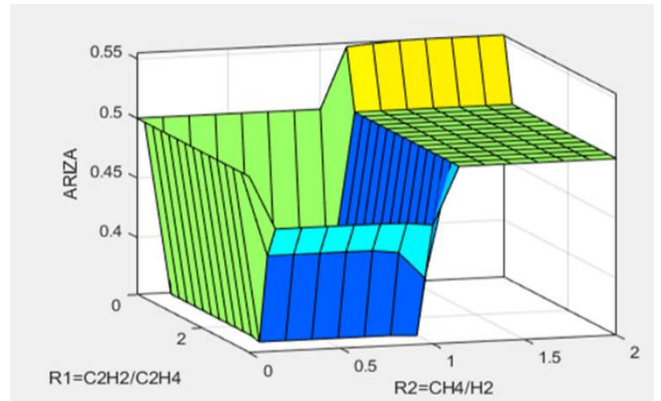
Şekil 5. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine göre 2. numuneye karşılık gelen arıza çıktısı

Tablo 5’te verilen numune değerlerinden ikincisi kullanılarak bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi ile elde edilen arıza değerlendirilme sonucu Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 6. Bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine göre 2. numuneye karşılık gelen arıza (ARC_2)

Şekil 7’de R1,R2 ve R3 gaz oranları arasındaki ilişkiye göre elde edilen arıza çıktısı üç boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. Bulanık mantık tabanlı IEC Oran yönteminde gaz oranları arasındaki ilişkiye göre beklenen arıza bilgisi

Tablo 5'te verilen ikinci numunenin değerleri esas alınır, bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemi kullanılarak arıza değerlendirmesi yapıldığında arızanın türünün doğru olarak belirlendiği verilen sonuçlardan görülmektedir.

Rogers Yöntemi

Bulanık mantık tabanlı Rogers sisteminde her bir giriş ve çıkış bir üyelik fonksiyonudur. Bu üyelik fonksiyonlarından kurallar oluşturularak çıkışta elde edilir. Rogers yönteminde kullanılan 5,0,1 ve 2 giriş kod bilgileri sırasıyla düşük, orta, yüksek ve çok yüksek değerlerine karşılık gelir. Tablo 3'te bu girişlere karşılık gelen dilsel değişkenler verilmiştir [13].

Tablo 3. Rogers oran metodunda gaz oranlarına karşılık gelen bulanık mantık girişleri [16]

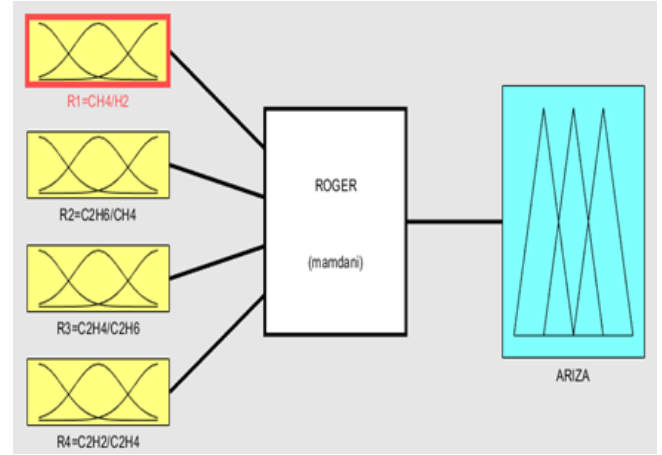
Oran Kodu	Aralık	Kod
R1	$R1 < 0.1$	5 (Düşük)
	$0.1 \leq R1 \leq 1.0$	0 (Orta)
	$1.0 \leq R1 \leq 3.0$	1 (Yüksek)
	$R1 > 3.0$	2 (Çok Yüksek)
R2	$R2 < 1.0$	0 (Düşük)
	$R2 \geq 1.0$	1 (Yüksek)
R3	$R3 < 1.0$	0 (Düşük)
	$1.0 \leq R3 \leq 3.0$	1 (Orta)
	$R3 > 3.0$	2 (Yüksel)
R4	$R4 < 0.1$	0 (Düşük)
	$0.1 \leq R4 \leq 3.0$	1 (Orta)
	$R4 > 3.0$	2 (Yüksek)

Rogers arıza tanımlama tablosu Tablo 4'te verilmiştir [26, 27]. Bu tabloda R1, R2, R3 ve R4 gaz oranlarına karşılık gelen arıza türleri tanımlanmıştır. Örneğin R1=0, R2=1, R3=0 ve R4=0 ise bu durum termik arızaya (TA_3) 200°-300° karşılık gelmektedir.

Tablo 4. Rogers arıza tanımlama tablosu

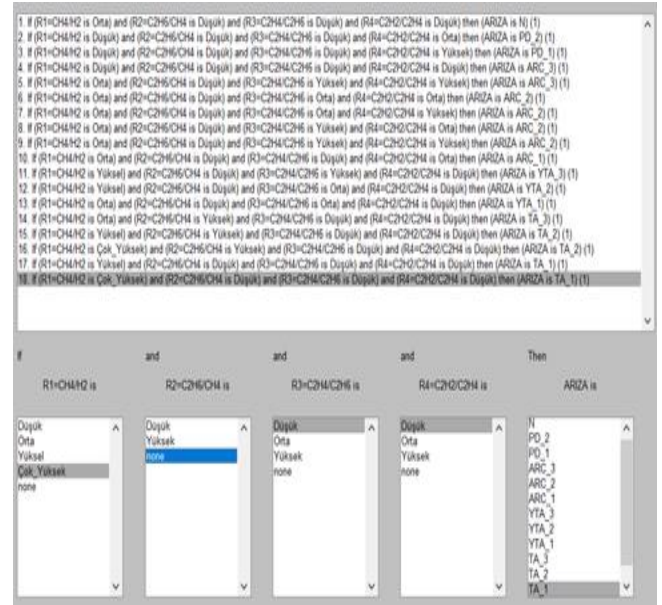
R1	R2	R3	R4	Arıza Tanımı	Arıza Türü
1_2	0	0	0	Termik Arıza <150°C	TA_1
1_2	1	0	0	Termik Arıza 150°-200°	TA_2
0	1	0	0	Termik Arıza 200°-300°	TA_3
0	0	1	0	İletkende aşırı ısınma	YTA_1
1	0	1	0	Sargı sirkülasyon akımları	YTA_2
1	0	2	0	Nüve/Tank sirkülasyon akımları	YTA_3
0	0	0	1	Flaş	ARC_1
0	0	1_2	1_2	Ark	ARC_2
0	0	2	2	Sürekli kıvılcım	ARC_3
5	0	0	0	Kısmi Deşarj	PD_1
5	0	0	1_2	Yüksek Enerjili Deşarjlar	PD_2
0	0	0	0	Normal	Normal

Şekil 8'de MATLAB programında çizilen bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminin genel yapısı verilmiştir.



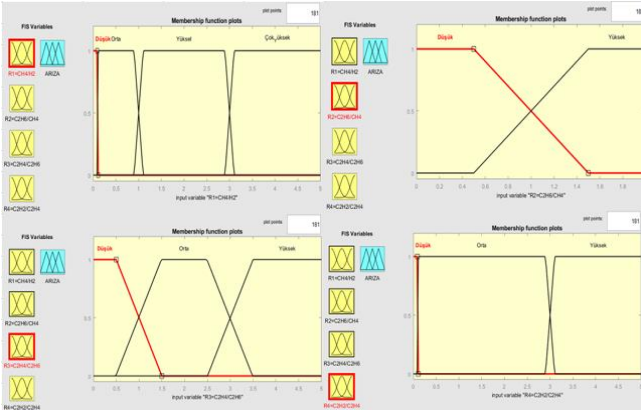
Şekil 8. Bulanık Rogers oran yöntemine ait çıkarım sisteminin genel görünümü

Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi ile arızaların sınıflandırılması için Tablo 4'te verilen Rogers arıza tanımlama tablosu kullanılarak MATLAB programında oluşturulan 18 adet kural tabanı Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi ile arızaların sınıflandırılması için oluşturulan kural tabanı

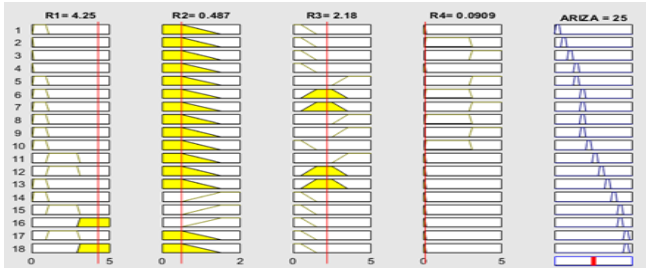
Şekil 10'da MATLAB programında bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi için oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir. Belirtilen üyelik fonksiyonları Tablo 3'te verilen Rogers gaz oranlarına karşılık gelen bulanık mantık girişleri kullanılarak oluşturulmuştur.



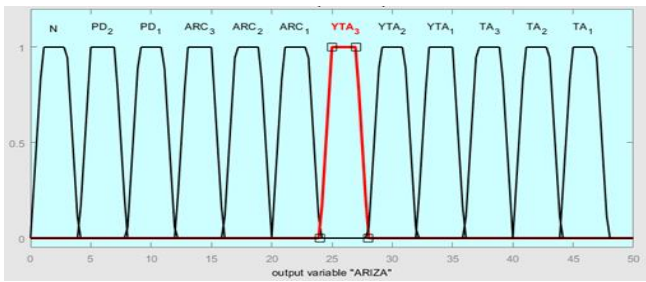
Şekil 10. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi için oluşturulan giriş üyelik fonksiyonları

Şekil 11'deki arıza çıktısına ait grafik Tablo 5'te verilen TEİAŞ'tan alınan numune bilgilerinden beşinci numunenin değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Aynı numune değerleri için bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi ile elde edilen arıza sonuç bilgisi Şekil 12'de gösterilmiştir.

Beşinci numune değerleri: $H_2:44$, $CH_4:187$, $C_2H_4:198$, $C_2H_6:91$, $C_2H_2:18$, $CO:845$ ve $CO_2:6348$

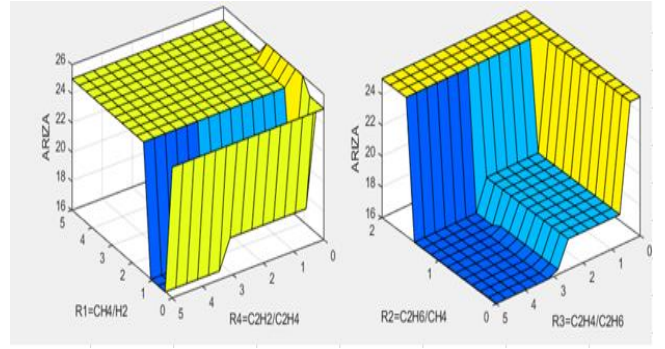


Şekil 11. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemine göre 5. numuneye karşılık gelen arıza çıktısı



Şekil 12. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemine göre 5. numuneye karşılık gelen arıza sonuç bilgisi (YTA_3)

Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminde R1,R2, R3 ve R4 gaz oranları arasındaki ilişkiye göre beklenen arıza bilgisi 3 boyutlu olarak Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminde gaz oranları arasındaki ilişkiye göre beklenen arıza bilgisi

Tablo 5'te verilen beşinci numunenin değerleri esas alınıp, bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemi kullanılarak arıza değerlendirmesi yapıldığında arızanın türünün doğru olarak belirlendiği verilen sonuçlardan görülmektedir.

Araştırma Bulguları

TEİAŞ'tan alınan gerçek bir güç transformatörüne ait gaz numune değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Tablodaki veriler 62.5-250 MVA aralığındaki nominal güçteki transformatlara aittir. Tablo 5'te verilen 1 ve 13 no'lu numunelere ait gaz miktarları IEC 60599 standardına göre limit değerlerinin altında olduğu için her hangi bir metoda tabi tutulmamış ve normal olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5. TEİAŞ'tan alınan numune değerleri

Numune	H_2	$C H_4$	$C_2 H_4$	$C_2 H_6$	$C_2 H_2$	$C O$	$C O_2$	CO_2/CO	Arıza Tipi
1	5	1	1	1	1	64	190	2.97	Normal
2	63	35	78	72	80	92	2297	2.5	Bucholz açma(D2).
3	20	83	22	17	39	19	526	2.66	A faz buşing değişimi sonucunda yüksek enerjili deşarj meydana geldi(D2)
4	70	59	61	27	1	30	1647	5.4	Termik arıza(T3).
5	44	18	19	91	18	84	6348	7.51	Diferansiyel ve bucholz açma (D+T).
6	95	74	17	28	50	11	1825	1.53	Yüksek enerjili deşarj (D2),Termik

									arıza(T1)
7	630	172	157	17	181	1065	3578	3.36	Yüksek enerjili deşarj (D2)
8	2750	402	551	111	906	1095	1234	1.13	Yüksek enerjili deşarj (D2)
9	20	19	43	9	17	974	6113	6.28	D+T deşarjlar ve termik arıza
10	6	350	27	1199	2	147	4098	27.88	Termik arıza(T1).
11	2550	562	1	1	1	49	6827	139.33	Kısmi deşarj
12	3448	555	543	44	147	1235	6768	5.48	Yüksek enerjili deşarj (D+T).
13	5	1	1	1	1	139	452	3.25	Normal
14	107	4	5	1	29	40	488	6.97	Düşük enerjili deşarj (D1)

Tablo 5 incelendiğinde, IEC gaz limit değerlerini aşan gaz konsantrasyon değerleri bulunmaktadır. Tabloya göre limit değerini aşan gazlar olduğu için IEC oran ve Rogers oran değerlendirilmesi yapılabilir. MATLAB programında bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri çalıştırılarak gaz analizi ile arıza değerlendirilmesi de yapılabilir.

Tablo 5'te verilen TEİAŞ'tan alınan numune değerleri kullanılarak MATLAB programında bulanık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleriyle arıza değerlendirilmesi yapıldığında elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Bulanık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri için elde edilen arıza değerlendirme tablosu

Numune	Bulanık Mantık Tabanlı IEC Oran Yöntemi	Bulanık Mantık Tabanlı Rogers Yöntemi
1	N	N
2	ARC_2	ARC_2
3	ARC_2	ARC_2
4	TA_1	YTA_1
5	YTA_1	YTA_3
6	ARC_1/YTA_2	ARC_1/YTA2
7	ARC_2/KD	ARC_2
8	ARC_2/KD	ARC_2
9	ARC_2/KD	ARC_2

10	TA_2	TA_2
11	ARC_1/ARC_2	ARC_1
12	ARC_2/KD	ARC_2_YTA_3
13	N	N
14	ARC_1/YTA2	YTA_3

Benzer şekilde Tablo 5'te TEİAŞ'tan alınan numune değerleri kullanılarak klasik IEC oran ve Rogers oran yöntemleriyle arıza değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu değerlendirmeye göre elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Klasik IEC oran ve Rogers oran yöntemleriyle yapılan arıza değerlendirme tablosu

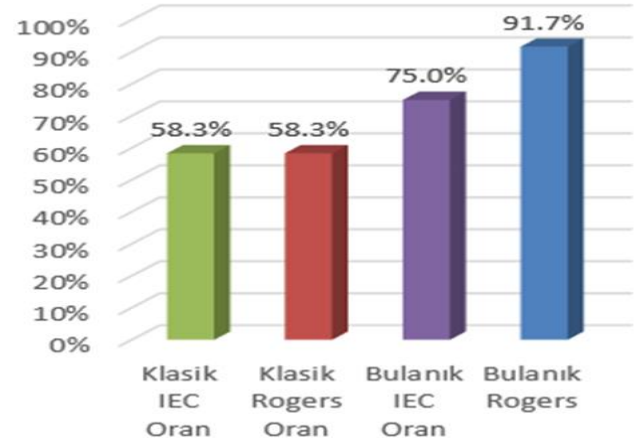
Numune	IEC Oran Yöntemi		Klasik Rogers Oran Yöntemi	
	Arıza Kodu(R1R2R3)	Arıza Türü	Arıza Kodu(R1R2R3R4)	Arıza Türü
1	N	N	N	N
2	102	ARC_2	0021	ARC_2
3	102	ARC_2	0021	ARC_2
4	001	TA_1	0010	YTA_1
5	021	YTA_1	2010	TY
6	112	TY	5021	TY
7	102	ARC_2	0021	ARC_2
8	102	ARC_2	0021	ARC_2
9	102	ARC_2	0021	ARC_2
10	020	TA_2	2100	TA_2
11	100 & 101	TY	0011	ARC_2
12	102	ARC_2	0021	ARC_2
13	N	N	N	N
14	212	TY	0022	ARC_2

Tablo 6 ve Tablo 7'deki veriler ile Tablo 5'te verilen TEİAŞ'tan alınan numune değerlerine ait arıza türü bilgileri birleştirilerek Tablo 8'deki genel durum elde edilmiştir. Burada IEC oran, bulanık mantık tabanlı IEC oran, Rogers oran ve bulanık mantık tabanlı Rogers oran yöntemlerinin sonuçları, gerçek arıza türüyle karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo 8. Kullanılan yöntemlere göre elde edilen arıza analiz tablosu

Arıza No	IEC Oran Yöntemi	Bulanık Mantık Tabanlı IEC Oran Yöntemi	Rogers Oran Yöntemi	Bulanık Mantık Tabanlı Rogers Oran Yöntemi	Gerçek Arıza Değerleri
1	N	N	N	N	N
2	D2	D2	D2	D2	D2
3	D2	D2	D2	D2	D2
4	T1	T1	T1	T3	T3
5	T2	T2	TY	T3	D+T
6	TY	D1+T3	TY	D1(T3)	D2+T1
7	D2	D2	D2	D2	D2
8	D2	D2	D2	D2	D2
9	D2	D2	D2	D2	D+T
10	T1	T1	T1	T1	T1
11	TY	D1+D2	D2	D1	KD
12	D2	D2	D2	D2(T3)	D+T
13	N	N	N	N	N
14	TY	D1+T2	D2	T3	D1

Tablo 8’de görüldüğü gibi IEC oran metodu ile 12 numuneden 9 numunenin sonucu belirlenmiş ve üç numunenin sonucu tespit edilememiştir(TY). Sonucu belirlenen 9 numunenin sadece 7 tanesinin sonucu doğru bulunmuştur. Bulanık mantık tabanlı IEC yöntemiyle yapılan analizde 12 numunenin tamamının sonucu bulunmuştur. Sonucu bulunan 12 numunenin 9 tanesinin sonucu doğru bulunmuştur. Burada bulanık mantık tabanlı IEC metodunun klasik IEC oran metoduna göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Klasik Rogers oran metoduyla yapılan analizde 12 numuneden 10 tanesinin sonucu bulunmuş, iki tane numunenin sonucu tespit edilememiştir. Bulunan 10 numunenin 7 tanesinin değerlendirme sonucu doğru bulunmuştur. Bulanık mantık tabanlı Rogers oran metoduyla yapılan analizde 12 numunenin tamamının sonucu bulunmuştur. Değerlendirilmesi yapılan 12 numunenin 11 tanesinin sonucu doğru bulunmuştur. Şekil 14’de farklı yöntemlere göre yapılan transformatör arızalarının tespit edilme oranları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 14. Kullanılan yöntemlere göre arızaların doğru tespit edilme oranları

Şekil 14’den de görüldüğü gibi bulanık mantık tabanlı Rogers oran metodunda %91.67, klasik Rogers oran metodunda %72.7 başarı elde edilmiş ve bulanık mantık tabanlı Rogers oran metodunun daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bulanık mantık yöntemleri ile yapılan analizlerin, klasik yöntemlerle yapılanlara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yine bu çalışmada bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminin diğer yöntemlere göre daha doğru analiz yaparak transformatörlerde gerçek arızaları daha yüksek doğruluk oranında tespit ettiği belirlenmiştir. Bu durum akıllı yöntemlerin klasik yöntemlere göre arıza analizindeki önemini ortaya koyar.

Sonuçlar

Güç transformatörlerinde meydana gelebilecek arızaların önceden tespit edilmesi, sistemin ve teçhizatın korunmasını sağlar. Arızaların önceden belirlenmesi ile enerji kesintilerinin önüne geçilir ve böylelikle enerjinin devamlılığı sağlanarak finansal kayıplar önlenir. İzolasyon için kullanılan transformatör yağında, arıza veya arızalar sonucunda bazı gazlar oluşur. Yağda çözülmüş gaz analizi ile arızaların tespiti yapılarak daha arızanın başlangıç aşamasında arızaya müdahale edilebilme imkânı doğar. Bu nedenle bu çalışmada, güç transformatörlerinde meydana gelen arızalar sonucunda izolasyon yağında ortaya çıkan ve yağda çözünebilen gazların konsantrasyon değerlerini kullanarak yağda çözülmüş gaz analizi ile arıza değerlendirilmesi yapılmıştır. Arıza sonucu oluşan gazların limit değerleri hesaba katılarak arıza değerlendirmesi yapılmıştır. Değerlendirmeler dört farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır. DGA’nın klasik metodlarından IEC Oran ve Rogers oran metodlarının arızaların belirlenmesindeki kısıtlamaları nedeniyle doğru analiz güvenilirliğini arttırmak için akıllı yöntemlerden olan bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemleri de kullanılmıştır. Bulanık mantık tabanlı IEC oran ve Rogers oran yöntemlerinin klasik yöntemlere göre daha yüksek doğrulukta arıza analizi yaptığı görülmüştür. Yine bu çalışmada bulanık mantık tabanlı Rogers oran yönteminin güç transformatör arızalarını bulanık mantık tabanlı IEC oran yöntemine göre daha iyi tespit ettiği görülmüştür.

Kaynakça

- [1] Afiqah, R. N., Musirin, I., Johari, D., Othman, M. M., Rahman, T. K. A., & Othman, Z. (2010). Fuzzy logic application in DGA methods to classify fault type in power transformer. In International Conference on Electric Power Systems, High voltages, Electric machines, *International conference on Remote sensing–Proceedings* (pp. 83-88)
- [2] Ahmed, M. R., Geliel, M. A., & Khalil, A. (2013, June). Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. In *21st Mediterranean Conference on Control and Automation* (pp. 584-589). IEEE.
- [3] Jha, M. K., Barle, N., & Trivedi, R. (2010). Application of artificial intelligence techniques for dissolved gas analysis of transformers-A review. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 12, 244-251.
- [4] Lakehal, A., Ghemari, Z., & Saad, S. (2015, April). Transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis technology and Bayesian networks. In *2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 194-198). IEEE.
- [5] Su, Q., Mi, C., Lai, L. L., & Austin, P. (2000). A fuzzy dissolved gas analysis method for the diagnosis of multiple incipient faults in a transformer. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15 Issue 2, 593-598.
- [6] Atalar, F., & Kuntman, A. Bulanık Mantık Yöntemi Kullanılarak Güç Transformatörleri Arızalarının Belirlenmesi Diagnosis of Power Transformers Faults using Fuzzy Logic Method, https://www.emo.org.tr/ekler/b7f07f081e2e0f6_ek.pdf, Erişim:28 Ocak 2024.
- [7] Abdullayev, İ. (2021). *Güç transformatörlerinin güvenilirliğinin artırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [8] Khan, S. A., Equbal, M. D., & Islam, T. (2015). A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.22 Issue 1, 590-596.
- [9] Ramesh, K., & Sushama, M. (2014, November). Inter-turn fault detection in power transformer using fuzzy logic. In *2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)* (pp. 1-5). IEEE.
- [10] Aziz, A. A., Ali, A. A., & Abbas, A. H. (2009). Power Transformer Protection by Using Fuzzy Logic. *Iraqi Journal for Electrical & Electronic Engineering*, Vol.5 Issue 1.
- [11] Köroğlu, S., Demirçalı, A., Yıldız, M., Çalı, M. E., & Mihci, G. (2014) Güç Transformatörleri Arızalarının Yağda Çözünmüş Gaz Analiziyle Tanınması, *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa.
- [12] Genc, S., & Karagol, S. (2020, June). Fuzzy logic application in DGA methods to classify fault type in power transformer. In *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (pp. 1-4). IEEE.
- [13] Abu-Siada, A., Hmood, S., & Islam, S. (2013). A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20 Issue 6, 2343-2349.
- [14] K. Alawode, K. O., & Olowolafe, F. (2023). Fuzzy Logic and Decision Tree Models for Dissolved Gas Analysis in Power Transformer Fault Diagnosis. *Adeleke University Journal of Engineering and Technology*, Vol. 6 Issue 1, 56-63.
- [16] Apte, S., Somalwar, R., & Wajirabadkar, A. (2018, December). Incipient fault diagnosis of transformer by DGA using fuzzy logic. In *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-5. IEEE.
- [16] Dhote, N. K., & Helonde, J. B. (2014). Improvement in transformer diagnosis by DGA using fuzzy logic. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol.9 Issue 2, 615-621.
- [17] Hussein, A. R., Dakhil, A. M., Rashed, J. R., & Othman, M. F. (2022). Intelligent expert system for diagnosing faults and assessing quality of power transformer insulation oil by DGA method. *Misan Journal of Engineering Sciences*, Vol.1 Issue 1, 47-57.
- [18] Nemeth, B., Laboncz, S., & Kiss, I. (2009, May). Condition monitoring of power transformers using DGA and fuzzy logic. In *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, pp. 373-376. IEEE.
- [19] Taha, I. B., Ghoneim, S. S., & Zaini, H. G. (2016). A fuzzy diagnostic system for incipient transformer faults based on DGA of the insulating transformer oils. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 11 Issue 3, 305-313.
- [20] Permana, S., Sumarto, S., & Saputra, W. S. (2018, July). Analysis of transformer conditions using triangle duval method. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 384, No. 1, p. 012065. IOP Publishing.
- [21] Poonnoy, N., Suwanasri, C., & Suwanasri, T. (2020). Fuzzy logic approach to dissolved gas analysis for power transformer failure index and fault identification. *Energies*, Vol.14 Issue 1, 36.
- [22] Wani, S. A., Gupta, D., Farooque, M. U., & Khan, S. A. (2019). Multiple incipient fault classification approach for enhancing the accuracy of dissolved gas analysis (DGA). *IET Science, Measurement & Technology*, Vol.13 Issue 7, 959-967.
- [23] Akkaptan, A. (2012). *Hayvancılıkta Bulanık Mantık Tabanlı Karar Destek Sistemi*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.



Geleneksel Makine Öğrenmesi Yöntemleri ve Metasezgisel Yöntemlerle Öznitelik Seçim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Comparison of Traditional Machine Learning Methods and Metaheuristic Methods for Attribute Selection

İsmail AÇAR^{1*}, İbrahim Berkan AYDİLEK²

¹ Harran Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ismailacr63@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9888-7429>

² Harran Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, berkanaydilek@harran.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8037-8625>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Mart 2024
Revizyon 24 Nisan 2024
Kabul 17 Mayıs 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Öznitelik Seçimi,
Metasezgisel algoritmalar,
Makine öğrenmesi,
Genetik algoritmalar,
Parçacık sürü optimizasyon
algoritması

ÖZ

Öznitelik seçim yöntemleri, makine öğrenmesi için çok önemli bir yere sahiptir. Veri kümesinin boyutu arttıkça makine öğrenmesi modelinin performansı düşmektedir. Öznitelik seçim yöntemi aynı zamanda bir optimizasyon süreci olarak düşünülebilmektedir. Gürültülü olan ya da model için alakasız olan öznitelikler elenince başarı artabilmektedir. Bu çalışma kapsamında UCI veri deposundan 3 farklı veri kümesi kullanılmış ve 5 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılarak 10 katlı çapraz doğrulama yöntemiyle algoritmaların başarımları ve çalışma süreleri ölçülmüştür. Öznitelik seçim yöntemi olarak geleneksel makine öğrenmesi ile öznitelik seçim yöntemleri ve meta sezgisel algoritmalar kullanılarak öznitelik seçim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan öznitelik seçim yöntemleri şu şekildedir; Korelasyon Analizi, Lasso, Hipotez testi ve metasezgisel algoritmalar Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda öznitelik seçim yöntemlerinin uygulanması ile birlikte başarımın arttığı görülmektedir. Çalışma süreleri bakımından algoritmalar karşılaştırıldığında en hızlı algoritmanın Karar ağacı algoritması ve en yavaş çalışan algoritmanın Gradyan Artırma Makineleri (GBM) algoritması olduğu gözlemlenmiştir. Başarım oranına göre değerlendirildiğinde Hafif Gradyan Artırma Makineleri (LighGBM) algoritmasının daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Metasezgisel algoritmalarla yapılan öznitelik seçiminin başarım ve çalışma süresi bakımından daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 March 2024
Received in revised form 24 April 2024
Accepted 17 May 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Feature selection,
Metaheuristic Algorithms,
Machine Learning,
Genetic Algorithms,
Particle Swarm Optimization
Algorithm

ABSTRACT

Feature selection methods are very important for machine learning. As the size of the dataset increases, the performance of the machine learning model may decrease. The feature selection method can also be considered as an optimization process. Success can be improved by eliminating noisy or irrelevant attributes for the model. In this study, 3 different datasets from the UCI repository were used and 5 different machine learning algorithms were used to measure the performance and runtime of the algorithms using 10-fold cross-validation. As feature selection methods, traditional machine learning feature selection methods and meta-heuristic algorithms were used for feature selection. The feature selection methods used are as follows; Correlation Analysis, Lasso, Hypothesis testing and Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization metaheuristic algorithms. As a result of the experiments, it is seen that the performance increases with the application of feature selection methods. When the algorithms are compared in terms of running times, it is observed that the fastest algorithm is the Decision tree algorithm and the slowest algorithm is the Gradient Boosting Machines (GBM) algorithm. When evaluated according to the success rate, it was observed that the Lightweight Gradient Boosting Machines (LighGBM) algorithm gave more successful results. It was observed that feature selection with metaheuristic algorithms is more suitable in terms of performance and runtime.

Doi: 10.24012/dumf.1451945

* Sorumlu Yazar

Giriş

Veri kümelerinde boyut sayısı arttıkça eldeki makinelerin işlem yükü artmakta bununla birlikte işlem hızı azalmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemlerinde bazen eldeki veri kümesinde çok sayıda öznitelik durumu ile karşı karşıya kalılabilmektedir. Öznitelik seçiminin yapılması makine öğrenmesi algoritmalarının performansı üzerinde doğrudan olumlu sonuçlar doğurabilmektedir. Öznitelik seçim yöntemleri bir optimizasyon süreci olarak düşünülebilir. Model için uygun özniteliklerin seçimi, gereksiz özniteliklerin ortadan kaldırılması algoritmanın başarı oranını artırabilmektedir. Gereksiz olan öznitelikler veri kümesinden atıldığında makine öğrenmesi modellerinde aşırı öğrenme probleminin önüne geçilebilir ve böylelikle daha genellebilir sonuçlar ortaya çıkmış olur [1].

Bununla birlikte aşırı öğrenme problemleriyle karşılaşılan modellerde öznitelik seçim yöntemlerinin uygulanması sonucunda modellerin performanslarında iyileşme olduğu görülmüştür [2].

Bu çalışmada geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri ve doğadaki davranışlardan esinlenilerek yapılmış algoritmalar olan metasezgisel algoritmaları ile öznitelik seçim yöntemleri üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri ile 3 farklı öznitelik seçim yöntemi, metasezgisel algoritmalar ile öznitelik seçimi için 2 farklı algoritma kullanılmıştır. Öznitelik seçim yöntemleri UCI veri deposundan temin edilen 3 farklı veri kümesi üzerinde uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. 3 farklı veri kümesinin kullanılmasının amacı; kullanılan öznitelik seçim yöntemlerinin genel etkisi ve diğer öznitelik seçim yöntemlerine göre başarı durumunu gözlemleyebilmektir.

Makalenin organizasyonu şu şekilde yapılmıştır;

Birinci bölümde, metasezgisel algoritmalar ve geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak yapılmış öznitelik seçim yöntemleri ile ilgili çalışmalar incelenerek ilgili yöntemlerin başarılı yönleri gözlemlenmiştir. İkinci bölümde, çalışma kapsamında kullanılan beş farklı öznitelik seçim yöntemleri ve kullanılan beş farklı makine öğrenmesi sınıflandırma yöntemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde kullanılan veri kümeleri hakkında bilgi verilerek , veri kümeleri üzerinde beş farklı öznitelik seçim yöntemi uygulanarak öznitelik sayısı indirgenmiş daha sonra beş makine öğrenmesi sınıflandırma yöntemi 10 katlı çapraz doğrulama kullanılarak deneyler yapılmış, çalışma süreleri ve 10 katlı çapraz doğruluk başarımları tablolarda gösterilmiş ve metasezgisel yöntemler ile geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinin öznitelik seçim yönündeki başarımları 3 farklı grafikte gösterilmiştir. Dördüncü bölümde ise öznitelik seçim yöntemlerinin öneminden ve

ilgili çalışmanın genel olarak başarılı ve başarısız yönleri ele alınmıştır.

İlgili Çalışmalar

Literatürde öznitelik seçim yöntemleri yaygın kullanılan bir yöntemdir. Öznitelik seçim yöntemi, ilk defa 1970'li yılların başlarında kullanılmaya başlanmıştır. Öncelikli olarak istatistiksel modelleme ve desen tanıma problemlerinde kullanılmıştır. Bu dönemde öznitelik seçimiyle ilgili bir takım erken çalışmalar bulunuyordu, "Entropi Kavramının Örüntü Tanımda Kullanımı" adlı çalışma bu konuda yapılmış ilk çalışmadır. Bu çalışmayla birlikte öznitelik seçim yöntemlerinin gelişim ve yaygınlığı zamanla daha da artmış ve gittikçe karmaşıklaşmıştır. Öznitelik seçim yöntemleri makine öğrenmesi için çokça başvurulan bir konu olarak ele alınmaktadır [3].

Ele alınan konu ile ilgili literatürde yer alan belli başlı çalışmalar incelenmiş ve kısaca bahsedilmiştir.

Öznitelik Seçimi Problemleri İçin İkili Beyaz Köpekbalığı Optimizasyon Algoritması adlı çalışmada öznitelik seçim problemi için beyaz köpek balığı optimizasyon algoritmasını ele almıştır. Bu meta sezgisel algoritma öznitelik seçimi için başarılı sonuçlar vermektedir. (Beyaz Köpek Balığı Optimizasyon Algoritmasında S, V ve U şekilli transfer fonksiyonlarının ikili forma dönüştürülmesi sonucunda öznitelik seçimi kullanılmıştır) [4].

Genetik Algoritma ile Özellik Seçimi Kullanılarak Makine Öğrenimi Algoritması ile Kalp Hastalığı Tahmini adlı çalışmada kalp veri kümesi üzerinde 7 farklı algoritma kullanılarak 3 deney yapılmıştır. 3 grup deneyler sonucunda toplamda 28 deney gerçekleştirilmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde en başarılı sonucun Genetik Algoritma ile %93.44 başarımlarının elde edildiği görülmüştür. Çalışma kapsamında Genetik Algoritma ve Makine Öğrenmesi yöntemleri kullanılarak öznitelik seçim yöntemleri yapıldığında kalp hastalığının daha başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmüştür [5].

Öğretmenlerde Etkili Psikososyal Risk Düzeylerinin Belirlenmesi için Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Öznitelik Seçme adlı çalışmada Kolombiyadaki devlet okullarında görev yapan öğretmenlerden toplanmış veriler kullanılmıştır. Veri kümesi 123 psikososyal öznitelikten ve 4 sınıftan oluşmaktadır. Bu çalışmada parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılarak öznitelik seçimi yapılmış ve 5 katlı doğrulama yöntemi ile karar ağacı, destek vektör makineleri , k-en yakın komşu , yapay sinir ağı sınıflandırıcıları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde destek vektör makinelerinin %99.9 başarımları ile diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [6].

Ağırlıklandırılmış, Koşullu Karşılıklı Bilgi İle Öznitelik Seçimi adlı çalışmada öznitelik seçiminde daha etkin bir yöntem önerisi yapılmıştır. Önerilen yöntemde, sezgisel bir fonksiyon kullanılarak özniteliklerin seçimi üzerindeki fazlalık etkisi, hem sınıfla olan hem de diğer özniteliklerle olan karşılıklı bilgi ilişkileri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Böylelikle, her problem için dinamik bir çözüm sunarak öznitelik seçiminde daha başarılı sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır [7].

Yüz İfadesi Tanıma için Mesafe Oranlarına Dayalı Öznitelik Çıkarımı ve Genetik Algoritmalar ile Seçimi adlı çalışmada 4 erkek ve 3 kadın katılımcıdan toplanan görüntüler ile yüz işaretçileri arasındaki mesafe oranları baz alınarak öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Öznitelik çıkarımı sonucunda 120 tane öznitelik elde edilmiştir. Daha sonra 4 farklı öznitelik seçimi yöntemi ile öznitelik sayısı azaltılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Genetik algoritmanın öznitelik seçiminde diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte sınıflandırıcı olarak rastgele orman algoritması kullanılmıştır [8].

EEG Sinyallerinin Sınıflandırılmasında Evrimsel Öznitelik Seçim Metotlarının Kullanılması çalışmasında Ayrık Dalgacık dönüşümü ve Bir Boyutlu Yerel İkili Örüntü yöntemleri kullanılarak öznitelik çıkarımı ve differansiyel evrim tabanlı yöntemi ile öznitelik seçimi yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde başarı oranlarının literatürdeki çalışmalara göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir [9].

Siber Saldırıları için Rastgele Orman Algoritması Kullanılarak Öznitelik Seçimi çalışmasında Dört farklı öznitelik seçimi yöntemi kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Öznitelik sayıları 13, 6, 5 ve 4 yapılarak deneyler yapılmıştır. Rastgele Orman algoritması sınıflandırıcısı kullanılarak 4 öznitelik ile %97.24 başarı oranı ile diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Böylece öznitelik sayısının azalması ile birlikte çalışma süresinin azaldığı görülmüştür [10].

Filtre Tabanlı Öznitelik Seçim Yöntemleri Kullanılarak Metinlerde Duygu Sınıflandırması Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma adlı çalışmada duygu sınıflandırma problemi için filtre tabanlı öznitelik seçim yöntemleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında 9 veri kümesi, 6 öznitelik seçim yöntemi ve 3 sınıflandırma algoritması kullanılarak 4 farklı değerlendirme metriği ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en başarılı sonucun Naive Bayes Algoritması kullanılarak ortalama %94.34 doğruluk oranına ulaştığı gözlemlenmiştir [11].

Rüzgâr Gücü Tahmininde Genetik Algoritma ile Öznitelik Seçimi adlı çalışmada SCADA programı ile elde edilen veri kümesi ile NASA'nın meteorolojik veri kümesi kullanılarak rüzgâr gücü tahmini yapılmıştır. Çalışma kapsamında 5 makine öğrenmesi algoritması kullanılarak 3 farklı

değerlendirme metriği ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Genetik algoritma ile öznitelik seçimi yapılarak öznitelik sayısı 47'den 9'a azaltılarak modelin başarımı artırılmıştır. R2 metriği kullanılarak 0.98 doğruluk oranına ulaşılmıştır [12].

Parkinson Hastalarının Tespitinde Karınca Koloni Algoritması ile Seçilen Özniteliklerin Performansa Etkisi adlı çalışmada Parkinson hastalarına ait ses verileri kullanılarak öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Daha sonra gereksiz olan öznitelikleri tespit etmek için karınca koloni algoritması kullanılarak öznitelik sayısı azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde seçilen özniteliklerin hastalık tespitinde oldukça önemli olduğu görülmüştür [13].

Salp Sürü Algoritması ile Öznitelik Seçimi ve Sınıflandırıcı Performans Değerlendirmesi adlı çalışmada 3 veri kümesi ve 3 sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada 3 veri kümesi üzerinde salp sürü algoritması ile öznitelik seçimi yapılarak sınıflandırma algoritmaları ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modellerin başarımlarını ölçmek için 7 farklı değerlendirme metriği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında çalıştırma süresi bakımından k-en yakın komşu algoritmasının diğer algoritmalara göre daha hızlı çalıştığı gözlemlenmiştir. Seçilen özniteliklerin sayılarına göre destek vektör makineleri ve rastgele orman algoritmasının daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [14].

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada Öznitelik seçim yöntemleri için geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinden Korelasyon Analizi, Hipotez testi ve Lasso yöntemleri kullanılmıştır. Meta sezgisel algoritmalarla öznitelik seçimi için Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Seçilen özniteliklerin sınıflandırma başarımı için Karar Ağacı, Rastgele Orman, Gradyan Artırma Makineleri (GBM), Hafif Gradyan Artırma Makineleri (LightGBM) ve Aşırı Gradyan Artırma Makineleri (XGBoost) algoritmaları kullanılmış ve 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile model başarısı ölçülmüştür. Kullanılan yöntemler alt başlıklarda açıklanmıştır.

Öznitelik seçimi Yöntemleri

Çalışma kapsamında 5 farklı öznitelik seçim yöntemi kullanılmıştır.

Korelasyon Analizi:

Korelasyon analizi -1 ile 1 arasında değerler alır. +1 değerine doğru yaklaştıkça pozitif yönlü ilişki artarken, -1 değerine doğru yaklaştıkça negatif yönlü ilişki artmaktadır. Korelasyon iki değişken arasındaki ilişkiyi ifade eder. Öznitelik seçimi yöntemi için sıkça kullanılan bir yöntemdir [15].

Hipotez Testi:

Hipotez testi oluşturulurken özniteliklerin katsayılarına yönelik anlamlılık değerleri belirlenir. Anlamlılık değeri istatistikte p ile ifade edilir, genellikle 0.01 ve 0.05 seçilir. P değeri belirlenmiş olan anlamlılık değerinden düşük olursa öznitelik model için istatistiksel olarak anlamlıdır ve modelde tutulabilirken büyük olduğu durumda istatistiksel olarak anlamsız ve modelden çıkartılır [16].

Lasso Yöntemi

Lasso yöntemi katsayılara ceza terimi uygulayarak katsayıları sıfıra kadar indirgemiş olur. Lasso yöntemi katsayıları sıfıra indirgemesi sayesinde hem aşırı öğrenme problemlerinin önleme hem de öznitelik seçim işlemleri için oldukça kullanışlı bir yöntemdir [17].

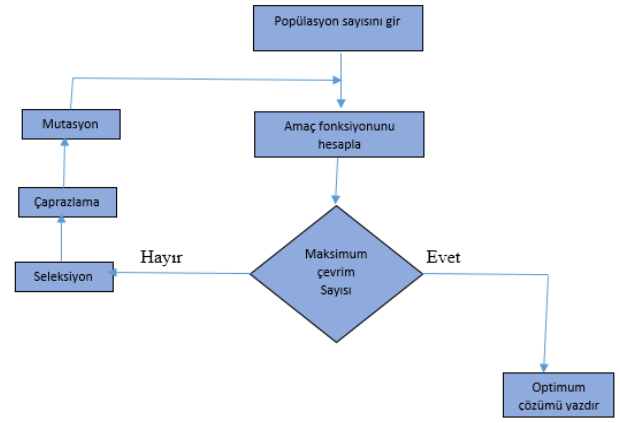
Genetik Algoritma

Genetik algoritma Darwin'in doğal seçim yönteminden esinlenilerek geliştirilmiş optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem 1975 yılında John Holland tarafından ortaya atılmıştır [18].

Genetik algoritma doğada en iyinin hayatta kalarak yeni nesiller oluşmasına, güçsüz olan bireylerin elenmesi prensibine dayanmaktadır. Genetik algoritma öznitelik seçim yönteminde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

Genetik algoritmada öncelikli olarak parametre kodlaması işlemi gerçekleştirilir. Parametre kodlamasında eldeki veriler bilgisayarın anlayabileceği şekilde kodlanır. Sıklıkla kullanılan parametre kodlaması binary kodlaması, permütasyon kodlama, değer kodlama ve ağaç kodlama yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanılan yöntem mevcut probleme göre belirlenir. İkinci adımda başlangıç popülasyonu da belirlenerek başlangıç popülasyonu sayısı probleme göre şekillendirilir. Başlangıç popülasyonu çok büyük veya az büyük seçilmemeli, ikisi arasında optimum sayı belirlenmelidir. Üçüncü aşamada uygunluk değeri hesaplanır. Burada her bir çözümün ne kadar iyi olduğu hesaplanır. Dördüncü aşamada kromozom seçimi işlemi gerçekleştirilir. Kromozom seçimi için rulet tekeri, sıralı seçim, sabit durum ve turnuva yöntemi seçimleri kullanılabilir. Hangi yöntemin daha iyi olduğu probleme göre değişmektedir. Beşinci adımda çaprazlama ve mutasyon yöntemleri uygulanır. Çaprazlama işleminde ebeveynlerin genleri karşılıklı değiştirilir böylelikle anne ve babalarından daha farklı bireyler meydana gelmiş olur. Çaprazlama için; tek noktalı, çift noktalı, uniform ve aritmetik gen takası yöntemleri bulunmaktadır. Mutasyon işlemini nesillerdeki kromozom çeşitliliğini artırmak için kullanılmakta böylelikle farklı kromozom yapısına sahip bireyler meydana gelmiş olmaktadır. Son aşamada durdurma kriteri sağlanıyorsa algoritma durdurulur [19].

Genetik Algoritmanın akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Genetik Algoritma akış şeması

Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması:

Parçacık sürü optimizasyon algoritması doğada birlikte hareket eden kuş ve balık sürülerinin yiyecek arama ve dış tehlikelere karşı kenetlenmelerinden esinlenilerek 1995 yılında James Kennedy ve Russell Eberhart tarafından geliştirilmiş bir meta sezgisel algoritmadır [20].

Parçacık sürü optimizasyon algoritmasında her bir parçacık bir kuşu veya balığı temsil eder. Parçacıklar rastgele değerle başlatılır ve hız ve konum değerleri güncellenir. Tüm parçacıkların en iyi çözümü genel en iyi, parçacığın en iyi çözümü kişisel en iyi olarak ifade edilir. Parçacık sürü optimizasyon algoritmasında parametre sayısı az olduğu için oldukça kullanışlı bir yöntemdir [21].

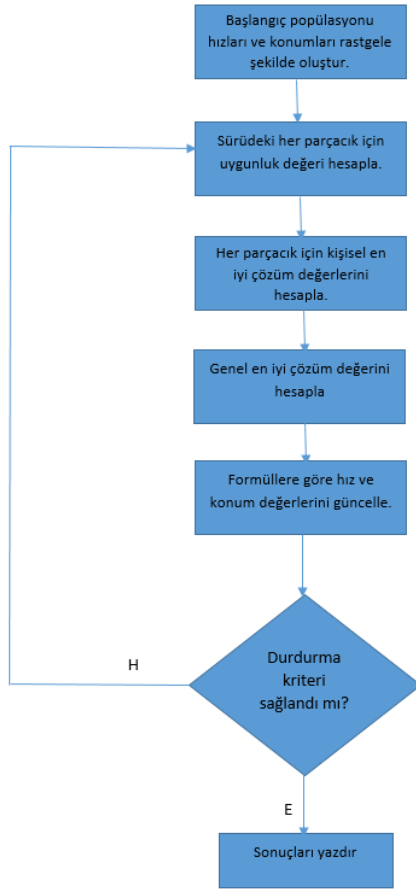
Parçacık sürü optimizasyon algoritmasının denklemleri (1) ve (2)'de verilmiştir.

$$vi(t + 1) = w.vi(t) + c1.r1.(Pbest - xi(t)) + c2.r2.(Gbest - xi(t)) \quad (1)$$

$$xi(t + 1) = xi(t) + vi(t + 1) \quad (2)$$

Pbest kişisel en iyi çözümü ve Gbest genel en iyi çözümü ifade ederken, v hızı, w atalet ağırlığını, x konumu, c1 ve c2 pozitif ivme sabitlerini, r1 ve r2 ise 0 ile 1 arasında rastgele sayısal değerleri ifade etmektedir.

Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmasının akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması Akış Şeması

Sınıflandırma Yöntemleri:

Çalışma kapsamında 5 farklı sınıflandırma algoritması kullanılmıştır.

Karar Ağacı

Karar ağaçları, sınıflandırma ve regresyon problemleri için sıklıkla kullanılan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Karar ağaçlarında kökten, dal ve yapraklara doğru hiyerarşik olarak bölünme prensibi temel alınır. Karar Ağaçlarında hangi öznelikten itibaren bölüneceğine bilgi kazancı ve gini gibi yöntemler kullanılarak karar verilir [22].

Karar Ağaçları algoritması eğitimi hızlı, ayrıca uzaklık temelli bir algoritma olmadığı için normalizasyon işlemine gerek duyulmaz. Öte yandan bu yöntemlerde aşırı öğrenme problemi ile sıkça karşılaşmaktadır. Bunun önüne geçilmek için çok sayıda ağaçtan oluşan topluluk öğrenme yöntemleri geliştirilmiştir.

Rastgele Orman

Rastgele orman algoritması, birden fazla karar ağacının bir araya gelerek toplu bir şekilde öğrenme yöntemine dayanan bir sınıflandırma ve regresyon algoritmasıdır. Karar ağaçları algoritmasında aşırı öğrenme problemi ile sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu algoritma, aşırı öğrenme problemine

bir çözüm olarak ortaya atılmış bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. [23]

Rastgele orman algoritması topluluk öğrenme yöntemlerinden biridir. Rastgele orman, karar ağaçları algoritmasının aşırı öğrenme problemi önüne geçilmesi için geliştirilmiştir. Öte yandan bu yöntemde hiperparametre sayısı çok sayıda olduğu için modelin ayarlanması zorlaşabilmektedir. Çalışma süresi bakımından incelendiğinde karar ağaçlarına göre daha yavaş çalıştığı gözlemlenmektedir.

Gradyan Artırma Makineleri (GBM)

Gradyan Artırma Makineleri, zayıf sınıflandırıcıları baz alarak geliştirilmiş bir gradyan artırma algoritmasıdır. Zayıf sınıflandırıcıları bir araya getirerek güçlü sınıflandırıcılar oluşturma esasına dayanan bir yöntemdir [24].

GBM algoritması, zayıf sınıflandırıcıların hatalardan ders çıkararak güçlü sınıflandırıcılar oluşturması fikrine dayalı çalıştığından başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca topluluk öğrenme yöntemine dayalı olduğu için aşırı öğrenme problemine karşı güçlü olduğu gözlemlenmektedir. Öte yandan model eğitim süreci çok uzun sürmektedir.

Hafif Gradyan Artırma Makineleri (LightGBM)

LightGBM algoritması, GBM algoritmasının hız ve tahmin performansını iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş bir algoritmadır. Yüksek işlem hızı, Gpu desteği ve büyük veri kümelerini işleyebilme yeteneği sayesinde oldukça kullanışlı bir yöntemdir [25].

Lightgbm algoritması, diğer algoritmalara göre daha hızlı tahminler üretmekte, aşırı öğrenme problemine karşı güçlü olduğu gözlemlenmektedir. Öte yandan hiperparametre sayısının fazla olmasından dolayı hiperparametre ayarının yapılması zorlaşabilmektedir.

Aşırı Gradyan Artırma Makineleri (XGBoost)

XGBoost algoritması, GBM algoritmasını optimize ederek daha kullanışlı bir yöntem ortaya çıkarmaktadır. Aşırı öğrenme probleminin önüne geçmek, eksik verilerle çalışabilmesi ve hızlı işlem yapması yönleriyle kullanışlı bir algoritmadır. Diğer makine öğrenmesi algoritmalarına göre birçok problem için daha çok öne çıkmaktadır [26].

XGBoost algoritması, büyük veri kümeleri üzerinde hızlı ve başarılı tahminler vermektedir. Ayrıca diğer topluluk öğrenme yöntemlerinde olduğu gibi aşırı öğrenme problemine karşı dirençli olduğu görülmektedir. Öte yandan hiperparametre sayısının çokluğundan dolayı ayarlanması uzun sürmektedir.

DeneySEL Çalışmalar

Bu bölümde deney kapsamında kullanılan veri kümeleri ve deneylerden elde edilen sonuçlardan bahsedilecektir.

Kullanılan Veri kümeleri:

Bu çalışma kapsamında UCI veri deposundan temin edilen 3 farklı veri kümesi üzerinde deneyler yapılmıştır. Tablo 1'de veri kümeleri hakkında bilgi verilmiştir.

Sonar: 61 öznitelikten ve 208 gözlemden oluşmaktadır. Denizaltıların ve su altı nesnelerin sınıflandırılması amacıyla hazırlanmıştır. Bu veri kümesinde kaya ve maden olmak üzere 2 farklı sınıf kullanılmıştır.

Parkinson: 23 öznitelik ve 195 gözlemden oluşmaktadır. Parkinson hastalığı beyinde dopamin üreten hücrelerin azalması sonucunda ortaya çıkan bir hastalıktır. Veri kümesi, hastalığa etki eden 23 özellik belirlenerek hastalığın erken teşhisini kolaylaştırmak için çeşitli

hastalardan toplanmıştır. Veri kümesi hasta olma ve hasta olmama durumlarını ifade eden 2 sınıftan oluşmaktadır.

Breast Cancer: 32 öznitelik ve 569 gözlemden oluşmaktadır. Meme kanseri, genellikle kadınlarda belli bir yaştan sonra meme dokularının kontrolsüz büyümesi sonucu ortaya çıkan bir hastalıktır. Veri kümesi, meme kanserine etki eden 31 özellik belirlenerek hastalığın erken teşhisini kolaylaştırmak için oluşturulmuştur. Veri kümesi hasta olma ve hasta olmama durumlarını ifade eden 2 sınıftan oluşmaktadır.

Tablo 1. Kullanılan veri kümeleri

Veri kümesi	Öznitelik Sayısı	Gözlem Sayısı
Sonar	61	208
Parkinson	23	195
Breast Cancer	32	569

Bulgular ve Tartışma:

Çalışma kapsamında 3 farklı veri kümesi üzerinde 5 farklı öznitelik seçim yöntemi uygulanmış ve orijinal durumdaki hali ile karşılaştırılmıştır. Deneyler kapsamında 5 farklı makine öğrenmesi algoritması 10 katlı çapraz doğrulama yöntemiyle uygulanmıştır.

Her bir veri kümesi için sınıflandırma doğruluk başarımları ve milisaniye cinsinden çalışma süreleri hesaplanmış, öznitelik seçim yöntemi için en yüksek doğruluk başarımları değerleri koyu olarak gösterilmiştir.

Her bir veri kümesi için öznitelik seçim yöntemleri uygulandıktan sonra ortaya çıkan 10 katlı çapraz doğrulama sonuçları ve çalışma süreleri üç farklı veri kümesi için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sonar veri kümesi için 5 farklı öznitelik seçim yöntemi ve 5 makine öğrenmesi algoritması kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Deney sonuçları, 10 katlı çapraz doğrulama ve çalışma süreleri bakımından öznitelik seçim yöntemi uygulandıktan sonra sonuçlar veri kümesinin orijinal hali ile karşılaştırılmıştır.

Sonar veri kümesi için deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar gözlemlendiğinde öznitelik seçim yöntemleri uygulandıktan sonra doğruluk başarımları oranları artmıştır.

Veri kümesinde öznitelik seçimi yapılmadan algoritmaların başarımları oranları incelendiğinde LightGBM algoritması daha başarılı sonuçlar vermiştir. Öznitelik seçim yöntemleri uygulandıktan sonra Parçacık sürü optimizasyon algoritması 39 öznitelik ile 0.8434 doğruluk başarımları oranını, Genetik algoritma 31 öznitelik ile 0.8382 doğruluk başarımları oranını vermiştir. Deney sonuçları incelendiğinde metasezgisel algoritmaların öznitelik seçiminde oldukça başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Sonar Veri kümesi Deney sonuçları (10 cv doğruluk sonuçları [çalışma süresi (ms)])

Kullanılan öznelik seçim yöntemleri	Öznelik Sayısı	Karar Ağacı için 10-cv ms süreleri	Rastgele Orman için 10-cv ms süreleri	Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri	Hafif Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri	Aşırı Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri
Veri kümesinin orijinal hali	61	0.7063[52.71]	0.7835[1219.56]	0.8070[3234.79]	0.8312 [472.07]	0.8140[1819.97]
Korelasyon Analizi yöntemi (thres:0.8)	38	0.6761[43.82]	0.7526[1335.06]	0.8125 [2435.82]	0.7834[324.22]	0.7408[441.61]
Lasso yöntemi	35	0.6816[40.74]	0.8316[1350.40]	0.7949[2455.34]	0.8319 [331.93]	0.8257[422.69]
Hipotez testi yöntemi	36	0.7349[75.52]	0.8011 [1316.84]	0.7710[2652.90]	0.7709[343.23]	0.7772[440.01]
PSO yöntemi	39	0.7118[42.71]	0.8434 [1458.02]	0.8074[2168.17]	0.8136[336.69]	0.8132[462.86]
Genetik Algoritması yöntemi	31	0.7360[60.58]	0.7651[1273.89]	0.8250[2090.06]	0.8382 [334.80]	0.8313[424.39]

Parkinson veri kümesi için deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde öznelik seçimi yapıldıktan sonra başarı oranının arttığı gözlemlenmiştir. Veri kümesinin orijinal hali incelendiğinde lightgbm algoritması daha başarılı sonuçlar vermiştir.

oranının arttığı görülmüştür. Genetik algoritma öznelik seçiminde 0.8971 doğruluk oranı ile daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Öznelik seçim yöntemi uygulandıktan sonra Genetik algoritma ile öznelik sayısı 23 ten 12'ye düşmüş ve başarı

Tablo 3. Parkinson Veri kümesi Deney sonuçları (10 cv doğruluk sonuçları [çalışma süresi (ms)])

Kullanılan öznelik seçim yöntemleri	Öznelik Sayısı	Karar Ağacı için 10-cv ms süreleri	Rastgele Orman için 10-cv ms süreleri	Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri	Hafif Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri	Aşırı Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri
Veri kümesinin orijinal hali	23	0.7881[66.65]	0.8624[2161.30]	0.8762[2512.22]	0.8823 [469.69]	0.8690[417.57]
Korelasyon Analizi yöntemi (thres:0.8)	10	0.7933[44.59]	0.8638[1883.91]	0.8700[1426.75]	0.8771[349.45]	0.8848 [369.73]
Lasso yöntemi	12	0.8148[69.20]	0.8767[2060.26]	0.8690[1586.41]	0.8828 [399.42]	0.8548[381.95]
Hipotez testi yöntemi	15	0.8219[70.05]	0.8424[1848.64]	0.8690 [1680.00]	0.8623[402.22]	0.8629[394.16]

PSO yöntemi	19	0.8500[81.49]	0.8552[1789.30]	0.8767[1851.08]	0.8828[399.97]	0.8838 [399.68]
Genetik Algoritması yöntemi	12	0.8576[63.58]	0.8762[1879.56]	0.8771[1446.14]	0.8971 [387.69]	0.8938[389.71]

Breast Cancer veri kümesi kullanılarak elde edilen deney sonuçları Tablo 4' te verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde öznelik seçim yöntemleri uygulandıktan sonra başarı oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Veri kümesi orijinal hali incelendiğinde lightgbm algoritması ile 0.9766

başarı oranı elde edilirken, öznelik seçimi yapıldıktan sonra doğruluk başarı oranı 0.8969' a düşmüştür. Breast Cancer veri kümesinde, metasezgisel algoritmalar öznelik seçiminde diğer yöntemlere göre daha başarısız sonuçlar vermiştir

Tablo 4. Breast Cancer Veri kümesi Deney sonuçları (10 cv doğruluk sonuçları[çalışma süresi(ms)])

Kullanılan öznelik seçim yöntemleri	Öznelik Sayısı	Karar Ağacı için 10-cv ms süreleri	Rastgele Orman için 10-cv ms süreleri	Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri	Hafif Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri	Aşırı Gradyan Artırma Makineleri için 10-cv ms süreleri
Veri kümesinin orijinal hali	32	0.9225[169.16]	0.9508[4871.24]	0.9602[12285.11]	0.9766 [3838.36]	0.9648[1334.73]
Korelasyon Analizi yöntemi (thres:0.8)	15	0.8969[134.11]	0.9461[4088.72]	0.9414[6482.11]	0.9484 [3035.88]	0.9483[1154.30]
Lasso yöntemi	15	0.9155[120.44]	0.9554[3862.01]	0.9530[6312.27]	0.9578 [3199.66]	0.9601[381.95]
Hipotez testi yöntemi	20	0.9342[120.82]	0.9555[4497.90]	0.9508[8179.60]	0.9648 [3215.57]	0.9532[1311.23]
PSO yöntemi	14	0.9131[106.65]	0.9438[4285.74]	0.9484[6228.71]	0.9650 [2865.00]	0.9454[1136.01]
Genetik Algoritması yöntemi	16	0.9083[108.91]	0.9508[4192.99]	0.9508[7122.63]	0.9555 [387.69]	0.9530[1104.11]

Öznelik seçim yöntemlerinin başarımlarını sağlıklı bir şekilde karşılaştırabilmek için tüm veri kümeleri için aynı parametre değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve çalışma süreleri incelendiğinde kullanılmış olan 3 veri kümesinin 2 tanesinde başarı oranı artmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçların başarımlarını ölçmek için diğer algoritmalara göre daha başarılı sonuçlar veren Hafif gradyan artırma makineleri algoritması ile 3 farklı veri kümesinin ortalama doğruluk, fl-skor, duyarlılık ve hassasiyet sonuçları Şekil 6 üzerinde gösterilerek karşılaştırılmıştır.

5 farklı algoritmanın 3 veri kümesi üzerindeki çalışma sürelerini incelendiğinde çalışma sürelerinin bazı algoritmalarda azalırken bazı algoritmalarda arttığı görülmüştür. 5 farklı algoritma özelinde tüm veri kümeleri üzerinde çalışma süreleri incelendiğinde en hızlı çalışan algoritmanın Karar Ağacı algoritması olduğu, en yavaş çalışan algoritmanın Gradyan Artırma Makineleri algoritması olduğu görülmüştür. Algoritmalar bazında

öznelik seçim yöntemleri uygulandıktan sonra çalışma süreleri incelendiğinde; Karar Ağacı algoritması için Breast Cancer veri kümesinde kullanılan tüm öznelik seçim yöntemleri için çalışma süreleri azalmıştır. Rastgele Orman algoritmasında Parkinson ve Breast Cancer veri kümelerinde kullanılan tüm öznelik seçim yöntemleri için çalışma süreleri azalmıştır. Gradyan Artırma Makineleri (GBM) algoritmasında 3 veri kümesinde de kullanılan tüm öznelik seçim yöntemleri için çalışma süreleri azalmıştır. Hafif Gradyan Artırma Makineleri (LightGBM) algoritmasında 3 veri kümesinde de kullanılan tüm öznelik seçim yöntemleri için çalışma süreleri azalmıştır.

Aşırı Gradyan Artırma Makineleri (XGBoost) algoritmasında kullanılan 3 veri kümesinde de tüm öznelik seçim yöntemleri için çalışma süreleri azalmıştır. Kullanılmış olan 3 veri kümesi içinden Breast Cancer veri kümesinde tüm algoritmalar için kullanılan tüm yöntemlerde çalışma süresinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Parkinson veri kümesinde hem başarı oranının arttığı hem de çalışma sürelerinin azaldığı ortaya konmuştur.

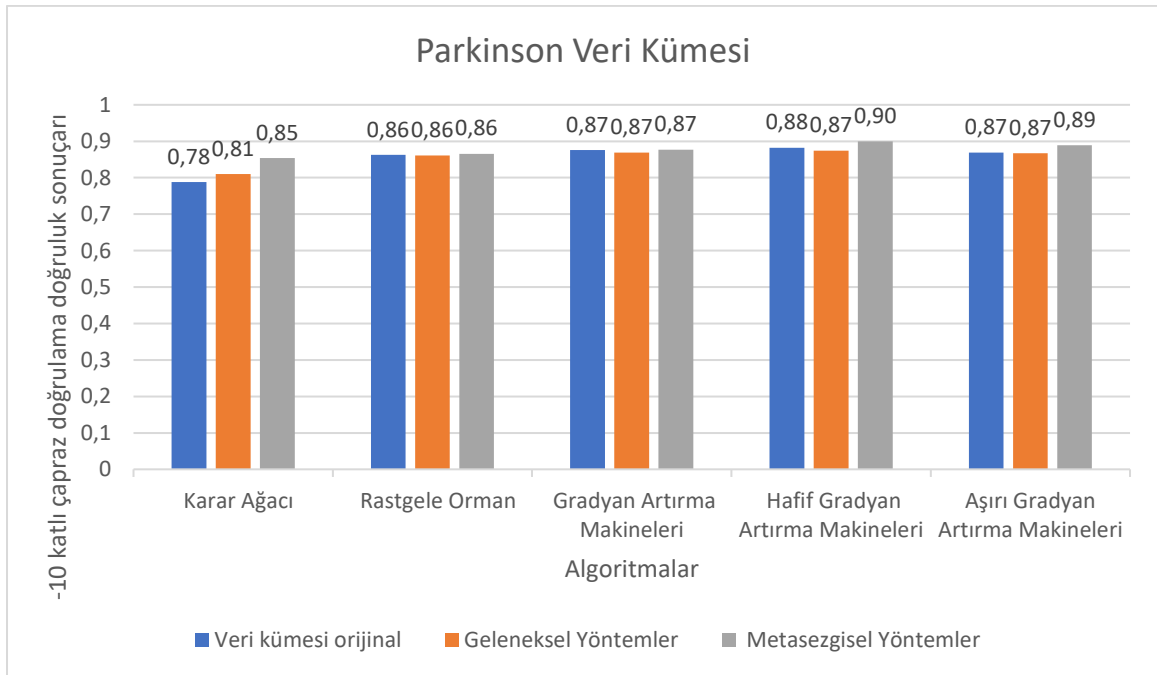
Deneylerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde meta sezgisel algoritmalarla parçacık sürü optimizasyon ve genetik algoritmanın öznelik seçiminde geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinden korelasyon analizi, lasso ve hipotez testine göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Genel olarak incelenen 3 veri kümesi üzerinde uygulanmış olan öznelik seçim yöntemlerinde başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Metasezgisel yöntemler ve geleneksel yöntemlerin öznelik seçimindeki etkilerini gözlemleyebilmek için deneylerde kullanılmış olan metasezgisel yöntemlerin ortalamaları ve geleneksel yöntemlerin ortalamaları alınıp her bir algoritma için veri kümesinin orijinal hali ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 3'te Parkinson veri kümesi için kullanılan yöntemlerin ortalama doğruluk başarımları ve veri kümesinin orijinal halinin doğruluk başarımları gösterilmiştir. Parkinson veri kümesi için genel olarak sonuçlar incelendiğinde, Karar Ağacı algoritması veri

kümesinin orijinal halinde 0.78 ile en düşük başarımlarını verirken, Hafif Gradyan Artırma Makineleri(LightGBM) algoritması, metasezgisel algoritmalar ile öznelik seçimi yapıldığında 0.9 ile en yüksek doğruluk başarımlarını vermiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi metasezgisel yöntemlerin 5 makine öğrenmesi algoritması üzerinde genel olarak geleneksel yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. LightGBM algoritmasının diğer algoritmalara göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

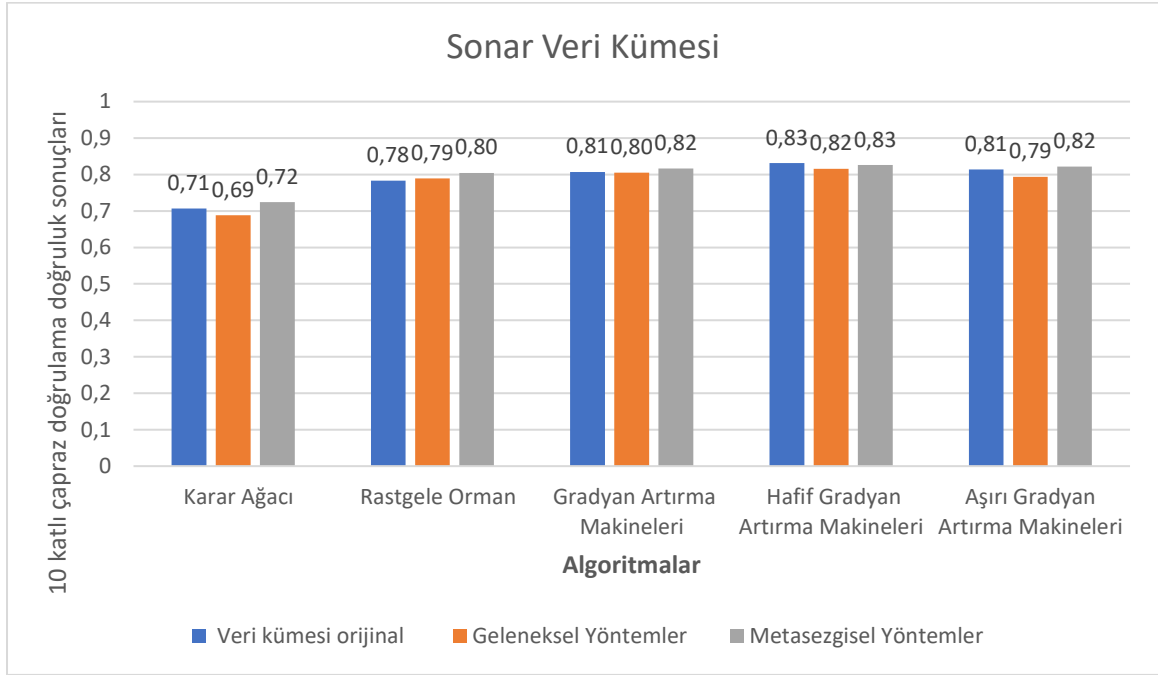


Şekil 3. Parkinson veri kümesi ortalama doğruluk başarımları

Şekil 4'te Sonar veri kümesi için kullanılan yöntemlerin ortalama doğruluk başarımları ve veri kümesinin orijinal halinin doğruluk başarımları gösterilmiştir. Sonar veri kümesi için genel olarak sonuçlar incelendiğinde, Karar Ağacı algoritması geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak öznelik seçimi yapıldığında 0.69 başarımları ile en düşük doğruluk başarımlarını verirken,

LightGBM algoritması metasezgisel algoritmalar ile öznelik seçimi yapıldığında 0.83 ile en yüksek doğruluk başarımlarını vermiştir. Şekil 4'teki sonuçlar incelendiğinde LightGBM algoritması dışında metasezgisel algoritmaların daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Algoritmalar bazında incelendiğinde LightGBM

algoritmasının daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

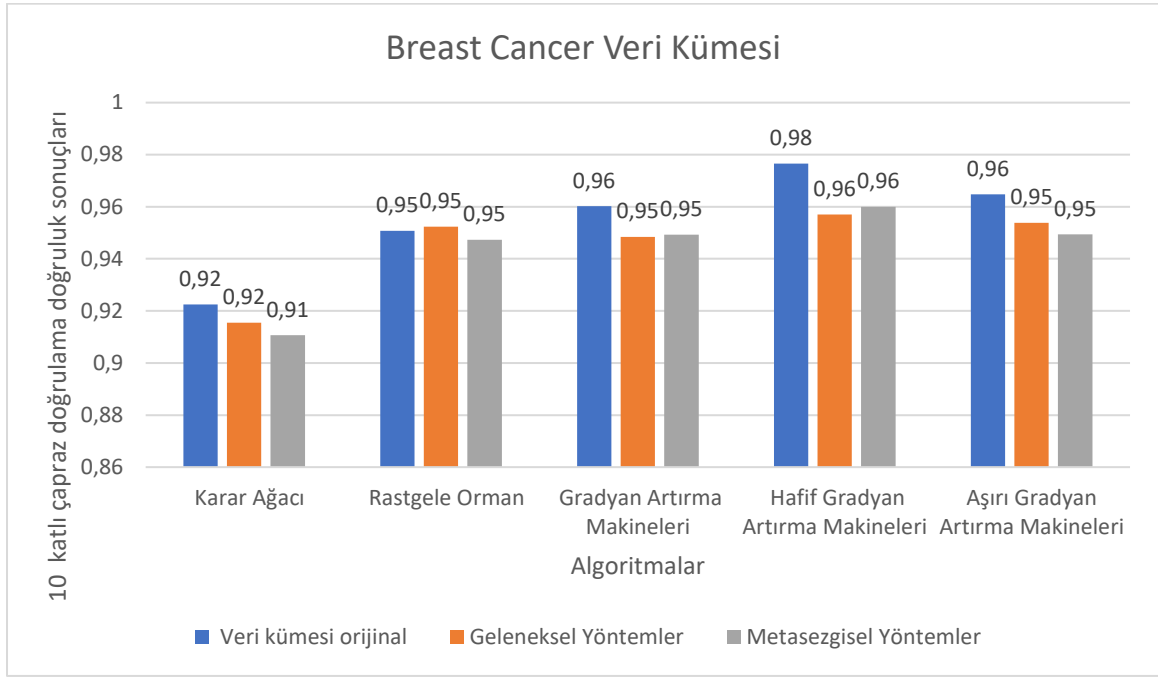


Şekil 4. Sonar veri kümesi ortalama doğruluk başarımları

Şekil 5'de Breast Cancer veri kümesi için kullanılan yöntemlerin ortalama doğruluk başarımları ve veri kümesinin orijinal halinin başarımları gösterilmiştir. Breast Cancer veri kümesi için genel olarak sonuçlar incelendiğinde, Karar Ağacı algoritması metasezgisel algoritmalar ile öznelik seçimi yapıldığında 0,9108 doğruluk başarımları ile en düşük doğruluk başarımlarını verirken, LightGBM algoritması, veri kümesinin orijinal hali kullanılarak öznelik seçimi yapıldığında 0,9766 doğruluk başarımları ile en yüksek doğruluk başarımlarını vermiştir. Ortalama doğruluk başarımları incelendiğinde metasezgisel yöntemlerin tüm

algoritmalar için geleneksel yöntemlere ve veri kümesinin orijinal haline göre daha başarısız sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu veri kümesi üzerinde metasezgisel yöntemlerin başarısız sonuçlar vermesi; veri kümesinin dengesiz bir şekilde dağılması, veri kümesinde aykırı değerlerin olması ve parametrelerin uygun bir şekilde belirlenememesinden dolayı başarısız sonuçlar verdiği düşünülmektedir.

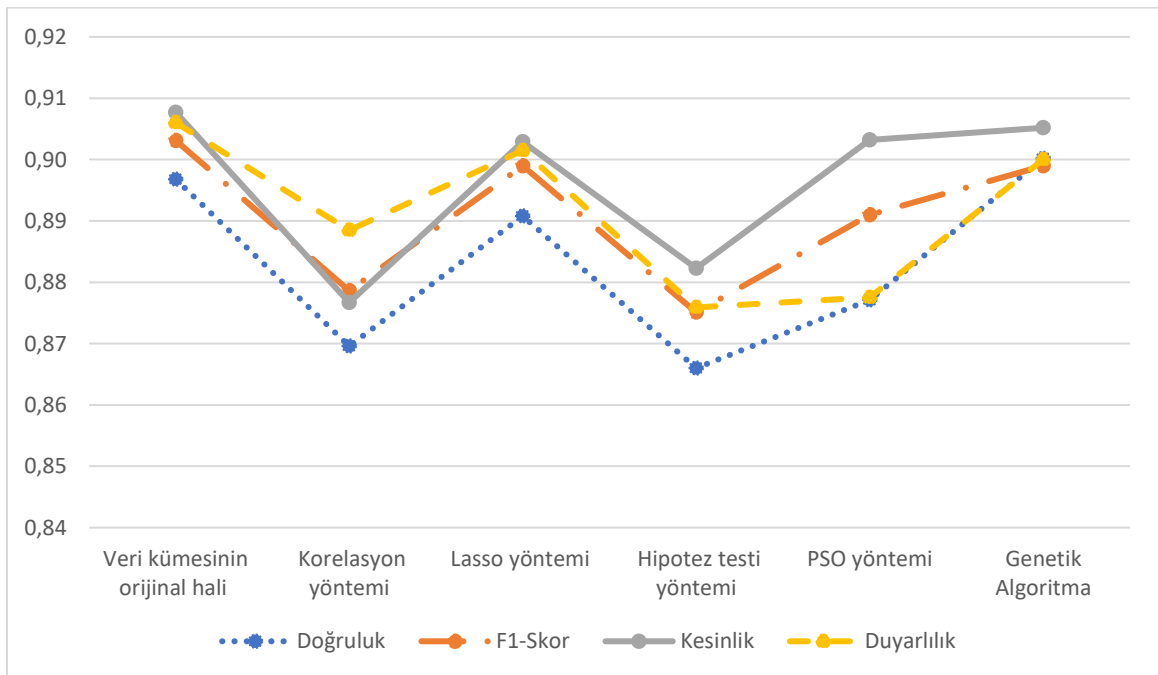
Genel olarak öznelik seçimi yapılmadan kurulan modellerin daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Breat cancer veri kümesi ortalama doğruluk başarımları

Elde edilen deneysel çalışmaların doğruluğunu ölçmek için Hafif Gradyan Artırma Makineleri Algoritması kullanılarak 3 veri kümesinin Doğruluk, F1-Skor, Kesinlik ve Duyarlılık başarımlarının ortalamaları alınarak Şekil 6'da gösterilmiştir. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde Genetik Algoritmanın öznelik seçiminde diğer yöntemlere

göre daha başarılı sonuçlar verirken, korelasyon analizi en düşük başarımları verdiği görülmüştür. Kullanılan değerlendirme metriklerine göre Doğruluk değeri genel olarak daha düşük sonuçlar verirken, duyarlılık değerinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür



Şekil 6. Hafif Gradyan Artırma Makineleri ile 3 veri kümesi ortalama

Doğruluk , F1-Skor, Kesinlik , Duyarlılık sonuçları

Sonuçlar

Bu çalışmada UCI veri kümesi deposundan literatürde en sık kullanılan 3 veri kümesi üzerinde 3 farklı geleneksel makine öğrenmesi yöntemi ile öznelik seçimi ve doğadan ilham alarak ortaya çıkmış 2 farklı meta sezgisel algoritma kullanıldı. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda öznelik seçim yöntemleri uygulandıktan sonra genel olarak başarı oranlarının arttığı gözlemlenmiştir.

Veri kümesinde öznelik sayısı çok olduğunda öznelik seçim yöntemlerinin kullanılması önem arz etmektedir. Bunun nedeni veri kümesinde öznelik sayısının çok olması durumunda bazı öznelikler model performansını azaltmakta ve başarı oranlarının düşmesine neden olabilmektedir.

Veri kümeleri üzerinde öznelik seçim yöntemleri kullanılarak gürültülü ya da model için ilgisiz öznelikler elenince başarı artabilir.

Sonuç olarak kullanılan öznelik seçimi yöntemlerinden parçacık sürü optimizasyon ve genetik algoritmaların öznelik seçiminde daha az sayıda öznelik ile oldukça başarılı sonuçlar elde edildiği söylenebilir.

Kaynaklar

- [1] Koşan, Muhammed Ali, Coşkun, Aysun, Karacan, Hacer. 2019. "Yapay Zekâ Yöntemlerinde Entropi", *Bilişim Sistemleri ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, Cilt 1, S.1, sf. 15-21
- [2] Kaynar, Oğuz, Arslan, Halil, Görmez, Yasin, Işık, Yunus Emre. 2018. "Makine Öğrenmesi ve Öznelik Seçim Yöntemleriyle Saldırı Tespiti", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, Cilt 11, S. 2, sf.175-185
- [3] Kaynar, Oğuz, Arslan, Halil, Görmez, Yasin, Işık, Yunus Emre. 2018. "Makine Öğrenmesi ve Öznelik Seçim Yöntemleriyle Saldırı Tespiti", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, Cilt 11, S. 2, sf.175-185
- [4] Onay, Funda Kutlu. 2023. "Öznelik Seçimi Problemleri İçin İkili Beyaz Köpekbalığı Optimizasyon Algoritması", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 13, S.2, sf. 281-298
- [5] Vatanserver, Berna, Aydın, Hakan, Çetinkaya, Ali. 2021. "Heart Disease Prediction with Machine Learning Algorithm Using Feature Selection by Genetic Algorithm", *Bilim, Teknoloji ve Mühendislik Araştırmaları Dergisi*, Cilt 2, S.2, sf. 67-80
- [6] Şengür, Dönüş. 2021. "Öğretmenlerde Etkili Psikososyal Risk Düzeylerinin Belirlenmesi için Parçacık Sürü

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde doğadaki varlıklardan esinlenerek ortaya çıkarılmış metasezgisel algoritmaların öznelik seçiminde başarılı olduğu gözlenmiştir. Bu yöntemler öznelik seçimi dışında endüstriyel tasarım projelerinde de oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Bir uçağın kanat tasarımı, masa için uygun genişlikte yükseklikte malzemelerin seçimi, baz istasyonlarının yerleşim yerlerinin belirlenmesi, elektronik devre tasarımı gibi endüstriyel ve mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan bir yapay sinir ağının eğitimi ve makine öğrenmesi algoritmalarında hiperparametrelerin optimize edilmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Farklı metasezgisel algoritmaların iyi yönlerinin birleştirilerek geliştirilen hibrit metasezgisel algoritmalar başarılı sonuçlar vermektedir. Metasezgisel algoritmalar ile ilgili çok sayıda yöntem geliştirilmiş olmasına rağmen, çözümü aranan problemlerle ilgili çalışmalar gün geçtikçe farklılaştığından dolayı, bu konu popülaritesini ve güncelliğini korumaktadır.

Metasezgisel algoritmaların kısıtları gözönüne alındığında ise, her zaman en iyi çözümü garanti etmedikleri, Yüksek bellek kullanımı gereksimi ve parametrelerinin ayarlanmasının uzun zaman gerektirdiği gözlemlenmiştir.

Optimizasyonu Tabanlı Öznelik Seçme", *Türkiye Eğitim Dergisi*, Cilt 6, S. 2, sf. 488-496

[7] Çelik, Ceyhan, Bilge Hasan Şakir. 2015. "Ağırlıklandırılmış Koşullu Karşılıklı Bilgi İle Öznelik Seçimi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 30, S. 4, sf.585-596

[8] Sağbaş, Ensar Arif, Gökalp Osman, Uğur Aybars. 2019. "Yüz İfadesi Tanıma için Mesafe Oranlarına Dayalı Öznelik Çıkarımı ve Genetik Algoritmalar İle Seçimi", *Veri Bilim Dergisi*, Cilt 2, S.1, sf.19-29

[9] Abbasoğlu, Ferda, Gülcü, Ayla, Ulvi, Başpınar. 2021. "EEG Sinyallerinin Sınıflandırılmasında Evrimsel Öznelik Seçim Metotlarının Kullanılması", *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, C.33, S.2, sf.171-179

[10] Bilen, Abdulkadir, Özer, Ahmet Bedri. 2021. "Siber Saldırıları için Rastgele Orman Algoritması Kullanılarak Öznelik Seçimi", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimler Dergisi*, C.34, S.1, sf.31-37

[11] Sağbaş, Ensar Arif. 2023. "Filtre Tabanlı Öznelik Seçim Yöntemleri Kullanılarak Metinlerde Duygu Sınıflandırılması Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, C.35, S.1, sf.239-250

- [12] Yağmur, Ece, Yağmur, Sercan. 2022. “Rüzgâr Gücü Tahmininde Genetik Algoritma ile Öznitelik Seçimi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, C.22, S.5, sf.1028-1040
- [13] Narin, Ali. 2020. “Parkinson Hastalarının Tespitinde Karınca Koloni Algoritması ile Seçilen Özniteliklerin Performansa Etkisi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, C.8, S.4, sf. 2443-2454
- [14] Can, Celal, Kaya, Yasin, Kılıç, Fatih. 2021. “Salp Sürü Algoritması ile Öznitelik Seçimi ve Sınıflandırıcı Performans Değerlendirmesi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, C.30, sf.12-16
- [15] Xue Wen, Chen and Michael, Wasikowski. “Fast: a roc-based feature selection metric for small samples and imbalanced data classification problems”, *In Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, Las Vegas, USA, 2008*, pp.124-132
- [16] Cengiz, Mehmet Ali, Terzi, Yüksel. 2018. *Hipotez Testleri Ders Notları*, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi İstatistik Bölümü.
- [17] Orhan, Hikmet, Vergili, Merve. 2022. “Genomik Veri Setlerinin LASSO ve Elastik Net Regresyon Yöntemleri ile Analizi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, Cilt 13, Sayı 3, sf.485 – 496
- [18] Karaboğa, Derviş. 2020. “Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları”, Nobel Akademik Yayıncılık, sf.75
- [19] Karaboğa, Derviş. 2020. “Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları”, Nobel Akademik Yayıncılık, sf.76-82
- [20] Karaboğa, Derviş. 2020. “Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları”, Nobel Akademik Yayıncılık, sf.182
- [21] Karaboğa, Derviş. 2020. “Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları”, Nobel Akademik Yayıncılık, sf.183-189
- [22] Ozkan, Yalçın. 2020. “Veri Madenciliği Yöntemleri”, Papatya Yayıncılık, sf. 39-40
- [23] Breiman Leo, “Consistency For A Simple Model of Random Forests”, Berkeley, USA. Sep.9,2004.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2a42f39add8332a7139d44a6e77496c0571e4f24>
- [24] Friedman, Jerome Harold. 2001. “Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine”, *The Annals of Statistics*, C. 29, S. 5, sf.1189-1232
- [25] Alsharı, Haithm, Saleh, Abdulrazak Yahya, Odaş, Alper. 2021. “Comparison of Gradient Boosting Decision Tree Algorithms for CPU Performance”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 37, S. 1, sf. 157-168
- [26] Chen, Tianqi and Guestrin, Carlos. “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System”, *Uluslararası Bilgi Keşfi ve Veri Madenciliği Konferansı Bildirileri, Washington, USA,2016*, sf. 785-794



Doyum ve Histerezis Etkilerini İçeren Tek Fazlı Transformatörün Modellenmesi ve Nonlinear Yük Etkilerinin İncelenmesi

Modeling of a Single Phase Transformer Including Saturation and Hysteresis Effects and Examining Nonlinear Load Effects

Şilan ÇALIŞKAN^{1*}, Hüseyin ALTUN²

¹Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları, Elazığ, silancaliskan@tcdd.gov.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5215-017X>

²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elazığ, haltun@firat.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3124-1232>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25.03.2024
Revizyon 02.04.2024
Kabul 20.04.2024
Online 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Jiles-Atherton Histerezis Model,
Transformatör Modelleme,
Harmonik etkiler, Doğrusal
Olmayan Yük

ÖZET

Bu makalede güç sistemlerinde elektrik enerjisini bir elektrik sisteminden diğerine aktarmak için kullanılan en önemli ekipmanlardan birisi olan transformatörlerin doyum ve histerezis etkilerini içeren transformatör modeli oluşturulmuştur. Bu etkiler yüksüz durum sırasında uyarma akımı dalga biçimini bozar. Ayrıca, geçici durumlar sırasında transformatörün davranışı üzerinde önemli bir rol oynarlar. Bu amaçla transformatörün modelleme sürecinde histerezis döngüsünün hesaba katılması, doyum etkisi, harmonik etkiler ve ani akımların etkilerini içerecek şekilde analiz yapmak için ters Jiles-Atherton histerezis modeli kullanılarak Matlab/Simulink benzetimi gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan yük koşullarının transformatör üzerindeki etkileri tek fazlı kontrollü doğrultucu eklenerek farklı tetikleme açıları için analiz edilmiştir. Farklı yük durumları için transformatörün giriş çıkış büyüklüklerine ait harmonik analiz ve toplam harmonik bozunum değişimleri detaylı olarak verilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25.03.2024
Received in revised form 02.04.2024
Accepted 20.04.2024
Available online 30.06.2024

Keywords:

Jiles-Atherton Hysteresis Model,
Transformer Modeling, Harmonic
Effects, Nonlinear Load

ABSTRACT

In this article, a transformer model was created that includes the saturation and hysteresis effects of transformers, which are one of the most important equipment used to transfer electrical energy from one electrical system to another in power systems. These effects distort the excitation current waveform during the no-load state. They also play an important role on the behavior of the transformer during transients. For this purpose, Matlab/Simulink simulation was carried out using the inverse Jiles-Atherton hysteresis model to take into account the hysteresis loop in the modeling process of the transformer, and to analyze the saturation effect, harmonic effects and the effects of inrush currents. The effects of non-linear load conditions on the transformer were analyzed for different trigger angles by adding a single-phase controller rectifier. Harmonic analysis and total harmonic distortion changes of the input and output quantities of the transformer for different load situations are given in detail.

Doi: 10.24012/dumf.1458359

* Sorumlu Yazar

Giriş

Güç sistemlerindeki en önemli ekipmanlardan biri transformatörlerdir. Transformatörlerin nonlineer olma durumu; çekirdekdeki doyma, histerezis ve girdap akımlarından kaynaklanmaktadır. Bu etkiler yüksüz durumda uyarma akımı dalga biçimini bozar [1]. Ayrıca, bu etkiler transformatörün geçici durum davranışı üzerinde önemli bir rol oynarlar. Bu nedenle, transformatörün modellenmesinde histerezis döngüsünün hesaba katılması, çekirdeğin doğrusal olmama durumunun etkilerini anlamak için çok gereklidir [2]- [3].

Histerezis manyetik malzemelerin önemli bir özelliğidir. Manyetik alanın hesaplama sonuçlarının doğruluğunu arttırmak için, manyetik alanın sayısal hesaplanmasında manyetik malzemelerin histerezis etkilerinin dikkate alınması gerekir [4].

Doğrusal olmayan yükler, elektrik hatlarında harmoniklerin akmasına neden olur ve bu da kabloları ve transformatörleri aşırı yükleyebilir. Birçok masaüstü, kişisel bilgisayar, güç kaynaklarının tasarımı (kapasitör giriş güç kaynağı) nedeniyle AC kaynağına doğrusal olmayan yükler sunar [5].

Enerji hatlarında harmoniklerin varlığı, düşük güç faktörüne, düşük verimliliğe, dağıtım sisteminde güç kayıplarının artmasına ve iletişim sistemlerinde girişim sorunlarına neden olur. Bu durum bazen voltaj ve akım bozulmalarına karşı çok hassas olan elektronik ekipmanların arızalanmasına yol açmaktadır [6].

Transformatörleri doğrusal olmayan yük altında beslerken, çekirdek kayıpları ve bakır kayıpları dahil elektromanyetik kayıplar artar. Bu durum, sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla izolasyonun bozulması nedeniyle transformatör ömrünün kısalmasına neden olur. Doğrusal olmayan yükün artışı aynı zamanda THD'nin artmasına neden olur ve dolayısıyla transformatör üzerindeki yüklenmeyi de artırır. Sorunu çözmek için, harmonik yüke bağlı transformatörün nominal kapasitesi genellikle azaltılır [7]- [8].

Doğrusal olmayan yükler, elektrik tesisleri için harmonik akımın kaynağıdır. Harmoniklerin yüksek seviyesi, elektrik gücü kayıplarının artışı büyük ölçüde etkiler. Harmoniklerin etkisi, dengesiz doğrusal olmayan akımlardan dolayı daha da artar. Dolayısıyla doğrusal olmayan dengesiz yüklerin, transformatörün kayıplarını artırabileceği sonucuna varılabilir [9].

Güç sistemi harmonikleri, ana üretilen (temel) frekansın tam katları olan frekanslardaki sinüzoidal gerilim ve akımlar olarak tanımlanır. Şebeke gerilimi ve yük akımı dalga formlarının ana bozucu bileşenlerini oluştururlar. Bununla birlikte, güç sistemi ara harmoniklerinin artan içeriği, yani temel değerlerin tam katları olmayan frekanslardaki bileşenlerin bozulması, bunlara daha fazla dikkat edilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Çoğu ülke geçmişte yerel koşullara uyacak şekilde kendi harmonik standartlarını veya önerilerini geliştirmiştir. Bununla birlikte, küresel ticaretin büyümesiyle birlikte, bir ülkede üretilen ekipmanın diğer bir ülkedeki standartlara uyma ihtiyacı, harmonikler ve ara

harmonikler konusunda uluslararası standartların formüle edilmesi konusunda yoğun çabalara yol açmıştır [10].

Bir dizi kaynaktan gelen harmoniklerin güç sistemi üzerindeki etkileşim şekli, bu tür kaynakların doğası ve bunların sistem içindeki dağılımının hem fiziksel hem de zamana göre değişimi tarafından yönetilir. Rahatsız edici yüklerin gerçek derecelendirmelerini etkili bir derecelendirmeye dönüştürür ve bu daha sonra standartla ilişkisinin değerlendirilmesinde kullanılır [10]-[11].

Manyetik bir malzemenin davranışını alanlar düzeyinde yakalamak için histerezis döngüsü Jiles-Atherton modeli ile oluşturulmuştur. Ölçülen döngüye daha iyi yaklaşmayı kolaylaştırmak için orijinal hesaplama modeli değiştirilerek ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur [12].

Bir bilgisayar programındaki bir hesaplama algoritmasını kullanarak mıknatıslanma eğrisini simüle etmek için Jiles-Atherton modelinin denklemleri kullanılır. Bu programın amacı deneysel olarak elde edilen ana mıknatıslanma eğrisi için regresyon eğrisi bulunduğunda Jiles-Atherton modelinin parçası olan parametrelerin değerlerini bulmaktır. Bu parametrelerin değerleri kademeli olarak artırılabilir veya azaltılabilir. Bu makale aynı zamanda farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş birkaç kobalt ferrit numunesinin mıknatıslanma eğrilerinin uydurulmasıyla elde edilen Jiles-Atherton modeli parametrelerinin değerlerini de sunmaktadır [13].

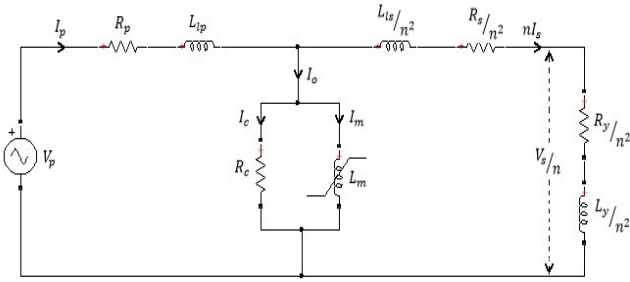
Ferromanyetik malzemelerin manyetik alan analizi, elektrikli güç ekipmanının performansını tahmin etmek ve analiz etmek için oldukça önemlidir. Bu bileşenlerde kullanılan manyetik çekirdek malzemesinin histerezis davranışının simülasyon modelinde doğru bir şekilde temsil edilmesi gerekmektedir. Jiles ve Atherton tarafından önerilen yumuşak manyetik malzemelerdeki mıknatıslanma süreçlerinin tanımı hala en yaygın kullanılanlardan biri olmaya devam etmektedir. Jiles-Atherton (JA) histerezis modeli, mıknatıslanma sürecine ilişkin fiziksel anlayışa dayanmaktadır ve bu nedenle manyetikliğin fiziksel bir modeli olarak kabul edilmektedir [14]- [15].

Manyetik malzemelerde mıknatıslanmanın modellenmesi incelendiğinde, bazı manyetik malzemelerin manyetik alanın varlığında uzadığı görülmüştür. Bu malzemeler tam doğrusal değildir ve dolayısıyla kontrol edilmesi zordur. Deneysel veriler Preisach, ve Jiles-Atherton modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu modellerin malzeme davranışının tahminindeki kullanım kolaylığı ve doğruluğu açısından karşılaştırılması yapılmıştır [16].

Sonlu elemanlar analizinde uygulanan J-A ve Preisach modellerini yumuşak manyetik kompozit çekirdek bobini üzerine uygulanarak karşılaştırılmıştır. Her iki model de temel davranış (B-H eğrisi) ve aynı oranlardaki akım, demir kayıpları için benzer sonuçlar vermektedir. Ayrıca uygulaması daha kolay ve hızlı olan J-A modeli, çalışılan sistem için Preisach modeline benzer sonuçlar vermiştir [17].

Doyum ve Histeresis Etkilerini İçeren Transformatörün Modellenmesi

Elektrik sistemleri arasında enerji aktarımı sırasında transformatörde güç kayıpları ortaya çıkar. Bu kayıplar doğrusal olmayan yüklerden dolayı artabilmektedir. Günümüzde doğrusal olmayan yüklerin çoğunluğunu gerilim ve akımlarda daha yüksek dereceli harmonikler üreten güç elektroniği cihazları oluşturur. Genellikle transformatöre dengesiz yükler oluşturacak şekilde bağlanırlar. Doğrusal olmayan ve dengesiz yüklerden dolayı ortaya çıkabilecek anormal çalışma koşullarını transformatör modelinde doğru şekilde ortaya koymak oldukça önemlidir [18].



Şekil 1. Tek fazlı transformatörün elektriksel eşdeğer devresi

Transformatörü temsil eden matematiksel denklemler, Şekil 1'de verilen elektriksel eşdeğer devreye dayanarak türetilebilir. Şekil 1'de, sarımdan akan her akımın ürettiği akının, iki akı bileşeninden oluştuğu kabul edilir. Akı bileşenlerinden biri yalnızca hava yoluyla sarıma ve kısmen akımın aktığı demir çekirdeğe bağlanırken, diğeri demir çekirdek aracılığıyla hem birincil hem de ikincil sargıları bağlar [19].

Şekil 1'de değişken mıknatıslanma indüktansına paralel olarak histeresis ve fuko akımları nedeniyle oluşan çekirdek kayıplarını temsil eden R_c direnci eklenmiştir. Bu direnç sabit olmamasına rağmen modelde yaklaşık sabit kabul edilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, sabit R_c direncinden akan akım I_c akımına karşılık gelmektedir. Devredeki I_o akımı, açık devre çalışma akımına karşılık gelir. R_y/n^2 ve L_y/n^2 indüktif yük empedansının bileşenleridir.

Gerçek bir transformatörde demir çekirdeğin doygunluğu, histeretik davranışı ve sargı dirençlerine ek olarak girdap akımlarının etkisi nedeniyle manyetik bağlantı ideal olarak sağlanamaz. Bu ideal olmayan durumları bir transformatörün formülasyonuna dahil ederek, her bir taraf için gerilim eşitliklerini şu şekilde ifade edilebiliriz:

$$V_p = I_p \cdot R_p + N_p \frac{d\varphi_p}{dt} \quad (1)$$

$$V_s = -I_s \cdot R_s + N_s \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (2)$$

Burada V_p ve V_s terminal gerilimlerini, R_p ve R_s sargı dirençlerini ve N_p ve N_s sırasıyla primer ve sekonder sargılarının spir sayılarını, φ_p ve φ_s ise sırasıyla birincil ve ikincil sargıları için akı bağıntısını temsil eder. Denklem 1 ve

2'nin sağ tarafındaki ikinci terimler elektromanyetik indüksiyondan kaynaklanmaktadır.

$$V_p = I_p \cdot R_p + L_p \frac{dI_p}{dt} - L_M \frac{dI_s}{dt} \quad (3)$$

$$V_s = -I_s \cdot R_s - L_s \frac{dI_s}{dt} + L_M \frac{dI_p}{dt} \quad (4)$$

L_M ortak endüktans; L_p , L_s sırasıyla primer ve sekonder sargılarının self indüktanslarını göstermektedir. Self indüktanslar, Denklem 5 ve 6'daki gibi kaçak indüktans ve ortak indüktans cinsinden ifade edilebilir.

$$L_p = L_{lp} + \frac{N_p}{N_s} L_M \quad (5)$$

$$L_s = L_{ls} + \frac{N_s}{N_p} L_M \quad (6)$$

Burada L_{lp} ve L_{ls} sırasıyla primer ve sekonder sargısı kaçak indüktanslarını göstermektedir. Denklem 5 ve 6'yı denklem 3 ve 4'de yerine yazarsak gerilim eşitliklerini kaçak indüktans ve ortak indüktans cinsinden ifade edebiliriz.

$$V_p = I_p \cdot R_p + L_{lp} \frac{dI_p}{dt} + \frac{L_M}{n} \frac{d(I_p - nI_s)}{dt} \quad (7)$$

$$V_s = -I_s \cdot R_s - L_{ls} \frac{dI_s}{dt} + L_M \frac{d(I_p - nI_s)}{dt} \quad (8)$$

Denklem 7'de N_s/N_p dönüştürme oranına karşılık gelen n ifadesi kullanılmıştır. $(I_p - nI_s)$ ve L_M/n terimleri, sırasıyla mıknatıslanma akımına ve mıknatıslanma indüktansına karşılık gelen I_m ve L_m ile yer değiştirebilir.

$$V_p = I_p \cdot R_p + L_{lp} \frac{dI_p}{dt} + L_m \frac{dI_m}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{V_s}{n} = -nI_s \cdot \frac{R_s}{n^2} - \frac{L_{ls}}{n^2} \frac{d(nI_s)}{dt} + L_m \frac{dI_m}{dt} \quad (10)$$

Şekil 1'deki elektriksel eşdeğer devrede yük tarafı için aşağıdaki eşitliği yazabiliriz.

$$\frac{V_s}{n} = nI_s \cdot \frac{R_y}{n^2} + \frac{L_y}{n^2} \frac{d(nI_s)}{dt} \quad (11)$$

$$L_m = L_M/n = K L_p = K \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 L_s \quad (12)$$

$$L_m \frac{dI_m}{dt} = N_p \frac{d\varphi_m}{dt} = \frac{d\lambda_m}{dt} = N_p S \frac{dB}{dt} \quad (13)$$

Burada $\lambda_m = N_p \varphi_m$ mıknatıslama akı bağıdır ve $\varphi_m = B \cdot S$ 'dir. İndüklenen gerilim eşitliği, B ve H arasındaki ilişkiyi yansıtacak şekilde Denklem 14'deki gibi tanımlanabilir.

$$V_m = L_m \frac{dI_m}{dt} = \frac{N_p^2 S}{l} \frac{dB}{dH} \frac{dI_m}{dt} \quad (14)$$

Burada l akı yolunun ortalama uzunluğudur.

Ters Jiles Atherton Modeli

Transformatörlerde elektromanyetik indüksiyon olayı meydana geldiğinde, yani akı tarafından elektromotor kuvvet indüklendiğinde, indüklenen gerilim mıknatıslanma akımından önce bilinebilir. Bu nedenle transformatörün geçici durum modeliyle klasik J-A modeli birleştirilemez.

Trafo geçici durum hesaplamalarına histerezi dahil etmek için, J-A modelinin tersine çevrilmesi gerekir. Manyetik akı yoğunluğunu bağımsız bir değişken olarak kabul eden ve manyetik alan yoğunluğu için çözülmesi gereken bir matematiksel model, demir çekirdek malzemesinde mevcut olan doygunluğu ve B-H ilişkisini hesaba katan bir transformatör modeline dahil edilebilir.

Modelin, demir çekirdek malzemesinin doygunluğu ve B-H ilişkisini hesaba katması ve farklı koşullar için ani akım ve doğrusal olmayan yük akımının değişimini gerçekleştirme amaçlanmaktadır. Tersine çevrilmiş Jiles-Atherton modeli, B-H ilişkisinin temsili için kullanılır.

Bu modelde B ve H sırasıyla giriş ve çıkış değişkenleri olarak ele alınır. Ters Jiles-Atherton modeli ile transformatörlerin geçici durumlarını içeren bir modelleme gerçekleştirilebilir [20]. Model, manyetik akı yoğunluğunun (B) bağımsız bir değişken olarak ele alındığı diferansiyel denklemlerin doğrudan Jiles-Atherton modelinden uyarlandığı diferansiyel denklem takımlarından oluşur. B 'den M ve H 'yi hesaplamak için referansta verilen sayısal prosedür, $B(t)$ ve $H(t)$ 'nin önceki hesaplama adımından bilindiğini varsayar [19]- [20].

$$\Delta B = B(t + \Delta t) - B(t) \quad (15)$$

$$M(t) = \frac{B(t)}{\mu_0} - H(t) \quad (16)$$

$$H_e(t) = H(t) + \alpha M(t) \quad (17)$$

H_e manyetik alan yoğunluğu, α ise alanlar arası bağlantıları temsil eden Weiss düzeltme faktörüdür. M_{an} histerik olmayan mıknatıslanma Denklem 18 ile bulunur.

$$M_{an}(t) = \left[\coth\left(\frac{H_e(t)}{a}\right) - \frac{a}{H_e(t)} \right] \quad (18)$$

Burada, a histeretik mıknatıslanma eğrisinin eğimini ayarlayan şekillendirme parametresidir. M_{irr} , geri dönüşü olmayan mıknatıslanma bileşeni ise Denklem 19 ile bulunur.

$$M_{irr}(t) = \frac{M(t) - cM_{an}(t)}{1 - c} \quad (19)$$

$$\frac{dM_{an}}{dH_e} = \frac{M_s}{a} \left[1 - \coth^2\left(\frac{H_e(t)}{a}\right) + \left(\frac{a}{H_e(t)}\right)^2 \right] \quad (20)$$

$$\frac{dM_{irr}}{dB_e} = \frac{M_{an}(t) - M_{irr}(t)}{\mu_0 k \delta} \quad (21)$$

Buradaki B_e manyetik akı yoğunluğu, c ise tersinirlik katsayısıdır. k , modelde geri döndürülemez kaybı temsil eden Boltzmann sabitidir. Burada $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H/m$ boşluğun manyetik geçirgenliğidir.

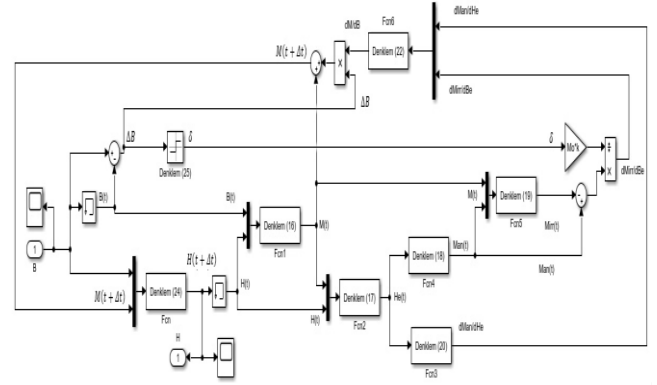
$$\frac{dM}{dB} = \frac{(1-c) \frac{dM_{irr}}{dB_e} + c \frac{dM_{an}}{\mu_0 dH_e}}{1 + \mu_0 (1-c) (1-c) \frac{dM_{irr}}{dB_e} + c (1-c) \frac{dM_{an}}{dH_e}} \quad (22)$$

$$M(t + \Delta t) = M(t) + \frac{dM}{dB} \Delta B \quad (23)$$

$$H(t + \Delta t) = \frac{B(t + \Delta t)}{\mu_0} - M(t + \Delta t) \quad (24)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } \left(\frac{dH}{dt}\right) > 0 \\ -1 & \text{Eğer } \left(\frac{dH}{dt}\right) < 0 \end{cases} \quad (25)$$

Denklem 15-25'de verilen eşitlikler kullanılarak oluşturulan ters Jiles-Atherton histerezi modelinin Matlab/Simulink benzetimi Şekil 2'de görülmektedir.



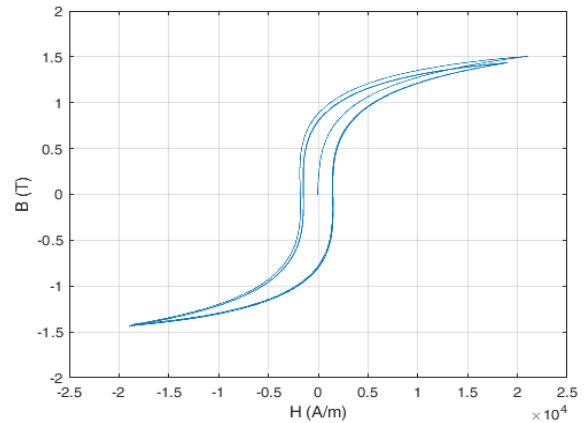
Şekil 2. Ters Jiles-Atherton modelinin Matlab/Simulink benzetimi

Bu çalışmada kullanılan 220/110 V, 50 Hz'lik transformatörün ve Jiles-Atherton modelinin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Transformatör ve Ters Jiles-Atherton parametreleri

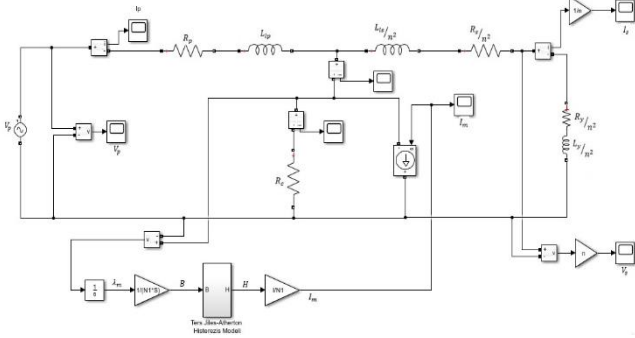
Transformatör	Ters Jiles-Atherton
$N_p=1000$, $N_s=500$	$a=1290 \text{ A/m}$
$R_p=2,5 \Omega$, $R_s=1 \Omega$	$\alpha=0,025$
$L_{lp}=2.10^{-3} \text{ H}$, $L_{ls}=2.10^{-3} \text{ H}$	$k=5000 \text{ A/m}$
$R_c=1500 \Omega$, $S=10 \text{ cm}^2$	$c=0,89$
$l=40 \text{ cm}$	$M_s=1,7.10^6 \text{ A/m}$

Şekil 2'deki B ile gösterilen girişe sinüzoidal bir sinyal uygulanarak elde edilen B-H değişimi Şekil 3'te görülmektedir. Akıdaki hızlı değişim doyma bölgesinde doğrusal bölgeye göre daha yüksektir. Bu durum doğrusal bölgedeki geçirgenliğin doyma bölgesindeki kadar büyük olduğu anlamına gelir.



Şekil 3. Ters Jiles-Atherton modeli için B-H değişimi

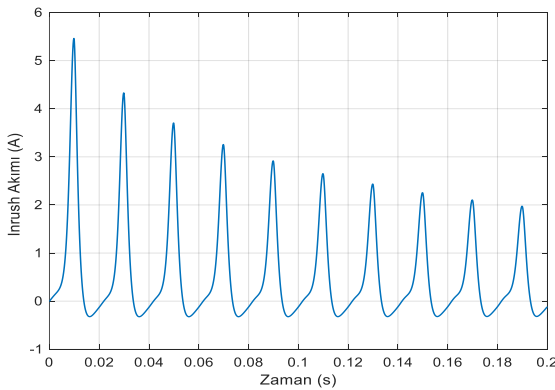
Doyum etkileri göz önüne alınarak oluşturulan tek fazlı transformatörün Matlab/Simulink benzetimi Şekil 4'de görülmektedir.



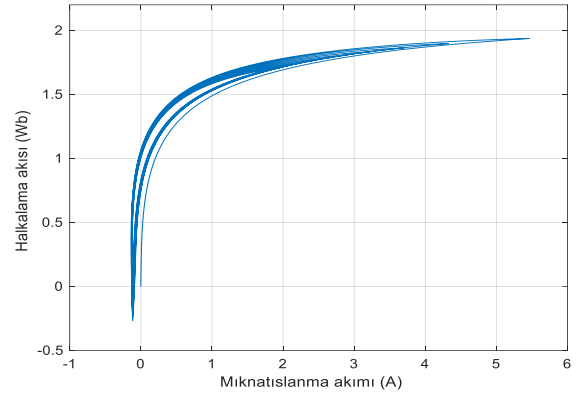
Şekil 4. Tek fazlı transformatörün Matlab/Simulink modeli

Transformatörün enerjilendirilmesi sırasında kaynak geriliminin başlangıç durumu ve demir çekirdeğe bağlı olarak akım, gerilim ve akı arasındaki ilişkide normal duruma göre bir dengesizlik meydana gelecektir. Enerjilenme anındaki dengesizlik düzeyine bağlı olarak akı ve akım, kısa sürede normal şartlara ulaşacak şekilde değişir. Bu kararsızlığı çözmek için gereken süre, transformatörün ne kadar hızlı enerji alabileceğine bağlı olarak birkaç döngüden birkaç milisaniyeye kadar değişebilir. Transformatöre enerji verildiği anda demir çekirdekte artık akı yoksa hem akı hem de akım sıfır değerinden değişmeye başlayacaktır. Aksi takdirde, demir çekirdekte artık akı varsa, akı demir çekirdekte zaten mevcut olanın üzerine eklenecektir ve yalnızca akım sıfır değerinden değişmeye başlayacaktır.

Şekil 4'teki model yüksüz olarak çalıştırılarak kaynak geriliminin farklı enerjilendirme açıları için enerjilendirme akımının (inrush akımı) etkileri incelenmiştir. Kaynak geriliminin 0°'lik enerjilendirme açısı için enerjilendirme akımının değişimi Şekil 5'de görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde primer akımının (enerjilendirme akımı olarak kabul edilebilir) tepe ani akım değeri, primer anma akımından neredeyse 3 kat daha yüksektir. Miknatıslanma akımının halkalama akısı ile olan histerezis ilişkisi Şekil 6'da verilmiştir. Ani akım yüksek olduğunda transformatörün doyma bölgesinde çalıştığını Şekil 6 için söyleyebiliriz.

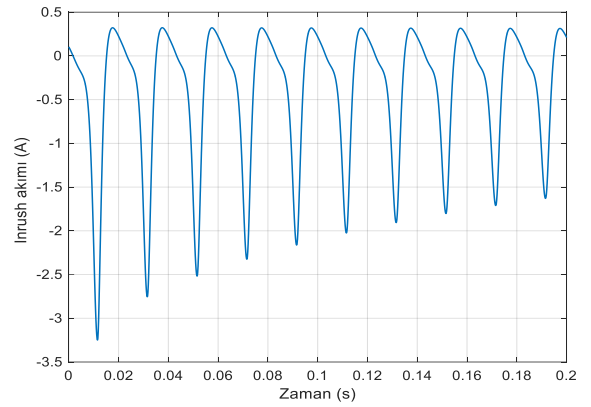


Şekil 5. Enerjilendirme akımının zamana bağlı değişimi (0°'lik enerjilendirme açısı için)

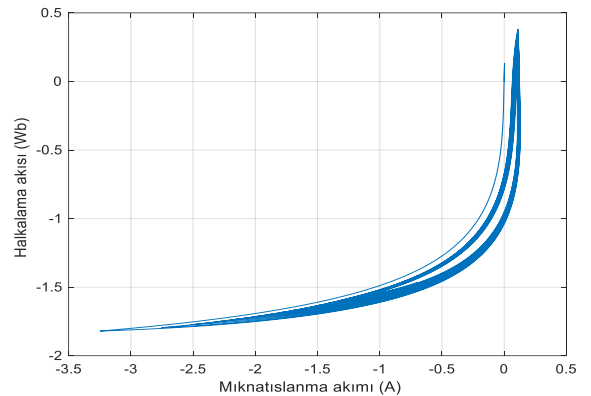


Şekil 6. Halkalama akısının miknatıslanma akımına göre değişimi (0°'lik enerjilendirme açısı için)

Kaynak geriliminin 150°'lik enerjilendirme açısı için enerjilendirme akımının değişimi Şekil 7'de, miknatıslanma akımının halkalama akısı ile olan histerezis ilişkisi ise Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde kalkış akımının değerine etkisi açısından transformatöre enerji verilirken enerjilendirme açısının önemli olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 7. Enerjilendirme akımının zamana bağlı değişimi (150°'lik enerjilendirme açısı için)



Şekil 8. Halkalama akısının miknatıslanma akımına göre değişimi (150°'lik enerjilendirme açısı için)

Nonlinear Yüklerin Transformator Üzerine Etkileri

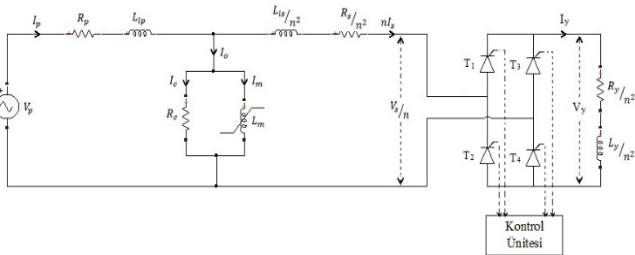
Doğrusal olmayan yükler sürekli olarak artmaktadır. Önümüzdeki 10 yıl içerisinde kamu hizmetleri sistemlerindeki yüklerin %60'ından fazlasının doğrusal olmayan yük olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca elektronik yükteki artışın büyük bir kısmı konut sektörü ve ev aletlerini kapsamaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin yaygın kullanımı, güç dağıtım transformatorlerinin çalışmasına yönelik endişe verici durumlara neden olur. Göze çarpan etkiler arasında manyetik sargının ve transformator çekirdeğinin çalışma sıcaklığının yükselmesi yer alır. Bu da transformatorün çalışma kapasitenin düşmesine yol açar. Güç transformatorlerinin artık çok fazla doğrusal olmayan özelliklere sahip yükleri beslemek zorunda olması, ek kayıpların artmasına neden olur [21].

Elektrik güç sistemlerinin sadece sinüzoidal akım ve gerilimlere göre değil aynı zamanda doğrusal olmayan ve elektronik anahtarlama yükleri için de tasarlanması gerekir. Son zamanlarda bu tür yüklerde bir artış olmuştur ve bunlar harmonik kirliliğe neden olabilir, akım ve gerilim dalga biçimlerini bozabilir, rezonans oluşturabilir, sistem kayıplarını artırabilir ve elektrikli ekipmanın kullanım ömrünü kısaltabilir. Harmoniklerin, belirli bir güç kalitesinin sağlanmasında en önemli sorunlardan biridir. Harmonik üretiminin ve ölçümlerinin dikkatli bir analizinin yapılması ve zararlı etkilerinin kabul edilebilir seviyelere sınırlandırılması gerekir [22].

Günümüzde kullanılan birçok uygulama için DC gücüne dönüşüm yapmak gerekir. Özellikle bilgisayarlar, video ekipmanları, akü şarj cihazları, UPS (kesintisiz güç kaynakları) için elektroliz sistemleri, DC sürücü ve benzer uygulamalar için güç dönüşümü yapmak gerekir [23]- [24].

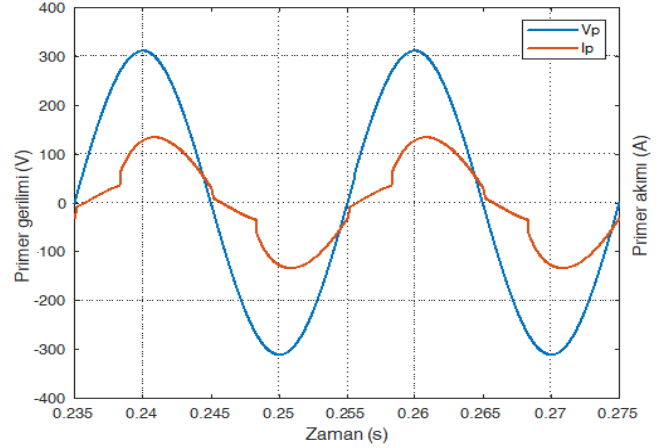
Güç sistemlerindeki harmonikler, ferrezonans, manyetik doyum, eş zamanlı olmayan rezonans ve doğrusal olmayan ve elektronik olarak anahtarlama yükleri gibi çeşitli durumlardan kaynaklanır. Doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonikler daha baskındır. Birçok araştırmacı doğrusal olmayan yüklerin arttığı modern uygulamaların etkisiyle güç sisteminde oluşan harmoniklerin analizi ve eliminasyonu ile ilgili araştırmalar yapmaktadırlar [25].

Transformator çıkışına kontrollü tam dalga doğrultucu bağlanması durumundaki devre Şekil 9'da görülmektedir.

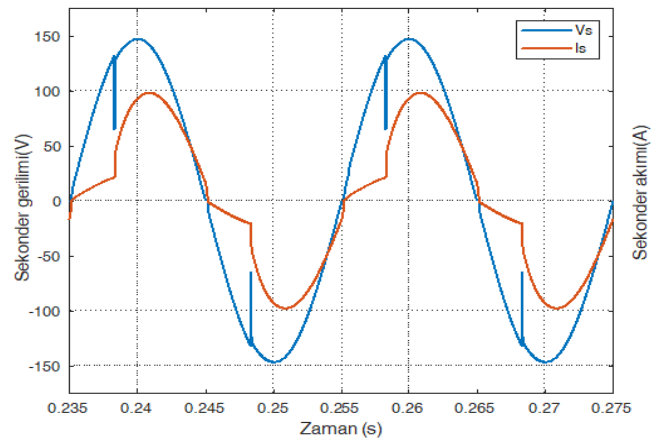


Şekil 9. Tek fazlı transformatörden beslenen tam dalga kontrollü doğrultucu devre şeması

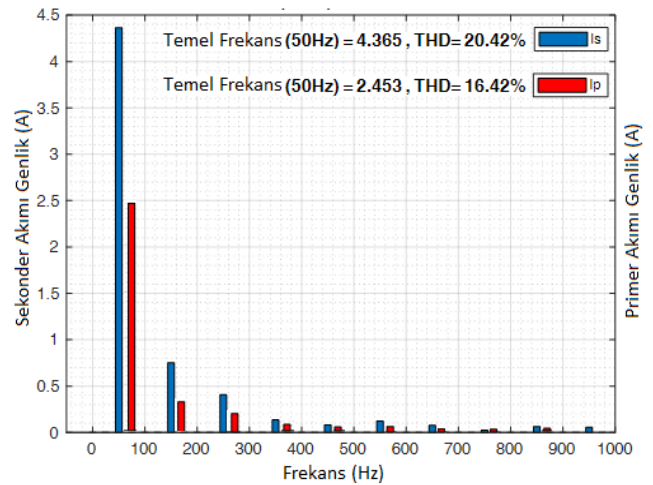
Şekil 9'daki devre $R_y=50 \Omega$, $L_y=50 \text{ mH}$ 'lik indüktif yük durumu ve tetikleme açısı 60° için çalıştırıldığında transformatorün primer gerilimi ve primer akımının değişimi Şekil 10'da, sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi Şekil 11'de, sekonder ve primer akımının harmonik değişimi ise Şekil 12'de görülmektedir.



Şekil 10. Primer gerilimi ve primer akımının değişimi (RL yükü ve tetikleme açısı 60° için)



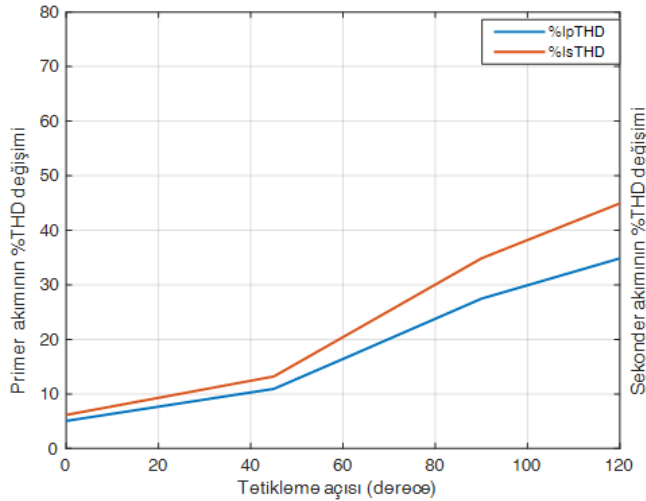
Şekil 11. Sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi (RL yükü ve tetikleme açısı 60° için)



Şekil 12. Sekonder ve primer akımının harmonik analizi (RL yükü ve tetikleme açısı 60° için)

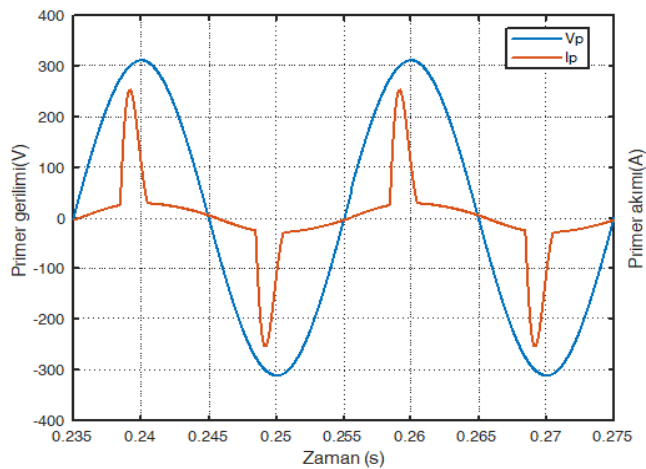
Sekonder ve primer akım dalga şekillerinin harmonik spektrumlarını gösteren Şekil 12 incelendiğinde temel frekansın (50 Hz) üçüncü, beşinci ve yedinci katına karşılık gelen harmoniklerin daha baskın olduğu tek harmonikleri içerdiği görülmektedir. Bu harmonikler trafo ömrünün kılmasına ve güç kalitesinin bozulmasına yol açacaktır.

RL yük durumu için doğrultucu tetikleme açısının 0° - 120° aralığında değiştirilmesiyle sekonder ve primer akımlarının toplam harmonik bozunum değişim oranı (%THD) elde edilerek Şekil 13'de gösterilmiştir. Tetikleme açısı arttıkça %THD değerinin arttığı açıkça görülmektedir.

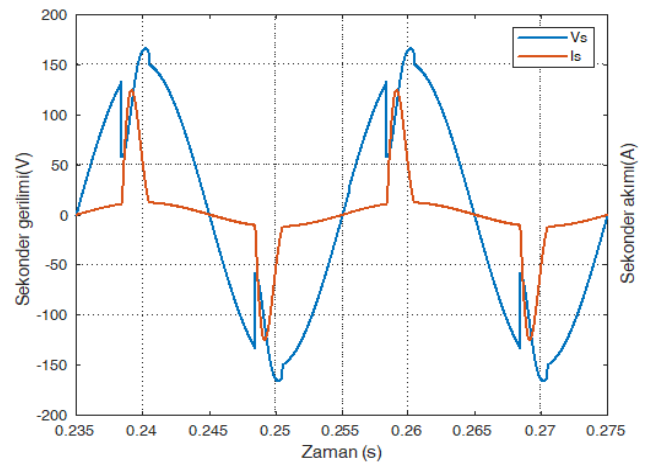


Şekil 13. Sekonder ve primer akımının %THD değişimi (RL yükü ve tetikleme açısı 0° - 120° aralığı için)

Şekil 9'daki devre çıkışındaki $R_v=100 \Omega$ 'luk dirence paralel $C=200 \mu F$ 'lık kapasite bağlanması durumunda ve tetikleme açısının 60° olma durumu için çalıştırıldığında transformatörün primer gerilimi ve primer akımının değişimi Şekil 14'de, sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi Şekil 15'de, sekonder ve primer akımının harmonik değişimi ise Şekil 16'da görülmektedir.

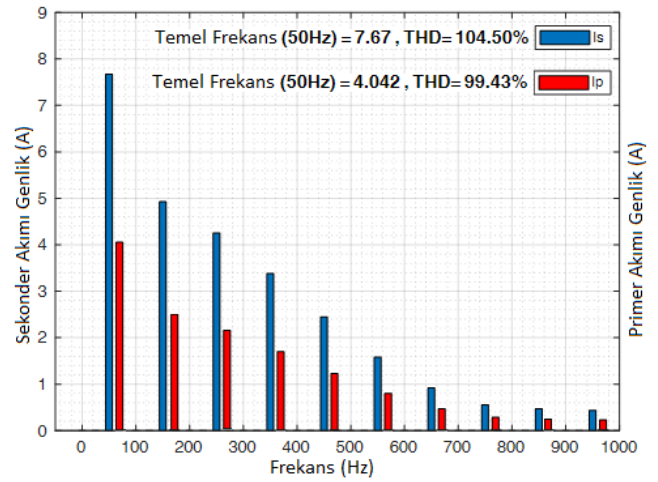


Şekil 14. Primer gerilimi ve primer akımının değişimi (RC yükü ve tetikleme açısı 60° için)



Şekil 15. Sekonder gerilimi ve sekonder akımının değişimi (RC yükü ve tetikleme açısı 60° için)

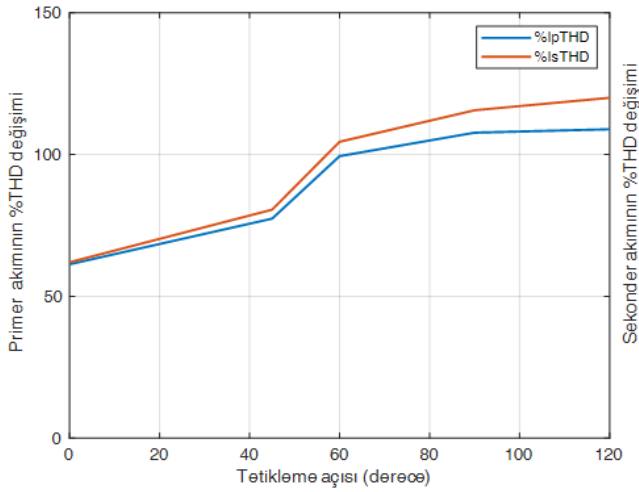
Şekil 15'de, sekonder terminallerdeki voltaj çökmesi, doğrultucunun filtre kapasitörünün şarj edildiği zamana karşılık gelir ve transformatörün kaçak indüktansından kaynaklanır. Bu durum, kaynaktan direkt beslendiği için primer gerilim dalga şeklinde (Şekil 14) görülmez.



Şekil 16. Sekonder ve primer akımının harmonik analizi (RC yükü ve tetikleme açısı 60° için)

Şekil 16 tetikleme açısının 60° ve RC yük durumu için sekonder ve primer akım dalga şekillerinin harmonik spektrumlarını gösterir. Temel frekansın üçüncü, beşinci, yedinci ve dokuzuncu katına karşılık gelen harmoniklerin daha baskın olduğu tek harmonikleri içerdiği Şekil 16'dan açıkça görülmektedir.

RC yük durumu için doğrultucu tetikleme açısının 0° - 120° aralığında değiştirilmesiyle sekonder ve primer akımlarının toplam harmonik bozunum değişim oranı (%THD) elde edilerek Şekil 17'de gösterilmiştir. Burada (Şekil 17) tetikleme açısı arttıkça %THD değerinin artış oranının RL yük durumuna göre (Şekil 13) daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 17. Sekonder ve primer akımının %THD değişimi (RC yükü ve tetikleme açısı 0°-120° aralığı için)

Şekil 12 ve 13'de gösterilen harmonik spektrumlar ve THD değişimi, Şekil 16 ve 17'dekilerden çok daha iyidir. Çünkü endüktansın yük akımı üzerindeki filtre etkisi kapasitörden daha etkilidir.

Sonuç

Histerezis, doyum ve ani akım etkileri uyarma akımı dalga biçimini bozar ve geçici durumlar sırasında transformatörün davranışı üzerinde önemli bir rol oynarlar. Bu etkileri içeren tek fazlı transformatör modeli ters Jiles-Atherton yöntemi kullanılarak oluşturuldu. Önerilen model kolay uygulanabilir ve hesaplamalarda kolaylık sağlar.

Aşırı ani akımlar transformatörü koruyan diferansiyel rölenin yanlışlıkla açılmasına ya da arızaya neden olabilir. Yüksek ani akımlar gerilim düşüşlerine ve mekanik strese neden olabilir ve dolayısıyla güç kalitesinin ve transformatör ömrünün kısalmasına yol açabilir. Enerjilendirme açısının ani akım üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak önerilen model üzerinden ortaya konmuştur.

Doğrusal olmayan yük koşullarının transformatör üzerindeki etkileri tek fazlı kontrollü doğrultucunun farklı tetikleme açıları ve farklı yük durumları için analiz edilmiştir. Farklı yük durumları için transformatörün giriş çıkış büyüklüklerine ait harmonik analiz ve toplam harmonik bozunum değişim oranları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. RL yük durumu için elde edilen harmonik spektrumlar ve THD değişimi, RC yük durumuna göre daha iyi çıkmıştır. Benzer şekilde RC yük durumunda tetikleme açısı arttıkça %THD değerinin artış oranının RL yük durumuna göre çok daha yüksek olduğu açıkça ortaya konmuştur.

Kaynaklar

- [1] Moses, Paul S., and Mohammad AS Masoum. Experimental and simulation analysis of ferroresonance in single-phase transformers considering magnetic hysteresis effects. In: *IEEE PES General Meeting*. IEEE, 2010. p. 1-6.
- [2] Thanawarithorn, Rujirawat, and Pichai Aree. An extension of Takács model for hysteresis loop representation of single-phase transformer. In: *2014*

11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE, 2014. p. 1-5.

- [3] Santos, Filipe Freire, et al. Non-linearity of Hysteresis and Eddy Current Losses of Single-phase Distribution Transformers. In: *2021 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. IEEE, 2021. p. 626-630.
- [4] Mayergoyz, Isaac. Mathematical models of hysteresis. *IEEE Transactions on magnetics*, 1986, 22.5: 603-608.
- [5] Abba, Gado ESR Dr, and GAD Jeng Hassan ABO. Effect of types of loads in rating of transformers supplying harmonic-rich loads. In: *CIREED 2019, 21st International Conference on Electricity Distribution*. 2011. p. 150-151.
- [6] Subjak, Joseph S., and John S. Mcquilkin. Harmonics-causes, effects, measurements, and analysis: an update. *IEEE transactions on industry applications*, 1990, 26.6: 1034-1042.
- [7] Fakhrian, Ali, et al. De-rating of transformers under non-sinusoidal loads: modeling and analysis. In: *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2019. p. 1-5.
- [8] Khristiana, Harrij Mukti, et al. Analysis of Loss on Single-Phase Dry Transformers With Non-Linear Load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 5.8: 113.
- [9] Rinas, I. Wayan, I. Made Suartika, and Anak Agung Maharta Pemayun. Analysis of the increase of transformer power losses due to the operation of unbalanced nonlinear loads. *J. Electr. Electron. Inform.*, 2018, 2: 38.
- [10] Arrillaga, Jos, and Neville R. Watson. *Power system harmonics*. John Wiley & Sons, 2004.
- [11] Pottker, Fabiana, and Ivo Barbi. Power factor correction of non-linear loads employing a single phase active power filter: control strategy, design methodology and experimentation. In: *PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972*. IEEE, 1997. p. 412-417.
- [12] Roubal, Z., and V. Smejkal. Determination of parameters in the Jiles-Atherton model for measured hysteresis loops. In: *The 9th International Conference MEASUREMENT 2013 was organized by the Institute*

- of Measurement Science, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia. 2013. p. 207.
- [13] Pop, N., and O. Caltun. Jiles-Atherton magnetic hysteresis parameters identification. *Acta physica polonica A*, 2011, 120.3: 491-496.
- [14] Bai, Baodong, Jiayin Wang, and Keqing Zhu. Identification of the Jiles-Atherton model parameters using simulated annealing method. In: *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*. IEEE, 2011. p. 1-4.
- [15] Unniachanparambil, Greeshma Mohan, and Shrikrishna V. Kulkarni. Comparison of Dynamic Loss Inclusion under Asymmetrical Minor Loops using Lavers Formula and Inverse Jiles-Atherton Model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2023.
- [16] Valadkhan, Sina, Kirsten Morris, and Amir Khajepour. Review and comparison of hysteresis models for magnetostrictive materials. *Journal of intelligent material systems and structures*, 2009, 20.2: 131-142.
- [17] Benabou, Abdelkader, Stéphane Clénet, and Francis Piriou. Comparison of the Preisach and Jiles-Atherton models to take hysteresis phenomenon into account in finite element analysis. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2004, 23.3: 825-834.
- [18] Toman, Matej, et al. Nonlinear model of a distribution transformer appropriate for evaluating the effects of unbalanced loads. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320.20: e1011-e1015.
- [19] Altun, Hüseyin, Sedat Sünter, and Ömür Aydoğmuş. Modeling and analysis of a single-phase core-type transformer under inrush current and nonlinear load conditions. *Electrical Engineering*, 2021, 1-12.
- [20] Sadowski, N., et al. An inverse Jiles-Atherton model to take into account hysteresis in time-stepping finite-element calculations. *IEEE transactions on magnetics*, 2002, 38.2: 797-800.
- [21] Nadhem Abbas Al-Mousaoy, Zainab. Effect of Non-Linear Load Harmonics on Single phase Transformer Losses and Design Active Filter. *Engineering and Technology Journal*, 2011, 29.11: 2143-2155.
- [22] Harmonics, Power System. Power system harmonics: an overview. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, 8: 2455-2460.
- [23] Baran, Mesut E., and Nikhil R. Mahajan. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges. *IEEE transactions on industry applications*, 2003, 39.6: 1596-1601.
- [24] Shahl, Suad Ibrahim. Simulation and Analysis Effects of Nonlinear Loads in the Distribution Systems. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 2019, 10: 888-892.
- [25] Das, J. C. *Power system harmonics and passive filter designs*. John Wiley & Sons, 2015.



Derin Öğrenme ve Özellik Seçimi Yaklaşımları Kullanılarak Göz Hastalıkları Tespiti

Eye Disease Detection Using Deep Learning and Feature Selection Approaches

Ahmet Ciran¹, Erdal Özbay^{2*}

¹ Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, aciran@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0280-5542>

² Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, erdalozbay@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9004-4802>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Nisan 2024
Revizyon 30 Nisan 2024
Kabul 1 Mayıs 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Göz hastalıkları, Derin öğrenme,
Özellik seçimi, PSO, Bayesian

ÖZ

Göz sağlığı, önemli bir halk sağlığı konusudur ve göz hastalıkları dünya çapında ciddi sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Göz hastalıkları, görme yeteneğini etkileyebilen ve yaşam kalitesini önemli ölçüde azaltabilen çeşitli sağlık sorunlarıdır. Bunlar arasında normal göz sağlığı, glukom, diyabetik retinopati ve katarakt önemli yer tutmaktadır. Bu hastalıkların erken tanınması ve uygun tedavi yöntemlerinin uygulanması, göz sağlığının korunması ve görme kayıplarının en aza indirilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Son dönemlerde, göz hastalıklarının teşhisi için yapay zekâ tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu teknikler, görüntü analizi ve derin öğrenme gibi ileri algoritmaları içerir ve hastalıkların erken teşhisi ve tedavisi için önemli bir araç haline gelmektedir. Bu çalışmada, göz hastalıklarının fundus görüntülerinden doğru teşhis edilmesi için derin öğrenme ve özellik seçimi yöntemlerinin kombinasyonu yoluyla metasezgisel yöntemlerle optimize edilmiş bir metodoloji geliştirilmiştir. Bu çalışmada, dört sınıflı bir veri setinden elde edilen görüntüler üzerinde özellik çıkarımı için önceden eğitilmiş derin öğrenme mimarileri olan ResNet101, DenseNet201 ve DarkNet53 kullanılmıştır. Bu mimarilerden elde edilen özellikler birleştirilerek bir hibrit özellik havuzu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu havuz, görüntülerin daha etkili bir şekilde temsil edilmesini sağlamak için kullanılmıştır. Elde edilen özelliklerin içinden önemsiz olanları elemek için metasezgisel bir optimizasyon yöntemi olan parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. Görüntülerin sınıflandırılması için makine öğrenmesi yöntemlerinden olan destek vektör makinesi (SVM) tercih edilmiştir. SVM'nin performansını artırmak amacıyla, hiperparametrelerin seçimi için Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu optimizasyon tekniği, SVM'nin daha iyi bir şekilde ayarlanmasına ve veri setine uyum sağlamasına yardımcı olmuştur. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, sınıflandırma doğruluğu %93.8 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin göz hastalıklarının tespitinde etkili bir araç olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu çalışma, yapay zeka tekniklerinin tıbbi görüntüleme alanında önemli bir rol oynayabileceğini ve göz hastalıklarının erken teşhisinde kullanılabilecek potansiyel bir araç olduğunu vurgulamaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 April 2024
Received in revised form 30 April 2024
Accepted 1 May 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Eye diseases, Deep learning,
Feature selection, PSO, Bayesian

Doi: 10.24012/dumf.1465929

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Eye health is a significant public health concern, and eye diseases pose serious health problems worldwide. Eye diseases encompass various health issues that can affect vision and significantly reduce quality of life. Among these, normal eye health, glaucoma, diabetic retinopathy, and cataracts hold significant importance. Early detection of these diseases and the application of appropriate treatment methods are vital for preserving eye health and minimizing vision loss. In recent years, the use of artificial intelligence techniques for diagnosing eye diseases has become increasingly widespread. These techniques involve advanced algorithms such as image analysis and deep learning, becoming crucial tools for early diagnosis and treatment of diseases. In this study, a methodology optimized through metaheuristic methods was developed for accurately diagnosing eye diseases from fundus images using a combination of deep learning and feature selection techniques. Pre-trained deep learning architectures, including ResNet101, DenseNet201, and DarkNet53, were utilized for feature extraction from images obtained from a four-class dataset. The features obtained from these architectures were merged to create a hybrid feature pool, enhancing the effective representation of images. Particle swarm optimization (PSO), a metaheuristic optimization method, was employed to eliminate insignificant features from the obtained features. Support vector machine (SVM), one of the machine learning methods, was chosen for image classification. Bayesian optimization was utilized for hyperparameter selection to enhance SVM performance, aiding in its better adjustment and adaptation to the dataset. According to the results of experimental studies, a classification accuracy of 93.8% was achieved. These findings demonstrate that the proposed method can be effectively utilized as a tool for detecting eye diseases. This study highlights the potential of artificial intelligence techniques in medical imaging and emphasizes their role in early diagnosis of eye diseases.

Giriş

Retina, göz anatomisinin temel bir bileşenidir ve gözün arka kısmında bulunan ışığa duyarlı bir tabakadır. Retina, göz içine giren ışığı algılayarak, dış dünyadan gelen görüntüleri sinir sinyallerine dönüştürmek üzere özel olarak adapte olmuştur. Bu işlem, görsel bilgilerin beyin tarafından işlenmesi ve yorumlanması için temel bir adımdır. Retinanın görevi, aldığı ışık sinyallerini optik sinir lifleri aracılığıyla beyindeki optik kortekse iletmektir. Optik korteks, bu sinyalleri işleyerek nesnelere tanımlamamıza ve çevremizi anlamamıza yardımcı olur. Bunun için, retina sağlığı görsel algımızın temelini oluşturur ve görme yeteneğimizin korunması için hayati öneme sahiptir [1].

Erken teşhis edilmemiş olan göz hastalıkları, retinada kalıcı hasarlara neden olabilir ve bu durum geri dönüşü olmayan görme kaybına yol açabilir. Bu nedenle, göz sağlığını korumak ve görme yeteneğini sürdürmek için hastalıkların erken aşamada tespit edilmesi kritik öneme sahiptir. Erken teşhisin sağlanması, uygun tedavi yöntemlerinin zamanında uygulanmasını sağlayarak görme kaybının önlenmesine veya en aza indirilmesine yardımcı olmaktadır. Göz hastalıklarının belirtilerini ihmal etmemek ve düzenli göz muayeneleri yapmak, sağlıklı bir görme yaşamı için önemli adımlardır [2, 3].

Göz hastalıklarının teşhisinde kullanılan teknikler arasında, retina görüntülerinin analiz edilmesine odaklanan birkaç yaygın yöntem bulunmaktadır. Bunların başında, "color fundus photography" (CFP) gelmektedir. CFP, retina tabakasının renkli görüntülerini oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir ve göz sağlığına ilişkin birçok detayı ortaya çıkarabilir. Bunun yanı sıra, optik koherens tomografi (OCT) gibi bir başka teknik de yaygın olarak kullanılmaktadır. OCT, göz dokularının yüksek çözünürlüklü kesitsel görüntülerini üretir ve retina tabakasındaki yapısal değişiklikleri incelemek için etkili bir araçtır. Bu teknikler, göz hastalıklarının erken teşhisinde ve tedavisinde önemli bir rol oynamaktadır, çünkü hastalıkların belirtileri ve ilerlemesi hakkında değerli bilgiler sağlarlar [4].

Göz, yaklaşık 23mm çapında, küre şeklinde bir yapıya sahiptir ve dıştan içe doğru sırasıyla sert tabaka, damar tabaka ve sinir tabakası olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Bu üç katmanın önde oluşturduğu bazı önemli yapılar arasında kornea, lens, iris, pupil ve ön kamaradır. Lens, 60'lı yaşlardan sonra saydamlığını kaybederek opaklaşmaya başlamaktadır. Lens, irisin arkasında yer alır ve göze giren ışığın retinadaki alıcı hücrelere odaklanmasını sağlamaktadır. Lensin opaklaşması ve ışık geçirgenliğinin azalması, retinadaki alıcı hücrelere yeterli miktarda görüntü ulaşmasını engeller ve sonuç olarak görme yeteneğinde azalmaya neden olmaktadır [5].

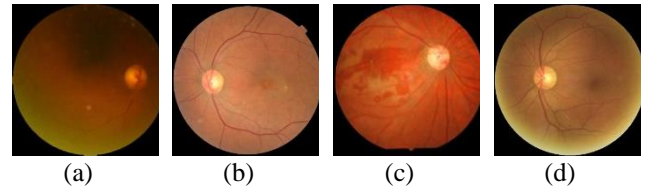
Katarakt, diyabetik retinopati ve glokom gibi göz hastalıkları, görme sağlığını ciddi şekilde etkileyebilen ve yaşam kalitesini olumsuz yönde etkileyebilen yaygın sağlık sorunlarıdır.

Katarakt, dünya çapında körlüğün önde gelen nedenlerinden biridir. 1990'lı yıllarda, Dünya Sağlık Örgütü'nün verilerine göre, körlüğün %43'ünde kataraktın etkili olduğu tespit edilmiştir, bu da 45 milyon kör insanın yaşadığı anlamına gelmektedir. Körlük, iyi gören gözde 10/200'den daha az

görme olarak tanımlanmaktadır, yani 3/60'tan az. Her yıl 5 ila 10 milyon arasında yeni katarakt vakası tespit edilmektedir. Katarakt gelişiminde yaş en belirgin faktördür ancak ırk, yüksek irtifa, diyabet, beslenme alışkanlıkları, ilaç kullanımı, kardiyovasküler hastalıklar ve uzun süreli güneş ışığına maruz kalma gibi diğer faktörler de rol oynamaktadır [6]. Katarakt, körlüğün en yaygın nedeni olduğundan, katarakt cerrahisinin tek etkili tedavi yöntemi olduğu vurgulanarak bu hastalığın tedavisine verilen önemin büyüklüğü daha iyi anlaşılabilir [7].

Diabetes Mellitus (DM), vücudun yeterli miktarda insülin üretmediği veya ürettiği insülin hormonunu etkili bir şekilde kullanmadığı durumlarda ortaya çıkan, dünya çapında yaygın görülen kronik bir hastalıktır [8]. DM şu anda yaklaşık 450 milyon insanı etkilemektedir [9]. Uluslararası Diyabet Federasyonu'na (IDF) göre DM'nin 2030 yılına kadar yaklaşık %8 oranında artması beklenmektedir [10]. 2040 yılına gelindiğinde DM hasta sayısının yaklaşık 600 milyona ulaşması ve bunların yaklaşık 200 milyonuna diyabetik retinopati (DR) tanısı konması beklenmektedir [11,12]. Diyabetin bir komplikasyonu olarak DR, değişen düzeylerde görme bozukluğuyla birlikte görme kaybına ve körlüğe yol açabilen bir göz retinası hastalığıdır [13].

Glokom, genellikle optik sinirin kalınlaşmasıyla meydana gelen bir durumdur ve dünya çapında yaygın körlük nedenlerinden biridir [14]. Bu hastalık, optik sinire zarar vererek geri dönüşü olmayan körlüğe yol açabilir ve küresel olarak körlüğün başlıca sebeplerinden biridir. Ancak, durum erken teşhis edilip tedavi edilirse, görme kaybı önlenir veya en azından geciktirilir. 2013 yılında dünya genelinde yaklaşık olarak 64,3 milyon kişinin glokom olduğu tahmin edilerek bu sayının 2040 yılında yaklaşık olarak 112 milyona ulaşması beklenmektedir. Bu durum, 40 ila 80 yaş arasındaki insanlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır [15]. Şekil 1'de, fundus görüntüsü üzerinden göz hastalıkları görseleştirilmiştir.



Şekil 1. Fundus görüntülerinden (a) Katarakt hastalığı (b) Diyabetik retinopati hastalığı (c) Glokom hastalığı (d) Normal göz

Derin öğrenme modelleri, özellikle Evrişimli Sinir Ağları (ESA), tıbbi görüntü analizi alanında yeni ve etkili bir perspektif sunmaktadır, bu da onları giderek daha popüler hale getirmektedir. Bu modeller, çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılarak önemli sonuçlar elde etmektedir. Örneğin, cilt kanseri sınıflandırmasında derin öğrenme yöntemlerinin kullanılması, tanı sürecini geliştirme ve tedavi planlarını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Aynı şekilde, otizm gibi karmaşık genetik etkileşimlerin değerlendirilmesinde de derin öğrenme modelleri büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, yoğun bakım ünitelerinde hasta izleme ve tahmin etme gibi kritik görevlerde de makine öğrenmesi yöntemleri başarıyla uygulanmaktadır. Bu gelişmeler, tıbbi

uygulamalarda derin öğrenme ve makine öğrenmesi tekniklerinin kullanımının artmasını teşvik etmektedir. Bu teknolojilerin daha geniş bir şekilde benimsenmesiyle birlikte, tıbbi tanı ve tedavi süreçlerindeki verimliliğin ve doğruluğun artması beklenmektedir [16-18].

Bu çalışma, önemli biyolojik etkiye sahip olan göz hastalıklarını tespit etmek için derin öğrenme gibi yapay zeka yöntemlerini kullanmayı hedeflemektedir. Bu alanda yapılan birçok araştırma, literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır. Göz hastalıklarının erken teşhisi ve tedavisi, görme sağlığının korunması ve körlük riskinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Derin öğrenme gibi yapay zeka teknikleri, büyük miktarda veriyi analiz etme ve karmaşık desenleri tanıma konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle, göz hastalıklarının tespitinde derin öğrenme gibi ileri tekniklerin kullanılması, teşhis sürecini iyileştirme ve daha etkili tedavi stratejileri geliştirme potansiyeline sahiptir. Makalemizin literatüre katkıları şöyle özetlenebilir:

- Fundus görüntülerinden göz hastalıklarının etkili ve doğru teşhisi için otomatik bir yöntem geliştirilmesi.
- Hastalıkların farklı özelliklerinin öğrenilmesi için ön-eğitilmiş modellerin hibrit bir şekilde kullanılması.
- Öznitelik boyutunun metasezgisel bir yöntem olan PSO ile indirgenmesi.
- Bayesian yöntemi ile hiperparametre optimizasyonu sağlanan SVM sınıflandırıcısı ile %93.8 doğruluk oranı ile göz hastalıklarının sınıflandırılması.

İlgili Çalışmalar

Son yıllarda ESA, göz hastalıklarının tespiti alanında araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Bu derin öğrenme modelleri, fundus görüntüleri ve diğer tıbbi görüntüler üzerinde yapılan çalışmalarda önemli bir rol oynamaktadır. Göz hastalıklarının erken teşhisinin önemi göz önüne alındığında, ESA'nın bu alandaki kullanımı büyük bir öneme sahiptir. ESA modelleri, fundus görüntülerindeki patolojik özellikleri tanımlama ve sınıflandırma konusunda etkili bir şekilde çalışmaktadır. Bu teknolojiler, glokom, diyabetik retinopati, katarakt ve diğer göz hastalıklarının teşhisinde ve tedavisinde önemli bir araç olmuşlardır.

Hatanaka ve ekibi, glokom tespiti sırasında kupa alanının zor tespit edilmesi sorununa odaklanarak, optik disk üzerinde dikey bir profil kullanarak çanak-disk oranını ölçmek için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemde, ilk olarak görüntülerden kan damarları temizlenmiş ve ardından disk kenarının tespiti için Canny kenar algılama filtresi kullanılmıştır. Daha sonra, renkli görüntü verisi üzerinde kupa-disk oranı hesaplanmıştır. Toplamda 79 görüntü verisinin kullanıldığı bu yöntemde, 25'i glokom vakası olan hastalardan elde edilen verilere dayanarak %80 hassasiyet ve %85 özgüllük başarımları elde edilmiştir [19].

Carrillo ve ekibi, Kolombiya'da yaygın görülen göz tansiyonu hastalığını ele almış ve bu hastalığın otomatik olarak tespiti için yapay zekâ tabanlı yeni bir hesaplama yöntemi önermiştir. Bu yeni yöntem, kupa ve disk boyutu arasındaki eşik değere dayalı olarak yapılan yeni ölçümler sayesinde,

literatürdeki diğer disk segmentasyon yöntemlerine kıyasla daha yüksek bir başarı elde etmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, yeni yöntem glokom tespitinde %88.5 başarı göstermiştir [20].

Pratt ve diğerleri, ESA'nın DR teşhisinde etkili bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu araştırmalardan birinde, Kaggle veri bilimi platformunda 8 bin görüntüyü içeren bir DR sınıflandırması yapılmıştır. Bu kapsamda, veri artırma teknikleri kullanılarak MAs, HEMs ve retinal EXs gibi karmaşık DR lezyon özelliklerini tanımlamak için bir ESA mimarisi geliştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, 5000 doğrulama setinden elde edilen verilerle değerlendirilmiş ve %75 doğruluk ile %95 hassasiyet değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, ESA tabanlı yaklaşımların DR teşhisinde etkili bir araç olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir [21].

Özbay araştırmasında, DR aşamalarının otomatik olarak tanınması için yeni bir çok katmanlı mimari kullanılarak aktif derin öğrenme (ADL) yöntemi kullanılmışlardır. Bu yöntemde, retinal lezyonların tespitini kolaylaştırmak için öncelikle görüntü, yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılarak segmente edilmekte ve eşik değeri görüntü histogramının sonuçlarına göre belirlenmektedir. Ayrıca, otomatik olarak segmente edilmiş retinal özelliklerin çıkarılması için etiketleme verimli bir ESA mimarisi olan ADL-ESA geliştirilmiştir. Bu model, iki aşamalı bir sürece sahiptir. İlk olarak, eğitim örneklerinde temel doğruluk etiketleri kullanılarak basit veya karmaşık retinal özellikler öğrenilmekte ve ikinci aşamada, önemli lezyon özelliklerini ve retinal görüntü içinde ilgi alanlarını belirlemek için kullanışlı maskeler sağlanmaktadır. EyePacs veri setine uygulanan ADL-ESA modeli, 35122 retinal görüntü içeren veri setinde %99.66 doğruluk, %93.76 özgüllük, %96.71 duyarlılık ve %94.58 F-ölçümü elde etmişlerdir [22].

Asaoka ve arkadaşları, çeşitli özellikleri tanımlayarak glokom tespiti için yeni bir derin öğrenme algoritmasının bir versiyonunu geliştirmişlerdir. Bu özellikler arasında göz için toplam 52, ortalama ve standart sapma değerleri bulunmaktadır. Araştırmacılar, sınıflandırıcı olarak derin sinir ağı (FNN) kullanmışlardır. Daha sonra bu sınıflandırıcıyı rastgele ormanlar, gradyan artırma, destek vektör makineleri ve sinir ağları gibi diğer makine öğrenimi sınıflandırıcıları ile birleştirmişlerdir. Sonuç olarak, araştırmacılar glokom tespiti için derin bir topluluk çözümü sunmuşlardır. Derin FNN sınıflandırıcısı kullanarak %92.5 AUC değeri elde etmişlerdir [23].

Ağalday ve Çınar yaptıkları çalışmada otomatik katarakt teşhisi için ESA ve derin artık ağlar (DRN) gibi sınıflandırma yöntemleri kullanılmıştır. Veri seti, 5000 hastanın sağ ve sol gözlerine ait renkli fundus fotoğraflarını içermekte olup, doktorların her hastanın gözüne uyguladığı teşhislere yönelik anahtar kelimeleri içermektedir. Bu veri seti, hastaların 8 farklı etikete göre sınıflandırıldığı ve renkli fundus görüntüleri kullanılarak farklı katarakt semptomlarının özelliklerinin belirlendiği bir yapıya sahiptir. Yapılan analizler sonucunda, DRN yönteminin ESA yöntemine kıyasla daha yüksek bir doğruluk oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, katarakt teşhisinde DRN yönteminin etkinliğini vurgulamaktadır [24].

Metin ve Karasulu çalışmalarında halka açık OCT veri setleri üzerinde deneyler yapılmıştır. ESA'ya dayalı ResNet50 ve MobileNetV2 modelleri, yüksek sınıflandırma performansı elde ettikleri için kullanılmıştır. Çeşitli retina hastalıklarının sınıflandırılmasında derin öğrenme tabanlı mimariler oluşturulmuş ve test edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, her iki model de dikkate alındığında ortalama %81 ila %94 makroskopik doğruluk elde edilmiştir. Çalışmada test edilen ResNet50 ve MobileNetV2 modellerinin ortak değerlendirilmesi sonucunda ortalama F1 puanı elde edilmiş; CNV için 0.75, Drusen için 0.86, DME için 0.90 ve normal retina için 0.96 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında yüksek düzeyde doğruluk elde edildiği görülmüştür [25].

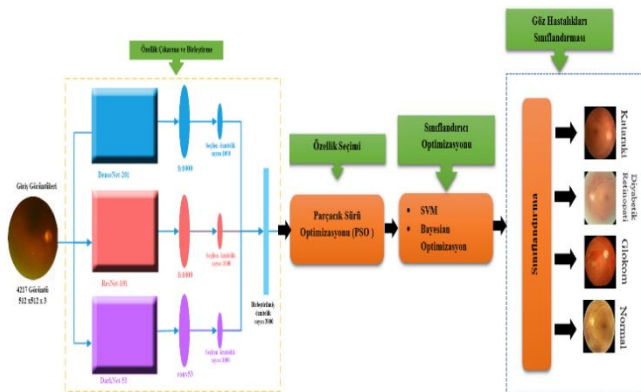
Materyal ve Metot

Bu çalışmada, görüntülerden özellik çıkarımı için geleneksel olarak kullanılan ESA tabanlı DenseNet201, DarkNet53 ve ResNet101 modelleri, 24 bitlik görüntüler üzerinde özellik çıkarma sürecinde birleştirilmiştir. Bu hibrit yaklaşım, daha kapsamlı ve detaylı bir özellik setinin elde edilmesini sağlamıştır. Elde edilen bu özellikler daha sonra PSO optimizasyon tekniği kullanılarak işlenmiş ve önemsiz özellikler çıkarılmıştır. Bu adım, sınıflandırma performansını artırmak ve gereksiz bilgi yükünü azaltmak için önemli bir adım olmuştur.

Sonraki aşamada, göz hastalıklarının tespiti için SVM modeli Bayesian yöntemiyle optimize edilmiş ve makine öğrenmesi sınıflandırıcıları olarak kullanılmıştır. Bu yöntem, SVM'de kullanılan hiperparametrelerin en uygun olanını seçmek için kullanılmıştır.

Makine öğrenmesi tekniklerinin etkinliğini değerlendirmek için yapılan sınıflandırmaların test edilmesi önemlidir. Bu bağlamda, modelin performansını belirlemek için bir karmaşıklık matrisi kullanılmıştır. Bu matris daha sonra doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü gibi metriklerin hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu metrikler, modelin sınıflandırma performansını ayrıntılı bir şekilde değerlendirmek için kullanılmıştır.

Bu bölümde çalışmada kullanılan veri seti, DenseNet201, DarkNet53 ve ResNet101 ESA mimarileri, PSO, SVM makine öğrenmesi sınıflandırması ve Bayesian optimizasyon yöntemi incelenmiştir. Araştırmada önerilen yöntem Şekil 2'de verilmiştir.

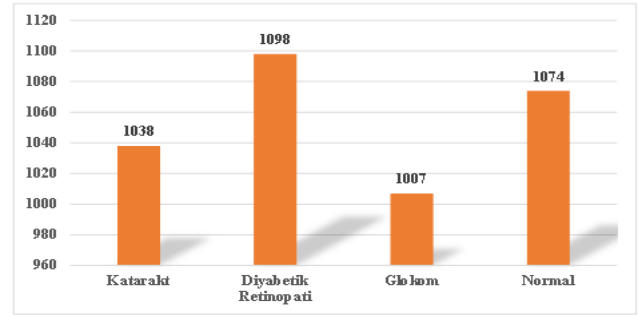


Şekil 2. Önerilen metodolojinin akış diyagramı

Veri Seti

Bu araştırmada, kamuya açık bir veri kümesi kullanılmıştır [26]. İlgili veri kümesinde toplamda 4217 adet fundus görüntüsü bulunmaktadır. Bu görüntülerin 1038 tanesi katarakt hastalığına sahip, 1098 tanesi diyabetik retinopati hastalığına sahip, 1007 tanesi glokom hastalığına sahip ve 1074 tanesi sağlıklı gözleri temsil eden görüntülerdir. Veri setinde yer alan görüntüler 512x512 piksel, 24-bit ve renkli görüntülerdir.

Araştırmada kullanılan veri seti geniş kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve farklı göz hastalıklarının belirlenmesi için çeşitli sınıflar içeren bir yapıya sahiptir. Bu görüntülerin renkli olması, görüntü işleme algoritmalarının ve derin öğrenme modellerinin doğruluğunu artırmak için önemli bir özelliktir. Veri setindeki her sınıfa ait yeterli sayıda görüntü olması, modelin eğitiminde dengeli ve doğru sonuçlar elde etmek açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu zengin veri kümesi, araştırmanın güvenilirliğini ve etkinliğini artırmıştır. Araştırmada kullanılan veri setinin etiket sütununa göre dağılımı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Veri setinin etiket sütununa göre dağılımı

Özellik Çıkarımı

ESA mimarisi geliştirmek oldukça zaman alıcı ve kaynak gerektiren bir süreçtir. Bu süreç, geniş miktarda veri toplamayı ve karmaşık model optimizasyonlarını içermektedir. Ancak, önceden eğitilmiş ESA modellerinin transfer öğrenimi için kullanılması, daha hızlı ve verimli sonuçlar elde etmeyi mümkün kılmaktadır. MobilNet, ResNet101, DarkNet53, VGG16, DenseNet201 ve GoogleNet gibi popüler önceden eğitilmiş modeller, transfer öğrenimi için tercih edilen modeller arasındadır.

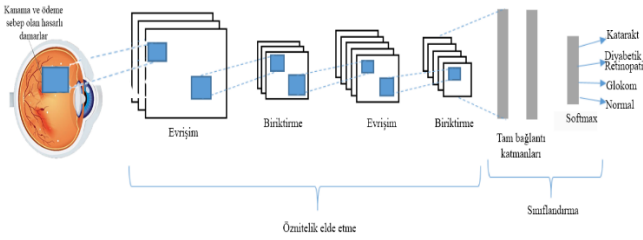
Bu araştırmada, ImageNet veri setinden önceden eğitilmiş ağırlıklar kullanarak DenseNet201, DarkNet53 ve ResNet101 gibi modeller ile özellik çıkarımı yapılmıştır. Bu yaklaşımla, mevcut modellerin görsel özelliklerini öğrenme yetenekleri, hedef görevde daha iyi performans elde etmek için kullanılmıştır. Ağırlık transferi sayesinde, mevcut modelin öğrendiği genel desenler hedef görevde de etkili şekilde kullanılarak daha hızlı ve verimli bir öğrenme süreci sağlanmıştır.

Veri Seti Sınırları (ESA)

ESA, bilgisayarlı görü ve görüntü işleme alanlarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir, özellikle görüntü içeren verilerin sınıflandırılması gibi birçok alanda etkilidir. Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network, YSA- ANN) tabanlı

olan ESA, klasik sinir ağlarından farklıdır; çünkü evrişim işlemleri, otomatik öznitelik elde etme ve çeşitli soyutlama işlemleri yapabilen katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlar, özniteliklerin çıkarılması ve soyutlama işlemleri için gerekli bilgiyi sağlarlar [27]. Görüntü işlemede önceki yöntemler, görüntülerden özellik çıkarmak için ayrı bir süreç gerektirmektedir. Ancak derin öğrenme bu ihtiyacı çözmektedir. Çünkü ağ eğitimi sırasında özellik çıkarımını otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

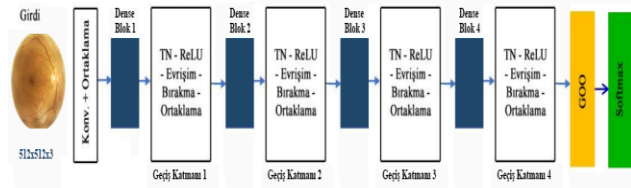
Derin öğrenme, her katmanın bir önceki katmanın çıktısını girdi olarak aldığı, katmanlar arasında sıralı bir yapıya sahip olan bir makine öğrenme algoritmasıdır. Öğrenme süreci denetlenebilir, denetlenebilir veya yarı denetlenebilir. LeCun ve ekibinin tanımına göre derin öğrenme, bir temsili öğrenme yöntemi olarak değerlendiriliyor [28]. Temsil öğrenme algoritmaları, verileri en uygun şekilde temsil edecek şekilde optimize ederler [29]. Şekil 4'te ESA'nın yapısı görülmektedir.



Şekil 4. ESA mimarisi

DenseNet Mimarisi

DenseNet modelleri, diğer ESA yapılarından önemli bir şekilde farklılık göstermektedir. Bu fark, yoğun bloktaki her katmanın, o bloktaki tüm önceki katmanlardan girdi alması ve kendi özellik haritasını sonraki katmanlara iletmesidir. Bu özellik, bilgi akışını etkili bir şekilde artırarak daha derin ve geniş model yapısının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu yapı, ağın her katmanının daha önceki katmanlardan gelen bilgiyi doğrudan kullanabilmesini sağlayarak öğrenme sürecini iyileştirerek ağın genel başarımını artırmaktadır [30]. Şekil 5'te DenseNet201 modeli gösterilmiştir.



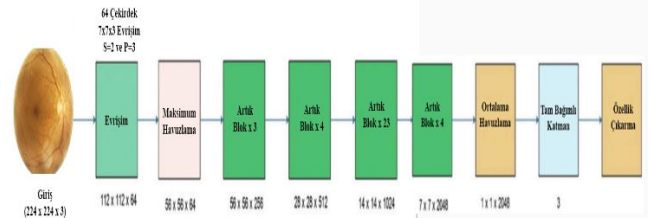
Şekil 5. ESA mimarilerinden Densenet201 modeli

Bu çalışmada, ESA mimarisinde, önceden eğitilmiş DenseNet201 modeli kullanılarak toplamda 4217 görüntüden elde edilen 1000 öznitelikli bir çıktı elde edilmiştir.

ResNet101 Mimarisi

ResNet-101, görsel olarak Şekil 6'da tasvir edilen bir evrişimli sinir ağıdır ve toplamda 101 katmandan oluşmaktadır. Bu ağ, 1 milyondan fazla görüntüyü içeren ImageNet veri tabanında önceden eğitilmiştir. Eğitim

sürecinde, bu veri seti üzerinde bilgisayarlar, yazıcılar, çeşitli hayvan türleri ve daha fazlası gibi 1000'den fazla farklı sınıfa tanıma yeteneğine sahip olacak şekilde eğitilmiştir. ResNet101 modeli, 224x224 piksel çözünürlüğündeki görüntüleri giriş olarak kabul etmektedir. Bu boyut, girdi olarak alınan görüntülerin standart çözünürlüğünü temsil eder ve ağı görüntü verilerini işlemesi ve sınıflandırması için yeterli detayı sağlar. ResNet101, derin ağ mimarisi ve önceden eğitilmiş büyük bir veri tabanıyla geniş bir ölçekte sınıflandırma görevlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilme kapasitesine sahiptir [31].

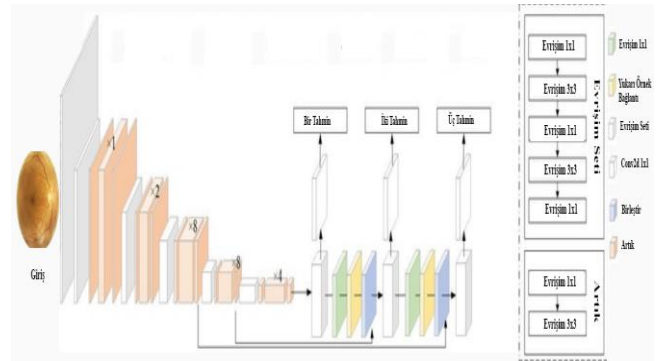


Şekil 6. ESA mimarilerinden ResNet101 modeli

Bu çalışmada, ESA mimarisi kullanılarak, önceden eğitilmiş ResNet101 modeli üzerinde 4217 görüntüden oluşan veri seti kullanılarak 1000 öznitelikli bir çıktı türetilmiştir. Bu süreçte, ResNet101 modeli üzerindeki özellik çıkarımıyla 4217 görüntünün analizi yapılarak, her görüntü için 1000 boyutlu öznitelik vektörleri elde edilmiştir.

DarkNet53 Mimarisi

Darknet53, YOLOv3 tarafından tercih edilen derin öğrenme modelidir ve genellikle nesne tanıma görevlerinde kullanılmaktadır. Bu ağ, görüntülerdeki nesnelere tanımlama ve konumlarını tahmin etme amacıyla kullanılır. Darknet53'ün kullanımı genellikle bir nesne tanıma veri kümesi oluşturularak başlar ve bu veri kümesi üzerinde ağın eğitilmesini içerir. Eğitim sürecinde, ağ veri kümesindeki nesnelere tanımlama yönelik örüntüler öğrenmektedir. Daha sonra, eğitilmiş modeli test etmek için yeni bir görüntü girdisi sağlanır ve ağ, bu görüntü üzerinde nesnelere tanımlamaya ve konumlarını tahmin etmeye çalışır. Bu aşamada, Darknet53 modeli, önceden tanımladığı nesnelere algılamak ve sınıflandırmak için öğrendiği desenleri kullanarak görüntüyü analiz eder. Şekil 7'de DarkNet53 modeli görülmektedir.



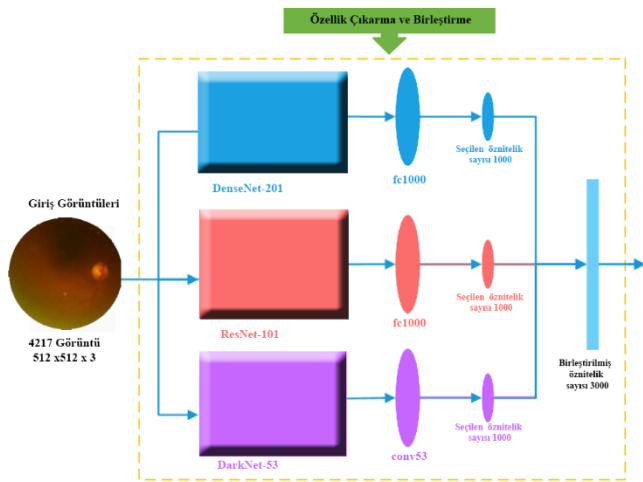
Şekil 7. ESA mimarilerinden DarkNet53 modeli

Bu çalışmada, ESA mimarisinde, 4217 görüntü kullanılarak önceden eğitilmiş DarkNet53 modeli üzerinde öznitelik

çıkarmı yapılmış ve her bir görüntü için 1000 boyutlu öznelik vektörleri oluşturulmuştur. DarkNet53 modeli sayesinde, veri setindeki her bir görüntüden gelen bilgilerin analizi sonucunda 1000 öznelikli çıktılar elde edilmiştir.

Mimari Birleştirme

Bu araştırmada, 4217 görüntü üzerinden DenseNet201, ResNet101 ve DarkNet53 mimarileri kullanılarak öznelikler çıkarılmıştır. Elde edilen öznelikler, MATLAB 2023a ortamında birleştirilerek hibrit bir model oluşturulmuştur. Bu hibrit model sayesinde, 4217 görüntüden toplamda 3000 öznelik elde edilmiştir. Şekil 8'de, bu birleştirilmiş modellerin görselleştirilmiş hali görülmektedir. Bu süreç, farklı ESA mimarilerinin öznelik çıkarımında bir araya getirilerek daha kapsamlı bir model oluşturulmasını ve veri setinden daha geniş öznelik yelpazesi elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 8. ESA mimarilerinin birleşimi

Özellik Seçimi

Özellik seçimi, bir modelin performansını iyileştirmeyi ve gereksiz veya gürültülü verileri önlemeyi amaçlayan bir süreçtir. Başarılı bir özellik seçimi, modelin genelleme yeteneğini artırabilir ve aşırı uyum riskini azaltabilir. Özellik seçimi genellikle veri madenciliği, makine öğrenimi ve istatistik gibi alanlarda kullanılır ve doğru yapıldığında modelin verimliliğini ve performansını artırabilir.

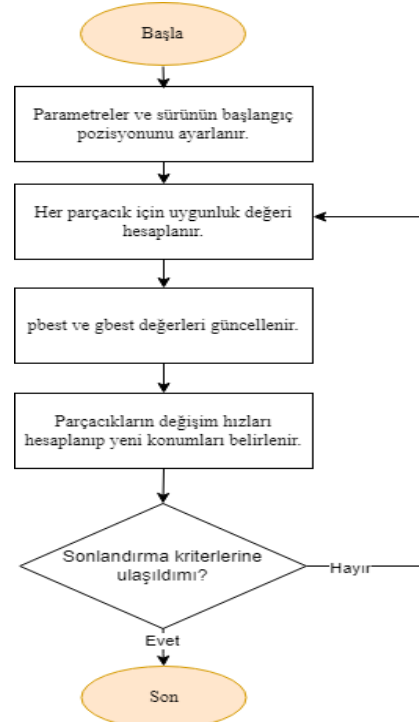
Literatürde metasezgisel yöntemler ile derin öğrenmenin birlikte kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur [32-35]. Bu araştırmada, göz hastalıkları görüntülerinden elde edilen özneliklerin sayısını azaltmak amacıyla ön eğitilmiş ESA mimarilerinden elde edilen özneliklere PSO yöntemi uygulanmıştır. Bu süreç, öznelik seçiminde optimum çözümü bulmada PSO'nun etkinliğini göstermiş ve modelin performansında belirgin bir artış sağlamıştır. ESA mimarileri ile entegre edilen PSO, öznelik sayısının azaltılmasıyla birlikte modelin genelleme yeteneğini artırarak daha başarılı sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmuştur.

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Dr. Eberhart ve Kennedy tarafından 1995 yılında önerilen bu meta-sezgisel yöntem, sürülerin davranışlarının gözlemlenmesine dayanmaktadır [36].

Bu algoritma, tehlikede olan kuş ve balık sürülerinin kolektif davranışlarını taklit ederek ilham almaktadır. Her bir parçacık, bir sürüdeki bir bireyi temsil eder ve en iyi performansı sergileyen bireyi taklit ederek hayatta kalmayı amaçlamaktadır. Parçacıklar, önceki hareketlerini hatırlar ve bu geçmiş deneyimlerini kullanarak gelecekteki hareketlerini belirlerler. Yeni adımlarını önceki adımlarla karşılaştırarak en uygun stratejiyi belirlemeye çalışırlar, böylece hayatta kalma ve optimal sonuçlar elde etme şanslarını artırırlar [37].

PSO algoritması, her parçacığın başlangıçta rastgele konumlarda yer aldığı bir başlangıç aşamasıyla işleyen bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu aşamada, her parçacığın hızı ve konumu belirlenir ve başlangıç değerleri atanır. Her iterasyonda, parçacıkların çözümleri değerlendirilir ve en iyi çözümlerine göre hızları ve konumları güncellenir. Bu süreç, parçacıkların belirli bir problemin en iyi çözümünü bulmalarını sağlayacak şekilde optimize edilmesini amaçlamaktadır [38]. PSO'nun işleyişini gösteren akış diyagramı Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. PSO'nun akış diyagramı

PSO algoritması, iterasyonlar boyunca en iyi çözümü bulmayı amaçlayan topluluk tabanlı bir iteratif algoritmadır. Parçacıkların güncellenen hız ve konum bilgileri, Denklem (1) ve Denklem (2) tarafından belirlenir [38].

$$V_i[t + 1] = wv_i[t] + c_1r_1(x_i, best[t] - x_i[t]) + c_2r_2(x_{gbest}[t] - x_i[t]) \quad (1)$$

$$X_i[t + 1] = x_i[t] + v_i[t + 1] \quad (2)$$

Denklemlerde kullanılan semboller aşağıda açıklanmıştır. Bu semboller, PSO algoritmasının iterasyonlarında parçacıkların güncellenen hız ve konum bilgilerini ifade etmek için kullanılır.

$V_i[t]$: Parçacığın anlık konumunu tanımlayan bir vektör olan hız vektörüdür.

w : Parçacığın kendi yönündeki hareketinin oranını belirleyen bir katsayıdır.

$x_i[t]$: Parçacığın mevcut konumunu belirten bir vektördür.

$x_i, best[t]$: Parçacığın geçmiş iterasyonlar boyunca ulaştığı en iyi konumu temsil eder.

$x_{gbest}[t]$: Tüm parçacıkların kapsamında bulunan en iyi konumu ifade etmektedir.

c_1 : Parçacığın kendi geçmiş deneyimlerinden elde ettiği öğrenme katsayısını ifade etmektedir.

c_2 : Parçacığın toplumun genel geçmiş deneyimlerinden aldığı öğrenme katsayısını tanımlar.

r_1 ve r_2 : (0,1) Aralığında rasgele olarak atanmış değerleri temsil eden değişkenlerdir.

Sınıflandırma

Sınıflandırma, denetimli bir makine öğrenimi yöntemidir ve temel amacı, belirli bir girdi verisine karşılık gelen doğru etiketi tahmin etmektir. Bu yöntemde, model, etiketlenmiş eğitim verileri üzerinde eğitilir ve daha sonra test verileriyle değerlendirilmektedir. Eğitim sürecinde, model, veri özelliklerini öğrenmektedir ve bu özelliklerden yola çıkarak verileri doğru sınıflara atamaktadır. Test aşamasında ise, modelin performansı test verisi üzerinde ölçülmektedir ve genellikle doğruluk, hassasiyet ve kesinlik gibi metriklerle değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme sonucunda modelin başarımı değerlendirilmektedir ve yeni, görülmemiş veriler üzerinde tahminler yapmak için kullanılabilir [39].

Bu çalışmada, göz hastalıklarının tanısında kullanılan görüntülerin sınıflandırılması için SVM algoritması benimsenmiştir. Göz hastalıklarının tanısında kullanılan görüntülerin karmaşıklığını ele almak için bu algoritma seçilmiştir.

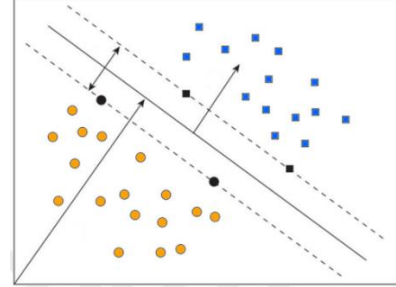
Destek Vektör Makineleri (SVM)

SVM, geniş bir alanda kullanılan ve sınıflandırma ile regresyon analizlerinde etkili sonuçlar veren bir denetimli öğrenme yöntemidir. Diğer sınıflandırma tekniklerine göre tercih edilme sebeplerinden biri, sınıflandırma problemlerini optimize etme kabiliyetleridir. Bu yöntemin belirgin avantajlarından biri, düzensiz veri kümeleriyle başa çıkabilme yeteneğidir. Ayrıca, uygun bir çekirdek seçimiyle karmaşık veri yapılarını sınıflandırabilirler ve büyük boyutlu veri kümeleriyle başarılı bir şekilde çalışabilirler. SVM'ler, genellikle optimum ayırım hiperdüzlemiyle veriler arasındaki maksimum marjı elde etmek için kullanılır ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yeteneğiyle de dikkat çekerler.

Son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılan SVM, sınıflandırma ve doğrusal olmayan işlev yaklaşımları için önerilen etkili bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. SVM, yazı tanıma, nesne tanıma, ses tanıma, yüz tanıma gibi çeşitli örüntü tanıma uygulamalarında başarıyla uygulanmaktadır. Bu algoritmanın esas prensibi, farklı sınıflar arasındaki en geniş marjı olan bir hiperdüzlemi bulmaktır. Bu özelliği sayesinde veriler arasında en iyi ayrımı yaparak sınıflandırma konusunda yüksek doğruluk sağlar. SVM, verilerin doğrusal

olmayan ilişkilerini de modelleyebilen esnek bir yapıya sahip olduğundan geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve pek çok alanda kullanım potansiyeline sahiptir [40].

Şekil 10'da daire ve kare sembolleriyle temsil edilen iki ayrı sınıfa ait veri noktalarının, belirgin bir marj ile ayrıldığı net bir ayırıcı hiperdüzlem gösterilmektedir. Bu hiperdüzlem, veri noktalarını maksimum marj ile böler ve farklı sınıflara doğru en iyi ayrımı sağlar.



Şekil 10. İki ayrı sınıfa ait veri noktalarının bir ayırıcı hiperdüzlemlerle ayrılması

Hiper-parametre Seçimi

Hiperparametre seçimi, bir makine öğrenimi modelinin performansını etkileyen parametrelerin belirlenmesini referans alan bir süreçtir. Bu parametreler, modelin genel yapısı veya eğitim süreciyle ilişkili olmayıp, modelin başarısını doğrudan etkileyen düzenlemelerdir. Örneğin, hiperparametreler modelin karmaşıklığını, öğrenme hızını veya genelleme kabiliyetini yönlendirebilir. Hiperparametrelerin doğru seçimi kritik önem taşır çünkü yanlış değerler performansı olumsuz etkileyebilir. Genellikle hiperparametrelerin en iyi değerlerini tespit etmek için deneme yanılma yöntemleri kullanılır ve çapraz doğrulama gibi tekniklerle modelin performansı objektif bir şekilde değerlendirilir.

Bu araştırmada, SVM sınıflandırıcısının hiperparametrelerini optimize etmek için Bayesian optimizasyon yöntemi benimsenmiştir. Bu yöntem, SVM modelinin performansını artırmak ve en uygun hiperparametre değerlerini belirlemek için kullanılmıştır.

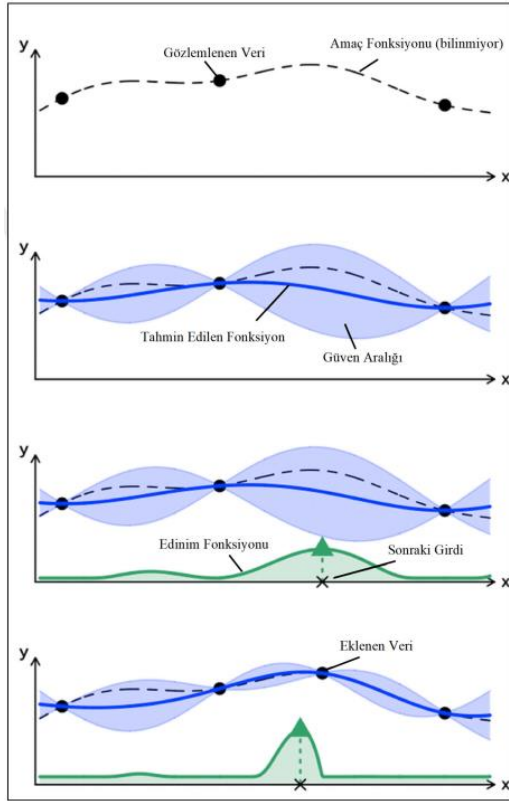
Bayesian Optimizasyon

Bayesian Optimizasyon, kompleks ve yüksek boyutlu uzaylarda en iyi çözümü etkili bir şekilde bulmayı hedefleyen bir optimizasyon yöntemidir. Bu yaklaşım genellikle maliyetli veya zaman alıcı gerçek deneyler veya simülasyonlar gerektiren problemlere odaklanır. Özellikle hiperparametre optimizasyonu, makine öğrenimi modeli yapılandırması ve endüstriyel tasarım gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bayesian Optimizasyon, verimli bir şekilde sonuca ulaşarak optimizasyon süreçlerini iyileştirmeyi amaçlar ve karmaşık problemleri çözmek için güçlü bir araçtır.

Temel prensip, geçmiş gözlemlere bağlı olarak gelecekteki en iyi noktayı tahmin etmek ve bu tahmini iyileştirmektir. Bu yaklaşım, modelin mevcut bilgi ve gerçek arasında denge kurarak en uygun noktayı belirlemesine odaklanır. Bu sayede, optimize edilmiş bir çözüm elde etmek için sürekli olarak

modelin tahminlerini güncelleyerek daha iyi sonuçlar elde edilmesi amaçlanır. Bu esnek ve verimli yöntem, mevcut bilgiyi efektif bir şekilde değerlendirerek en iyi çözümü bulmayı hedefler.

Başlangıçta, Bayesian optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu belirsizdir ancak birkaç başlangıç gözlem mevcuttur. İkinci adımda, gauss süreci kullanılarak amaç fonksiyonu ve belirsizliğini temsil eden standart sapma tahmin edilir. Üçüncü adımda, tahmin edilen fonksiyondan elde edilen en büyük kazançla yeni bir gözlem noktası belirlenir. Bu adımın ardından, tahmin ve kazanç fonksiyonları güncellenir ve süreç yeni verilere dayalı olarak devam etmektedir. Bayesian optimizasyon yöntemi, mevcut bilgileri kullanarak en iyi sonuçları elde etmeyi amaçlar ve iteratif bir şekilde yeni gözlemlerle modeli iyileştirir. Şekil 11'de Bayesian yönteminin işlem basamakları görülmektedir.



Şekil 11. Bayesian optimizasyonun tek boyutlu fonksiyonlar üzerindeki temsili [41]

Sınıflandırma Performans Metrikleri

Tablo 1. Karmaşıklık matrisi

	Tahmin Edilen Sınıf		
	Risk Var	Risk Yok	
Gerçek Sınıf	Risk Var	TP (True Positive)	FP (False Positive)
	Risk Yok	FN (False Negative)	TN (True Negative)

Bu çalışmada, sınıflandırma modellerinin etkinliğini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan metrikleri kullanılmıştır. Sınıflandırma problemlerinde modelin performansını değerlendirmek için doğruluk, hassasiyet,

duyarlılık ve F1 puanı gibi metrikler öne çıkmaktadır. Ayrıca, ROC eğrisi gibi grafiksel yöntemlerin kullanımı da detaylı olarak incelenmektedir. Karmaşıklık matrisi tabanlı metrikler, yanlış pozitiflerin ve yanlış negatiflerin modele etkisini ayrıntılı bir şekilde göstererek sınıflandırma performansını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu metrikler, Tablo 1'de sunulan karmaşıklık matrisi üzerinden modelin performansını objektif bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Sınıflandırma algoritmalarının performansını değerlendirmek için sıklıkla kullanılan bir araç olan karmaşıklık matrisi, çeşitli temel terimler içermektedir:

True Positive (TP): Modelin doğru bir şekilde pozitif olarak tahmin ettiği gerçek pozitif örneklerin sayısı.

True Negative (TN): Modelin doğru bir şekilde negatif olarak tahmin ettiği gerçek negatif örneklerin sayısı.

False Positive (FP): Modelin yanlış bir şekilde negatif bir örneği pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin sayısı.

False Negative (FN): Modelin yanlış bir şekilde pozitif bir örneği negatif olarak tahmin ettiği örneklerin sayısı.

Bu terimler kullanılarak, sınıflandırma performansı değerlendirilirken aşağıdaki metrikler belirlenmiştir [42]:

Doğruluk (Accuracy): Doğru tahmin edilen örneklerin toplam örnek sayısına oranı. Doğruluk Denklem 3'deki formülle hesaplanmaktadır.

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (3)$$

Hassasiyet (Precision): Pozitif olarak tahmin edilen örneklerin gerçek pozitif örneklerin oranı. Hassasiyet Denklem 4'teki gibi hesaplanır.

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (4)$$

F1 Skoru: Hassasiyet ve duyarlılık arasındaki dengeyi göz önünde bulunduran bir metriktir. Denklem 5'deki formülle F1 skoru hesaplanmaktadır.

$$F1 \text{ score} = 2 * \frac{(precision * recall)}{(precision + recall)} \quad (5)$$

ROC Eğrisi: sınıflandırma algoritmalarının performansını görsel olarak değerlendirmek amacıyla kullanılan etkili bir grafik aracıdır. AUC (Area Under Curve), ROC eğrisinin altında kalan alanı ifade eder ve bu değer modelin sınıflandırma yeteneğini yansıtır. AUC değeri ne kadar yüksekse, modelin performansı o kadar iyidir; 1'e yakın bir AUC değeri mükemmel bir sınıflandırıcıyı işaret ederken, 0.5'e yakın bir değer rasgele tahminin performansına eşittir. ROC eğrisi ve AUC, modelin başarısını belirlemede önemli bir gösterge olarak kullanılır ve modelin sınıflandırma becerilerini anlamak için değerli bir araçtır. Bu metrikler, karmaşıklık matrisi kullanılarak sınıflandırma performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, göz hastalıklarının teşhisi için ESA mimarileri olan ResNet-101, DenseNet-201 ve DarkNet-53 modelleri kullanılarak özellik çıkarımı yapılmıştır. Bu modellerin kullanımı veri setindeki özelliklerin daha etkili bir şekilde tanımlanmasını sağlayarak göz hastalıklarının doğru teşhisi için önemli bir adım olmuştur. Ardından, modelin performansını artırmak ve sınıflandırmadaki gereksiz özellikleri elemek amacıyla PSO optimizasyon yöntemi gibi metasezgisel algoritmalar başarıyla uygulanmıştır. Bu optimizasyon süreci, modelin genel doğruluğunu ve sınıflandırma hassasiyetini artırmak için kritik bir rol oynamıştır.

Optimizasyon sürecinden sonra elde edilen özellikler, göz hastalıklarını sınıflandırmak için SVM sınıflandırıcısı ile entegre edilmiştir. SVM'nin doğruluk oranını en üst düzeye çıkarmak amacıyla hiperparametre iyileştirilmesi yapılmış ve bu sayede sınıflandırma performansı önemli ölçüde artırılmıştır. Ayrıca, sistem performansının objektif bir şekilde değerlendirilmesi için Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılarak en uygun hiperparametreler belirlenmiştir.

Bu araştırmanın başlangıç aşamasında, göz hastalıklarının teşhisinde kullanılmak üzere fundus görüntülerinden çeşitli özelliklerin çıkarılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, üç farklı güçlü ESA modeli tercih edilmiştir: ResNet-101, DenseNet-201 ve DarkNet-53. Her bir model için ayrı ayrı 1000 özellik çıkarılmış ve toplamda 3000 özellik içeren bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti, her modelin benzersiz mimarisinden kaynaklanan bilgiyi içermekte ve temel özellikleri yakalamak için kullanılmıştır.

Oluşturulan özellikli veri seti, Matlab R2023a yazılımı kullanılarak işlenmiş ve göz hastalıklarının sınıflandırılması amacıyla güçlü bir sınıflandırıcı olan SVM ile değerlendirilmiştir. Sınıflandırma işlemine başlamadan önce, SVM modeli "one-vs-All" stratejisi kullanılarak çoklu sınıf sınıflandırma yöntemi olarak yapılandırılmıştır.

Tablo 2. ResNet-101, DenseNet-201 ve DarkNet-53 ESA mimarilerinden çıkarılan özelliklerin SVM algoritması ile sınıflandırılması

Kullanılan Mimari	Sınıf Sayısı	Görüntü Sayısı	Özellik Sayısı	Sınıflandırıcı	Doğruluk Oranı (%)
ResNet-101	4	4217	1000	SVM	91.8
DenseNet-201	4	4217	1000	SVM	90.9
DarkNet-53	4	4217	1000	SVM	91.1

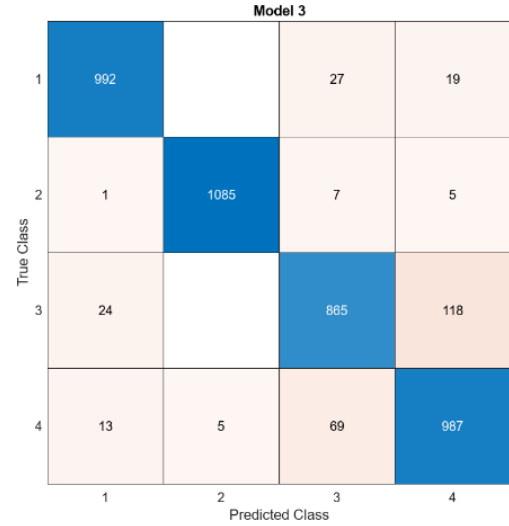
Elde edilen özellikler, ResNet-101, DenseNet-201 ve DarkNet-53 ESA mimarilerinden çıkarılan özellikler üzerinde çalışılarak elde edilmiş ve bu özellikler SVM kullanılarak sınıflandırılmıştır. Sonuçlar, sınıflandırma işlemi sonucunda elde edilen metrikler ve sınıflandırma

performansı ile birlikte Tablo 2'de detaylı bir şekilde sunulmuştur.

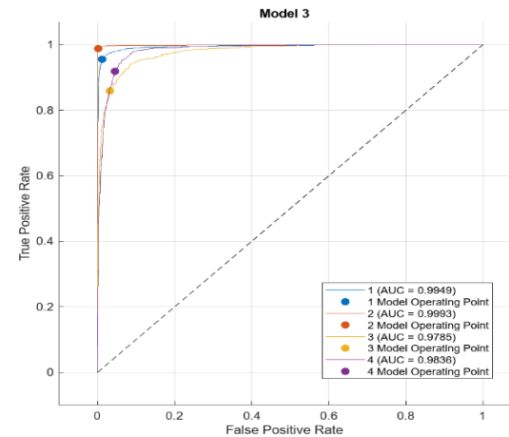
Daha sonra çalışmada kullanılan ön eğitilmiş mimarilerden elde edilen özellikler birleştirilerek 3000 özellikli yeni bir veri kümesi oluşturulmuş ve bu veri kümesi SVM algoritması ile sınıflandırılmıştır. Tablo 3'te sınıflandırma performansı gösterilmiştir.

Tablo 3. ResNet-101, DenseNet-201 ve DarkNet-53 mimarilerinin füzyonu ile elde edilen sonuçlar

Kullanılan Mimari	Sınıf Sayısı	Görüntü Sayısı	Özellik Sayısı	Sınıflandırıcı	Doğruluk Oranı (%)
ResNet-101 + DenseNet-201 + DarkNet-53	4	4217	3000	SVM	93.2



Şekil 12. ResNet-101, DenseNet-201 ve DarkNet-53 modelleri birleştirilerek özellik çıkarılmış görüntülerin sınıflandırılmasında SVM uygulandıktan sonraki karmaşıklık matrisi



Şekil 13. (1) Katarakt hastalığı için ROC eğrisi (2) Diyabetik retinopati hastalığı için ROC eğrisi (3) Glukom hastalığı için ROC eğrisi ve (4) Normal göz için ROC eğrisi

Elde edilen sonuçların daha detaylı bir şekilde analiz edilmesi ve karşılaştırılması için, karmaşıklık matrisi Şekil 12'de sunulmuştur. Bu matris, farklı sınıfların performansını ve sınıflandırıcının başarısını hangi koşullarda ne kadar gösterdiğini daha açık bir şekilde göstermektedir. Ayrıca, her bir sınıf için ROC eğrileri Şekil 13'te görselleştirilmiştir. Bu sayede, sınıfların tespit yetenekleri ve yanıt eğrileri daha net bir şekilde anlaşılabilir hale getirilmiştir.

Tablo 4. PSO optimizasyonu başlangıç parametreleri

Parametre	Değer
Veri doğrulama oranı	%20
Popülasyon boyutu	20
Yineleme sayısı	20
Bilişsel parametre	0,34
Sosyal parametre	0,33

Modelin performansını artırmak amacıyla 3000 özneliğin optimal kullanımı için PSO optimizasyon yöntemi WEKA 3.8.6 programı ile uygulanmıştır. Bu adımın hedefi, modeli daha etkili ve hassas hale getirmektir. Optimizasyon süreci sonrasında, modelin performansında belirgin bir iyileşme gözlenmiş ve daha üstün sonuçlar elde edilmiştir. PSO optimizasyonunun uygulandığı başlangıç parametreleri Tablo 4'te detaylı bir şekilde sunulurken, iyileştirme sonuçları SVM sınıflandırıcısının hiperparametrelerinin Bayesian ile optimizasyonu sonucu elde edilen performans değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. ResNet-101, DenseNet-201 ve DarkNet-53 mimarilerinin füzyonu ile elde edilen sonuçların PSO ile optimizasyon yapıp SVM sınıflandırmasının hiperparametrelerinin Bayesian ile optimizasyonu sonucu

Kullanılan Mimari	Sınıf Sayısı	Görüntü Sayısı	Özellik Sayısı	Sınıflandırıcı	Doğruluk Oranı (%)
ResNet-101 + DenseNet-201 + DarkNet-53 + PSO + SVM + Bayesian optimizasyon (Önerilen yöntem)	4	4217	1159	SVM	93.8

Bayesian optimizasyonun toplama fonksiyonu, saniyede beklenen iyileşme olarak, yineleme sayısı 30 olarak belirlenmiştir. Bu yapılandırılmalar sonucunda SVM için Box constrain level 5.147 ve standardize data true olarak en iyi hiperparametreler elde edilmiştir.

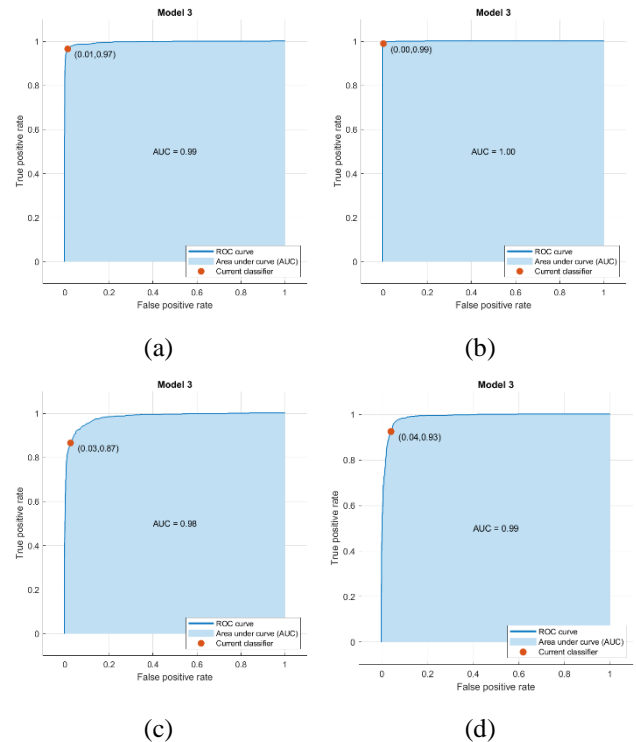
Önerilen metodolojide, özellik seçimi PSO optimizasyonu ile gerçekleştirilmiş ve sonrasında özellik sayısı 3000'den 1159'a düşürülmüştür. Ardından, SVM hiperparametrelerinin optimizasyonu için Bayesian optimizasyonu uygulanmış ve sistemin performansı yeniden test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin sistem performansını artırdığını göstermektedir. Şekil 14'te önerilen yöntemin karmaşıklık

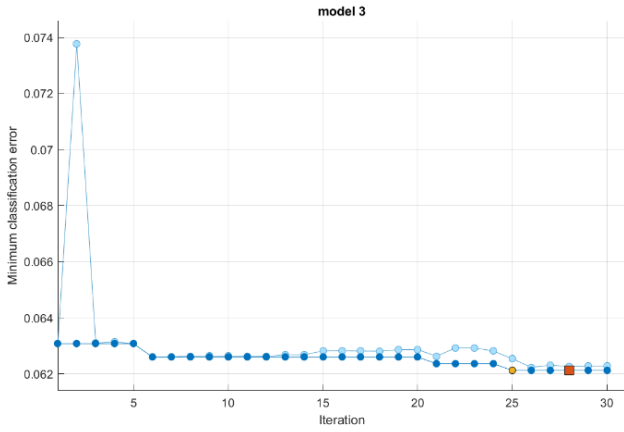
matrisi, Şekil 15'te ROC eğrisi ve Şekil 16'da önerilen yöntemin minimum sınıflandırma hatası grafiği görülmektedir.

Önerilen yöntemin, doğruluk performansı metriği aracılığıyla literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılabilir olarak değerlendirilebilmesi için oluşturulan Tablo 6'da, göz hastalıklarının derin öğrenme yaklaşımlarıyla sınıflandırılmasına ait son yıllarda yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

		Model 3			
		1	2	3	4
True Class	1	1003		20	15
	2	1	1087	5	5
	3	23	3	873	108
	4	15	5	60	994
		Predicted Class			

Şekil 14. Önerilen yöntemin karmaşıklık matrisi





Şekil 16. Önerilen yöntemin minimum sınıflandırma hatası

Tablo 6. Önerilen yöntemin mevcut çalışmalarla performans karşılaştırması

Yazar	Yöntem	Doğruluk
Carrillo vd. [20]	Segmentasyon	%88.5
Özbay [22]	ADL-ESA + ABC	%99.6
Metin ve Karasulu [25]	ResNet+MobileNet	%81.0
Topaloğlu [43]	VGG19	%88.0
Pan vd. [44]	Inception+ResNet	%93.8
Al-Fahdawi vd. [45]	DeepNet	%92.4
Sun vd. [46]	UWFIs	%93.0
Proposed method		%93.8

Önerilen yöntem, literatür bölümünde anlatılan benzer göz hastalıklarını sınıflandırma yaklaşımlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemde, giriş görüntüsünün özellikleri farklı ön-eğitilmiş ESA mimarileri ile öğrenilebilmektedir. Özellik çıkarım yöntemleriyle elde edilen öznelik haritası PSO algoritması kullanılarak boyut indirgeme ile özellik seçimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, model sağlamlığını artıran ve yakınsamayı hızlandıran ESA parametrelerini optimize etmek için Bayesian optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Karşılaştırılan son yıllara ait mevcut çalışmalara ait yöntemler aynı veya benzer veri kümelerini kullanmışlardır. Bu bakımdan önerilen yöntem, Tablo 6’da verilen son yıllarda yapılan çalışmalarla kıyaslandığında geleneksel yöntemlere göre uygulama kolaylığı ve çok sınıflı varyansı işleme yeteneği ve yüksek sınıflandırma oranı nedeniyle mevcut yaklaşımlara göre daha büyük bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir.

Sonuçlar

Bu çalışma, göz sağlığıyla ilgili önemli bir halk sağlığı sorununa odaklanarak, göz hastalıklarının erken teşhisi ve doğru tedavisi için gelişmiş bir yöntem geliştirmiştir. Çağdaş tıp ve teknolojinin sunduğu imkanlarla, derin öğrenme ve özellik seçimi tekniklerinin metasezgisel yaklaşımlarla birleştirilmesi suretiyle, göz hastalıklarının tanı süreci daha hassas ve etkili hale getirilmiştir.

Önceden eğitilmiş üç farklı derin öğrenme mimarisi olan ResNet101, DenseNet201 ve DarkNet53 kullanılarak elde

edilen özellikler, birleştirilerek kapsamlı bir özellik havuzu oluşturulmuştur. Bu havuz, görüntülerin daha iyi temsil edilmesini ve verimli bir analiz sürecini desteklemiştir. Daha da önemlisi, PSO gibi metasezgisel bir yöntem kullanılarak gereksiz özellikler elemine edilmiş ve modelin performansı iyileştirilmiştir.

Sınıflandırma amacıyla SVM tercih edilmiş ve hiperparametrelerin belirlenmesi için Bayesian optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Bu süreç, SVM’nin daha iyi ayarlanmasını ve veri setine uyum sağlamasını sağlayarak, sınıflandırma doğruluğunu %93.8 seviyesine yükseltmiştir. Elde edilen bu başarılar, önerilen metodolojinin göz hastalıklarının tespiti ve tedavisinde etkili bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, göz hastalıklarını sınıflandırmada ön-eğitilmiş modellerin ortalama %91 doğruluk performansı elde ettiği, bu modellerin birleştirilmesiyle birlikte bu oranın yaklaşık %93’e çıkarıldığı ve önerilen, PSO ile özellik seçimi sonrası Bayesian hiperparametre optimizasyonu yöntemiyle SVM sınıflandırıcısı kullanılarak %93.8 doğruluk elde edildiği gösterilmiştir. Bu bakımdan önerilen yöntemin mevcut ön-eğitilmiş ESA modellerine kıyasla yaklaşık %3 oranında bir iyileştirme sağladığı görülmektedir.

Sonuç olarak, yapay zeka tekniklerinin tıbbi görüntüleme alanında benzersiz bir potansiyele sahip olduğu ve göz hastalıklarının erken teşhisinde önemli bir rol oynayabileceği vurgulanmaktadır. Bu çalışma, bilimsel literatüre yeni bir katkı sunarken, göz sağlığının korunması ve görme kayıplarının en aza indirilmesi konularında umut vadeden bir yaklaşımı desteklemektedir.

Kaynaklar

- [1] V. Ayzenberg, F. S. Kamps, D. D. Dilks, ve S. F. Lourenco, “Skeletal representations of shape in the human visual cortex”, *Neuropsychologia*, c. 164, s. 108092, 2022.
- [2] R. R. A. Bourne vd., “Causes of vision loss worldwide, 1990–2010: a systematic analysis”, *The lancet global health*, c. 1, sayı 6, ss. e339–e349, 2013.
- [3] N. Congdon vd., “Causes and prevalence of visual impairment among adults in the United States.”, *Archives of Ophthalmology (Chicago, Ill.: 1960)*, c. 122, sayı 4, ss. 477–485, 2004.
- [4] T. Li vd., “Applications of deep learning in fundus images: A review”, *Medical Image Analysis*, c. 69, s. 101971, 2021.
- [5] H. Halıcı, “Yeni bir fakoemülsifikasyon cihazı tasarımı ve uygulaması”. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [6] S. H. Gözoğlu, “Mikroinsizyonel katarakt cerrahisi ile lens ekstraksiyonu ve arka kamara göz içi lensi yerleştirilmesi sonrası postoperatif sonuçların incelenmesi”, *TC Haseki Eğitim Araştırma Hastanesi Göz Hastalıkları Kliniği. Uzmanlık tezi, danışman: Doç. Dr. Feyza Önder*, 2006.

- [7] M. Duman, "Fakoemülsifikasyon sırasında arka kapsül yırtığı gelişmesi sonrası arka kamara göz içi lensi uygulanan olgularımızın klinik sonuçları", *TC Sağlık Bakanlığı İstanbul Eğitim ve Araştırma Hastanesi Göz Hastalıkları Kliniği. Uzmanlık tezi, danışman: Doç. Dr. Kadir Eltutar*, 2006.
- [8] M. Blair, "Diabetes mellitus review.", *Urologic nursing*, c. 36, sayı 1, 2016.
- [9] J. B. Cole ve J. C. Florez, "Genetics of diabetes mellitus and diabetes complications", *Nature reviews nephrology*, c. 16, sayı 7, ss. 377–390, 2020.
- [10] R. E. Washington, T. J. Orchard, V. C. Arena, R. E. LaPorte, A. M. Secrest, ve E. S. Tull, "All-cause mortality in a population-based type 1 diabetes cohort in the US Virgin Islands", *Diabetes research and clinical practice*, c. 103, sayı 3, ss. 504–509, 2014.
- [11] N. G. Congdon, D. S. Friedman, ve T. Lietman, "Important causes of visual impairment in the world today", *Jama*, c. 290, sayı 15, ss. 2057–2060, 2003.
- [12] A. Sinclair, P. Saeedi, A. Kaundal, S. Karuranga, B. Malanda, ve R. Williams, "Diabetes and global ageing among 65–99-year-old adults: Findings from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas", *Diabetes research and clinical practice*, c. 162, s. 108078, 2020.
- [13] L. Zhou, Y. Zhao, J. Yang, Q. Yu, ve X. Xu, "Deep multiple instance learning for automatic detection of diabetic retinopathy in retinal images", *IET Image Processing*, c. 12, sayı 4, ss. 563–571, 2018.
- [14] D. R. Nayak, D. Das, B. Majhi, S. V Bhandary, ve U. R. Acharya, "ECNet: An evolutionary convolutional network for automated glaucoma detection using fundus images", *Biomedical Signal Processing and Control*, c. 67, s. 102559, 2021.
- [15] Y.-C. Tham, X. Li, T. Y. Wong, H. A. Quigley, T. Aung, ve C.-Y. Cheng, "Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis", *Ophthalmology*, c. 121, sayı 11, ss. 2081–2090, 2014.
- [16] A. Esteva *vd.*, "Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks", *nature*, c. 542, sayı 7639, ss. 115–118, 2017.
- [17] M. Uddin *vd.*, "Brain-expressed exons under purifying selection are enriched for de novo mutations in autism spectrum disorder", *Nature genetics*, c. 46, sayı 7, ss. 742–747, 2014.
- [18] L. Clifton, D. A. Clifton, M. A. F. Pimentel, P. J. Watkinson, ve L. Tarassenko, "Gaussian processes for personalized e-health monitoring with wearable sensors", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, c. 60, sayı 1, ss. 193–197, 2012.
- [19] Y. Hatanaka *vd.*, "Vertical cup-to-disc ratio measurement for diagnosis of glaucoma on fundus images", içinde *Medical Imaging 2010: Computer-Aided Diagnosis*, SPIE, 2010, ss. 945–952.
- [20] J. Carrillo, L. Bautista, J. Villamizar, J. Rueda, ve M. Sanchez, "Glaucoma detection using fundus images of the eye", *2019 XXII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA)*, IEEE, 2019, ss. 1–4.
- [21] H. Pratt, F. Coenen, D. M. Broadbent, S. P. Harding, ve Y. Zheng, "Convolutional neural networks for diabetic retinopathy", *Procedia computer science*, c. 90, ss. 200–205, 2016.
- [22] E. Özbay, "An active deep learning method for diabetic retinopathy detection in segmented fundus images using artificial bee colony algorithm", *Artificial Intelligence Review*, c. 56, sayı 4, ss. 3291–3318, 2023.
- [23] R. Asaoka, H. Murata, A. Iwase, ve M. Araie, "Detecting preperimetric glaucoma with standard automated perimetry using a deep learning classifier", *Ophthalmology*, c. 123, sayı 9, ss. 1974–1980, 2016.
- [24] F. Ağalday ve A. Çınar, "Derin Öğrenme Mimarilerini Kullanarak Katarakt Tespiti", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 28, ss. 1428–1433, 2021.
- [25] B. Metin ve B. Karasulu, "Derin Öğrenme Modellerini Kullanarak İnsan Retinasının Optik Koherans Tomografi Görüntülerinden Hastalık Tespiti", *Veri Bilimi*, c. 5, sayı 2, ss. 9–19, 2022.
- [26] G. Venkat Doddi, "No Title", Kaggle. Erişim: 15 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/gunavenkatdoddi/eye-diseases-classification>
- [27] K. Fırıldak ve M. F. Talu, "Evrşimsel sinir ağlarında kullanılan transfer öğrenme yaklaşımlarının incelenmesi", *Computer Science*, c. 4, sayı 2, ss. 88–95, 2019.
- [28] Y. LeCun, Y. Bengio, ve G. Hinton, "Deep learning", *nature*, c. 521, sayı 7553, ss. 436–444, 2015.
- [29] H. Durmuş, E. O. Güneş, ve M. Kırıcı, "Disease detection on the leaves of the tomato plants by using deep learning", içinde *2017 6th International conference on agro-geoinformatics*, IEEE, 2017, ss. 1–5.
- [30] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, ve K. Q. Weinberger, "Densely connected convolutional networks", içinde *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, ss. 4700–4708.
- [31] D. Al-Rubaye ve S. Ayvaz, "Deep Transfer Learning and Data Augmentation for Food Image Classification", içinde *2022 Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT)*, IEEE, 2022, ss. 125–130.
- [32] M. Yildirim, S. Kiziloluk, S. Aslan, E. Sert, "A new hybrid approach based on AOA, CNN and feature fusion that can automatically diagnose Parkinson's disease from sound signals: PDD-AOA-CNN", *Signal, Image and Video Processing*, 18(2), 1227–1240, 2024.

- [33] S. Kiziloluk, M. Yildirim, H. Bingol, B. Alatas, "Multi-feature fusion and dandelion optimizer based model for automatically diagnosing the gastrointestinal diseases", *PeerJ Computer Science*, 10, e1919, 2024.
- [34] S. Akyol, M. Yildirim, B. Alatas, "Multi-feature fusion and improved BO and IGWO metaheuristics based models for automatically diagnosing the sleep disorders from sleep sounds", *Computers in Biology and Medicine*, 157, 106768, 2023.
- [35] F. A. Özbay, "A modified seahorse optimization algorithm based on chaotic maps for solving global optimization and engineering problems", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 41, 101408, 2023.
- [36] R. Eberhart ve J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory", içinde *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, Ieee, 1995, ss. 39–43.
- [37] J. Kennedy ve R. Eberhart, "Particle swarm optimization", içinde *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, Ieee, 1995, ss. 1942–1948.
- [38] E. H. Houssein, A. G. Gad, K. Hussain, ve P. N. Suganthan, "Major advances in particle swarm optimization: theory, analysis, and application", *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 63, s. 100868, 2021.
- [39] Z. Keita, "Classification in Machine Learning: An Introduction", Datacamp. Erişim: 27 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.datacamp.com/blog/classification-machine-learning>
- [40] A. U. Özkaya, M. E. Kaya, ve F. Gürgen, "Destek vektör makineleri kullanılarak aritmi sınıflandırması", *Biyomedikal Müh. Ulusal Toplantısı*, 2005.
- [41] R. Tanaka ve H. Iwata, "Bayesian optimization for genomic selection: a method for discovering the best genotype among a large number of candidates", *Theoretical and applied genetics*, c. 131, ss. 93–105, 2018.
- [42] E. Özbay ve F. A. Özbay, "Derin Öğrenme ve Sınıflandırma Yaklaşımları ile BT görüntülerinden Covid-19 Tespiti", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(2), 211-219, 2021.
- [43] I. Topaloglu, "Deep learning based convolutional neural network structured new image classification approach for eye disease identification", *Scientia Iranica*, 30(5), 1731-1742, 2023.
- [44] Y. Pan, J. Liu, Y. Cai, X. Yang, Z. Zhang, H. Long, Z. Tan, "Fundus image classification using Inception V3 and ResNet-50 for the early diagnostics of fundus diseases", *Frontiers in Physiology*, 14, 1126780, 2023.
- [45] S. Al-Fahdawi, A.S. Al-Waisy, D.Q. Zeebaree, R. Qahwaji, H. Natiq, M.A. Mohammed, M. Deveci, "Fundus-deepnet: Multi-label deep learning classification system for enhanced detection of multiple ocular diseases through data fusion of fundus images", *Information Fusion*, 102, 102059, 2024
- [46] G. Sun, X. Wang, L. Xu, C. Li, W. Wang, Z. Yi, C. Chen, "Deep learning for the detection of multiple fundus diseases using ultra-widefield images", *Ophthalmology and Therapy*, 12(2), 895-907, 2023.



Bölümleyici Kümeleme için Doğru Merkezi Noktaların Tayini

Determining Accurate Centroids in Partitional Clustering

Sibel Tariyan Özyer

Ankara Medipol Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, sibel.tariyan@ankamedipol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0312-9016>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 30 Ağustos 2023
Revizyon 17 Ekim 2023
Kabul 21 Ekim 2023
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Fikir birliği, kümeleme, topluluk

ÖZ

Kümeleme, benzer nesnelere aynı kümede ve farklı nesnelere ayrı kümelerde sınıflandırmak için etiketlenmemiş veriler üzerine odaklanan denetimsiz bir veri madenciliği tekniğidir. Hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Özellikle bölümlü kümelemede kümelemedeki temel sorun, verilerin doğası ve küme sayısı hakkında herhangi bir bilgi olmadan, iyi ayrılmış doğal kümelerin elde edilmesidir. Farklı kümeleme süreçleri sonucunda birçok küme elde edilir. Fikir birliği kümelemesinden sonra daha doğru nihai kümeleme çözümüne ulaşılır.

Farklı yaklaşımlarla çeşitli kümeleme sonuçları elde edilebilmektedir. kümeleme algoritmaları, farklı performanslarla sonuç elde edilmesine yol açar. Bu çalışmada farklı çözümlerin daha iyi tek bir çözüme indirildiği fikir birliği kümeleme sonucu sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara dayanarak kıyaslama yapılmıştır. Geleneksel bölümlü kümeleme algoritması ve çeşitleriyle çalışmamıza temel oluşturan bir diğer çalışma birlikte incelenmiştir. Farklı fikir birliği kriterleri ile gerçekleştirilen kümeleme sonuçları çeşitli veri setleri üzerinde uygulanarak incelenmiştir. Doğal kümeleme sonucu olarak küme sayısı değeri de belirlenmeye çalışılmıştır. Son olarak sonuçlarımızın k-ortalama algoritmasından daha iyi performansla çalıştığı gösterilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 August 2023
Received in revised form 17 October 2023
Accepted 21 October 2023
Available online 30 June 2024

Keywords:

consensus, clustering, ensemble

ABSTRACT

Clustering is an unsupervised data mining technique dealing with unlabeled data to classify similar objects in the same cluster and different objects in separate clusters. It is almost used in all the fields. Particularly in partitional clustering, the fundamental problem in clustering is obtaining the well separated natural clusters without any knowledge of the inherent nature of the data as well as the number of clusters. Partitional clustering algorithms with different linkage options are available.

Different clustering processes provide many clusters. They boil down to better final clustering solution after the consensus clustering. They suggest several options for conducting experiments. In this study, several consensus clustering solutions have been presented and compared with each other. Traditional partitional clustering algorithm and another study that forms the basis of our study with varieties have been investigated. Different datasets with varying consensus criteria have been examined. Number of clusters value after getting the natural clusters has also been determined. Finally our results outperform the k-means algorithm.

Doi: 10.24012/dumf.1352625

* Sorumlu Yazar

Giriş

Kümeleme, benzer nesnelere kümeler olarak bilinen farklı gruplar halinde sınıflandırmak için denetimsiz bir öğrenme tekniğidir. Bu teknik farklı alanlardaki verilerin öbektelere ayrıştırılması için kullanılmaktadır. Kümeleme

algoritmaları ihtiyaca, veri formatına göre farklılıklar gösterebilir.

Kümeleme algoritmaları bilgiye erişim, tıp bilimi, imalat, robot bilimi, finans, mahremiyetin korunması, yapay zeka, kentsel gelişim, havacılık, endüstriler, satış ve pazarlama gibi hemen hemen her çok alanda kullanılmaktadır[4], [9], [18], [21]. Kümelemede daha iyi

bir servis ve daha fazla kar elde etme amacı öne çıkmaktadır. Hali hazırda, çok fazla uygulamaya sahip olmasına rağmen, tek bir evrensel algoritmanın tüm veri türlerini etkili bir şekilde sınıflandıramaması nedeniyle yeni kümeleme algoritmaları ortaya çıkmaya devam ediyor. Kümeleme algoritmaları, her bir örneğin özelliklerine veya karakteristiklerine dayalı olarak bir veri kümesi içindeki doğal grup sayısını keşfetmeye çalışır. İlk önce gerçek k değeri olarak adlandırılan doğru grup sayısını bilmeden, veri kümelerinden en uygun kümelere elde etmek inanılmaz derecede zordur.

Küme toplulukları, bireysel kümeleme algoritmalarına göre daha fazla kararlılığa sahip, umut verici bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmalar, rastgele şekil ve boyuttaki veri kümeleriyle uğraşırken küme topluluklarının avantajlarını göstermiştir. Bu faydalar, birçok bireysel kümenin rastgele hale getirilmesinden ve tekrarlanmasından kaynaklanır ve bunlar daha sonra optimize edilmiş bir küme oluşturmak için birleştirilir[3] [12].

Fikir birliği kümeleme, bir veya daha fazla kümeleme algoritması kullanarak topluluk olarak bilinen birçok kümenin oluşturulmasını içerir. Her küme, örnekler içindeki ilişkileri temsil eden, ortak ilişkilendirme matrisi adı verilen bir sonuç üretir. Matrisler, bir fikir birliği fonksiyonu kullanılarak birleştirilir ve topluluk için bir benzerlik matrisi üretilir. Benzerlik matrisi üretimi tekrarlanarak farklı kümeleme sonuçlarının alındığı bir topluluk oluşturulur. [11], [15], [17], [22]. Ortaya çıkan matrisler yine bir fikir birliği fonksiyonu kullanılarak birleştirilir ve sonuçta tüm toplulukları temsil eden bir fikir birliği matrisi elde edilir. Her topluluğun benzerlik matrisleri ve nihai fikir birliği matrisinin her biri, toplayıcı kümeleme olarak bilinen hiyerarşik bir kümeleme algoritması kullanılarak analiz edilir. Bu matrislerin her birinin analizi, bir veri kümesi içindeki grupların iddia edilen sayısı olan önerilen bir k değerini üretir.

Kümeleme topluluklarının sonuçlarının değerlendirilmesiyle tek bir kümeleme sonucu elde edilebilir[8]. Fikir birliği kümelemenin farklı yaklaşımlarla uygulanmasına rağmen k -ortalama algoritması en temel kümeleme algoritmaları içinde en popüler seçeneklerden biri olmaya devam etmektedir. Basitliği ve performansının yeterliliği bakımından k -ortalama yaygın bir şekilde tatbik edilmektedir. Mevcut çalışma, önerilen algoritmanın farklı yorumlamalarını uygulayarak sonuçlarını kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Bunlar arasında Bu yorumlamalardan bir tanesi de k -ortalama kümelemesi için başlangıç merkezlerini eniyileyen algoritmadır. Fikir birliği kümelemede geleneksel k -ortalama algoritması ve önerdiğimiz algoritmanın üç farklı yorumlaması karşılaştırılmıştır. Topluluk içerisinde her bir kümeleme sonucu birleştirirken farklı kümeleme sonucu topluluklarını birleştiren farklı fonksiyonların etkileri de incelenmiştir. Son olarak, her kümenin farazi k değerini seçmek için rastgele ve kontrollü yöntemler denenmiştir. Önerilen yöntemler, farklı fikir birliği fonksiyonları ve kümelemede küme sayısı seçimi seçenekleri ile

çeşitlendirilmiştir. Buna göre farklı kombinasyonlarla beş farklı veri üzerinde sonuçlar elde edilmiştir.

Bu makale, giriş, temel yöntemler, önerilen yöntemin temeli, deney ve sonuçlar bölümlerinden oluşmuştur.

Temel Yöntemler

k-ortalama

K -ortalama kümeleme algoritması hakkında kapsamlı çalışmalar yapılmıştır [1], [2], [7], [10], [19]. Dolayısıyla ayrıntılı anlatımı yerine her küme için seçilen rastgele başlangıç merkezlerinin algoritmanın erken beklenmedik bir şekilde sonlanmasına odaklanılmıştır. Rassal bir şekilde seçili küme merkezlerinin iyileştirilmesi anlayışı üzerine ilerler, bu da yeni algoritmanın zayıf noktalarından biridir, çünkü ilk tohumlamayla ortaya çıkan kümeler kümelerin son halini önemli ölçüde etkileyebilir. Bununla birlikte, rastgele seçilmiş başlangıç merkezlerinin, küme topluluklarını tartışırken, kaliteli bir küme topluluğunun istenen çeşitlilik temsilcisini yaratarak daha iyi sonuçlar alınabildiği gösterilmiştir[25]. Bu çeşitlilik yalnızca her bir topluluk yüksek sayıda küme içeriyorsa belirgindir, L . Bu durumda bariz bir dezavantaj, böyle bir algoritma kullanmanın artan maliyetidir. Benzersiz optimal ağırlık merkezlerini belirlemek ve rastgele seçimi tamamen ortadan kaldırmak için birçok başlangıç ağırlık merkezi seçim algoritması önerilmiştir. Böyle bir seçim algoritması, Literatürde başlangıç noktası seçimine ilişkin farklı yöntemler önerilmiştir[6][16].

Küme Merkezi Seçimlerinin Eniyilemesi

Önerilen yöntemimize temel teşkil eden çalışmada [6] herhangi bir veri kümesi için benzersiz bir başlangıç merkezleri kümesi üreten, optimize edilmiş bir başlangıç ağırlık merkezi seçilmesi sağlanmaktadır. Bu algoritma, herhangi bir binadaki sütunların dağılımından ilham almıştır. Sütunlar merkezi dayanak noktalarını temsil eder; çatinın ağırlığına basıncına dayanacak şekilde birbirlerinden mümkün olduğunca uzağa yayılırlar [6], [5]. Algoritmanın zaman karmaşıklığı $O(n+(h_1x_{n_1})+\dots+(h_kx_{n_k}))$ 'dir, burada $n_k < \dots < n_1 < n$, n_i , i 'nci merkezi nokta hariç tutulduktan sonra veri öğelerinin geri kalanıdır. tasarlanan ilk ağırlık merkezinin komşuları ve h_i , i 'nci belirlenen merkezi nokta belirlenmeden önceki aykırı değerlerin sayısıdır. Aykırı değerlerin sayısı n 'ye yakın olduğunda, algoritma yaklaşık kuadratik zaman karmaşıklığına ulaşır.

Temel Prensip: Başlangıç ağırlık merkezlerini seçmek için tüm noktaların ortalaması, veri dağılımının ağırlık merkezi olarak hesaplanır. Bu merkeze en uzak mesafeye sahip veri noktası birinci merkeze aday olarak seçilir. n_{min} noktalarının önemli bir kısmı, ağırlık merkezi adayının önceden belirlenmiş bir nb_{a_i} mesafesi içerisine düşerse, aday gerçek bir ağırlık merkezine terfi ettirilir. Aksi halde aykırı değer olarak kabul edilir ve ağırlık merkezine en yakın bir sonraki nokta aday olarak seçilir.

Sonraki ağırlık merkezleri de benzer bir süreci takip eder, ancak mesafe, ağırlık merkezine ek olarak önceki tüm merkez noktalarından hesaplanır. Bu, tüm noktaların birbirinden mümkün olduğunca uzağa dağıtılmasını sağlar.

Eşik Değerine Bağlı Aykırı Noktaların Bulunması:

Model alınan temel çalışmada, d_{max} değer, herhangi bir numuneden ağırlık merkezine olan maksimum mesafe olsun Buna göre, verilen referans(alfa ve beta parametre değerlerine bağlı kalınarak n_{min} metriği $\alpha \times n \div k$) olarak hesaplanır. Benzer şekilde, n_{dis} metriği de $\beta \times d_{max}$ ile bulunur; burada Eğer n_{min} komşu noktaları aday ağırlık merkezinin n_{dis} mesafesi dahilindeyse, aday bir ağırlık merkezi haline gelir. Aksi halde aykırı bir duruma dönüşür. Bu aykırı değer tespit mekanizması, rastgele ağırlık merkezi başlatmanın doğasında olan bir sorun olan yerel minimumların ağırlık merkezi olarak seçilmesini önlemeye yardımcı olur.

Önerilen Yöntemin Temeli

Önerilen yöntemin kullandığı [6] numaralı çalışmada rastgele küme merkeziyle başlatılan çalışmaya göre üstünlük gösterirken aykırı nokta tespitine de olanak sağlar.

Aykırı nokta tespiti rastgele alfa ve beta değerleri atanarak farklı küme merkezleriyle kümeleme algoritmasının başlatılmasına olanak sağlayabilir. Bununla birlikte, bu rassallıkla birlikte fikir birliği kümelemesinin etkilerinden faydalanılarak aynı zamanda ağırlık merkezi seçim süreci sırasında bir dereceye kadar aykırı değer tespiti ile birlikte kümeleme sonucu da elde edilebilir.

Aykırı değer tespiti olmadan da uygun başlangıç küme merkezi bulunabilmektedir. [4]. Aykırı değer tespiti gerekmeyen durumda $\alpha = 0$ ve $\beta = 1$ değer ataması yapılır.

Fikir birliği Kümeleme

Fikir birliği kümelemede, ortak ilişkilendirme matrislerinin bir fikir birliği oluşturmak üzere birleştirildiği iki aşama vardır. Küme bağlantısı olarak adlandırdığımız ilk olay, bir topluluk içindeki her kümenin bir araya gelmesiyle gerçekleşir. İkinci olay, topluluk bağlantısı sırasında, her bir topluluğun nihai fikir birliği matrisini oluşturmak üzere birleştirildiği zamandır. Ortaya çıkan matrisleri analiz etmek ve bir k değerini belirlemek için hiyerarşik kümelemeyi kullanırız. Özellikle, toplayıcı kümeleme, fikir birliği kümelemesinde fikir birliği matrislerini analiz etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yığinsal hiyerarşik kümelemede her veri noktası tekil küme olarak ele alınır ve mevcut kümeler birbirine bağlanarak küme sayısı azaltılır. Daha sonra kümeleri birbirine bağlarken kümeler arasındaki mesafedeki en büyük sıçrama hesaplanarak optimum k değeri çıkarılır. En yaygın olanları seçtiğimiz çeşitli bağlantı alternatifleri vardır(tekli, tam, ortalama, ward metodu gibi) [18].

Kümelemede kümeler arası ilişkilerde, tek bağlantılıda, en yakın noktaları arasındaki en kısa mesafeye sahip iki küme birleştirilir. Hiyerarşik kümelemenin karmaşıklığı genellikle $O(n^3)$ olmakla birlikte, $O(n^2)$ 'de de tek bağlantılı kümeleme yapılabilir[13] [18]. Tek bağlantı, kümeleme uygulama

aşamasında oldukça basittir ve bu nedenle de yaygın olarak kullanılır. Ancak tek bağlantı, bir dizi kümenin birbirine beklenmedik bir şekilde uç uca eklenmesine yol açabilir. Kümelerin şekli ve boyutunun dikkate alınmamasından dolayı art arda birbirlerine eklenerek yeni kümeler oluşturabilirler. Beklenen doğal kümelerin oluşturulması mümkün olmayabilir; küme kalitesi ise genellikle küme içi varyans veya standart sapma geçerlilik indeksi gibi geçerlilik ölçümleri aracılığıyla kümenin sıkı ve yoğunluğuyla belirlenir.

Tam bağlantı, tek bağlantının tersine, iki kümenin en yakın noktaları arasındaki mesafe yerine, n uzak noktalarını kullanır. Tek bağlantıya benzer şekilde, tam bağlantı, CLINK algoritmasını kullanılarak $O(n^2)$ zaman karmaşıklığına indirgenebilir[18] [20]. Tek bağlantı küme zincirleri oluşturma eğilimindeyken, tam bağlantı küresel kümelere yol sebep olmaktadır. Yeni oluşturulan küme, her birleştirilmiş kümenin en uzak noktaları arasındaki mesafeye eşit bir çapa sahiptir ve diğer tüm veri noktaları, çapa karşılık gelen bir kürenin içine alınır. Tam bağlantının bir dezavantajı da potansiyel aykırı noktaların iki küme arasındaki çapın büyümesine yol açmasıdır. Aykırı nesnelere karşı hassasiyet artmaktadır.

Ortalama bağlantı, iki kümedeki her nokta arasındaki mesafelerin ortalamasını alarak tekli bağlantı ile tam bağlantı arasında bir konuma sahip olur. Tüm noktaların arasındaki ortalama mesafeye göre en yakın iki kümenin birleşiminin yeni bir küme oluşturması söz konusudur. Aykırı değerlere karşı tam bağlantıya göre daha az duyarlıdır ancak $O(n^2 \log n)$ maliyeti göreceli yüksektir.

Ward metodu hangi kümelerin birleştirileceğine karar vermek için sapma karesi kriterini kullanmaktadır. İki kümenin, her küme için bağlı oldukları merkezlere göre sapmaları hesaplanır. İki kümenin aynı küme içinde yeni bir küme oluşturulduğu varsayılarak toplam sapma hesaplanır. Bu toplam sapma daha sonra iki ayrı sapmanın toplamı ile karşılaştırılır. Sapmalardaki fark, veri setindeki her küme çifti için hesaplanır ve sapmada en küçük değişime sahip olan çift, birleştirme için seçilir. Ward metodu, noktaların küme merkezlerinden kare sapmasını en aza indirmeye çalışan k -ortalama algoritmasına benzer. Zaman karmaşıklığı $O(n \log n)$ 'dir [18].

Genel ifadeyle farklı kümelerin sonucunda veri setindeki nesnelere ikili bağlarının elde edilmesine dayalı adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir[8]:

D data seti N adet öğeye sahiptir. Buna göre,

1. Doğal küme sayısından daha büyük küme adeti için R adet farklı kümeleme sonucu oluşturulur.
2. R adet farklı kümeleme sonucu elde edilir.
3. Her bir sonuç için $S(t) = \{s_{ij}(t)\}$ i ve $j=1..N$ ve $t=1..R$
4. Bir nesnenin en fazla bir adet kümeyle ait olması durumunda, i ve j nesnelere aynı kümede olması durumunda $s_{ij}(t)=1$; aksi takdirde, 0 olarak değeri atanır. Buna göre, $S(t)$ matrisi elde edilir.
5. $t=1..R$ farklı kümeleme sonucuna göre elde edilen matrislerin toplamı nihai S matrisinde bir araya

getirilerek nesnelere bir arada olma sayıları hesaplanır.

Küme Sayısı Değeri Seçimi

Her küme için farazi veya hedef k değeri seçilmelidir. Daha sonra her küme, bir ortak ilişkilendirme matrisinde temsil edilen aynı küme veri noktaları arasındaki ilişkiyle k sayıda kümeyi belirler. Varsayılan k küme sayısına göre veri noktalarının nasıl kümelendiğine bakarak, hangi veri noktalarının birbirine ait olduğu konusunda bir fikir birliği bulmaya çalışırız, bu da optimal küme sayısını sağlar.

Rastgele Küme Sayısı Değeri

Her küme için önerilen k değeri genellikle fikir birliği kümelemesinde rastgele seçilir. Daha önce de belirtildiği gibi, bunun nedeni, ortaya çıkan toplulukların artan çeşitliliğidir. Bu fayda iyi bir şekilde belgelenmiş olsa da, küme topluluklarının halihazırda yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle gerçekte daha az pratiktir. İstatistiksel olarak konuşursak, daha fazla örnek alındığında çeşitlendirme etkileri artar, bu da topluluk başına daha fazla küme anlamına gelir.

Sıralı Küme Sayısı Değeri

Sıralı k seçimiyle, öncelikle veri kümesindeki farazi maksimum k küme sayısına bakılır. Beş veri setinin gerçek k değeri iki ile yedi arasında değişmektedir. Her veri setinde kümelerin var olduğu varsayılırsa k değeri ikiden başlatılır; daha sonra k sayısı sıralı artırılarak yirmi adet küme sayısı değeri için farklı kümeleme sonuçları elde edilir. farklı k toplulukları elde edilir. Bu yöntemle topluluğun çeşitliliğini garanti eder ve benzersiz başlangıç ağırlık merkezi seçimine sahip algoritmalar için daha uygundur. Rastgele başlangıç merkezlerine sahip k -ortalama için aynı k değerine sahip iki küme çok farklı sonuçlara yol açabilir.

Deneyler

Test çalışmalarımızda Şarap, Cam, İyonosfer, Zambak ve Tiroit veri kümeleri kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan veri setleri UCI ML veri seti havuzunda da yer almaktadır[2].

Dört farklı algoritma, fikir birliği fonksiyonları ve iki farklı küme değeri seçme yöntemi beş farklı veri seti üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çalışmamıza temel teşkil eden yöntemin[6] tam bağlantıyla en kötü performansı göstermiştir. Sapma miktarı ortalamanın çok üstüne çıkmıştır. Tam bağlantının aykırı değerlere karşı hassasiyetini koruduğu düşünülen aykırı değer tespiti yüzünden bu durum aslında beklenmemektedir.

Önermiş olduğumuz yöntemlerin hem aykırı değer olması hem de olmaması durumlarında [6] no'lu standart

çalışmadan daha iyi performans göstermiştir. Tam bağlantı dışındaki üç varyasyon arasındaki tek fark aykırı değerlerin nasıl tespit edildiği olduğundan, [6] no'lu yöntemdeki aykırı değer tespitli halinin fikir birliği kümeleme için uygun olmadığı ortaya konmuştur. Bunun nedeni, veri kümeleri dikkate alınmadan alfa ve beta değerlerinin keyfi olarak seçilmesine ve aykırı değer tespitinin, her küme arasında sürekli değişen k 'ye bağımlı olmasına bağlanabilir.

Elde edilen sonuçlara göre, Ward metodu, hem rastgele hem de sıralı k seçimiyle [6] no'lu çalışmanın aykırı değer tespiti kullanmayan haliyle birleştirildiğinde en güvenilir sonuçları üretmiştir. Rastgele alfa ve beta değerlerinin atanmasıyla çalışan temel yöntem tüm varyasyonlarda iyi performans göstererek k -ortalama algoritmasına yerine alternatif olabileceğini göstermiştir.

Karşılaştırıldığında, rastgele k seçimi sıralı k seçimine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Tüm veri kümelerinin ortalama gerçek k değeriyle karşılaştırıldığında yükseklerdeki en fazla küme sayısı bunda rol oynamıştır.

Sonuçlar

K -ortalama kümeleme algoritması önermiş olduğumuz algoritmanın üç farklı yorumlamasıyla karşılaştırılmıştır. Algoritmalar dört farklı fikir birliği fonksiyonu ve değişik iki k seçim yöntemiyle birleştirilerek sonuçta 32 adet fikir birliği kümelemesi elde edilmiştir. Değişiklerle farklı varyasyonlar içeren bu yaklaşımlar beş adet veri setine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, aykırı nesne tespiti içermeden fikir birliği kümeleme tabanlı önerdiğimiz yöntemlerin en iyi performansı gösterdiğini ve rastgele merkezi nokta başlatarak çalışmaya başlayan k -ortalamanın yerine uygun bir alternatif olduğu gösterilmiştir. Önerilen algoritma, $O(n^2)$ zaman karmaşıklığına dönüşürken, aykırı değer tespitinin kaldırılması zaman karmaşıklığını $O((k+1)n)$ seviyesine kadar iyileştirir. k -ortalama uygulamalarında ortaya çıkan ağırlık merkezlerinin eylemsizliği karşılaştırılarak birden fazla rastgele ağırlık merkezi başlatma işlemi yapılır. Sonuç olarak, zaman karmaşıklığındaki fark minimum düzeye inmiştir. Çalışılan fikir birliği fonksiyonları arasında Ward metodu en iyi sonuçları verirken aynı zamanda $O(n \log n)$ gibi en düşük zaman karmaşıklığına sahiptir.

Rastgele ve sıralı k seçimi karşılaştırıldığında rastgele yöntem daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte, iki yöntem arasındaki standart sapma farkı yalnızca yaklaşık yüzde üçtür, bu da sıralı k seçimini, zaman karmaşıklığının önemli olduğu durumlarda geçerli bir yöntem haline getirir. Rastgele k seçimi, faydaları veya rassallığı görmek için topluluk başına yüksek miktarda küme gerektirirken sıralı k seçimi için küme sayısı

Tablo 1 Rastgele küme değeri seçerek doğru etiketlemeye göre sapma miktarı (Yüzde oranı cinsinden)

Kümeleme Yöntemi	Şarap	Cam	İyonosfer	Zambak	Tiroit	Ortalama
k-Ortalama + Tek Bağlantı	33.3	71.4	0	33.3	33.3	34.26
Temel Alınan Yöntem + Tek Bağlantı	33.3	71.4	0	33.3	33.3	34.26
Temel Alınan Yöntem (rastgele) + Tek Bağlantı	33.3	71.4	0	0	33.3	27.6
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Tek Bağlantı	33.3	71.4	0	33.3	0	27.6
k-ortalama Ortalama Bağlantı	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Temel Alınan Yöntem + Ortalama Bağlantı	0	57.1	100	33.3	33.3	44.74
Temel Alınan Yöntem(rastgele) + Ortalama Bağlantı	0	57.1	0	33.3	33.3	24.74
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Ortalama Bağlantı	33.3	71.4	0	33.3	0	27.6
k-Ortalama + Tam Bağlantı	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Temel Alınan Yöntem + Tam Bağlantı	66.7	71.4	100	33.3	33.3	60.94
Temel Alınan Yöntem (rastgele) + Tam Bağlantı	0	71.4	0	33.3	0	20.94
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Tam Bağlantı	0	71.4	0	33.3	0	20.94
k-Ortalama + Ward Metodu	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Pi Temel Alınan Yöntem + Ward Metodu	0	71.4	100	33.3	33.3	47.6
Temel Alınan Yöntem (rastgele) + Ward Metodu	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Ward	0	57.1	0	33.3	0	18.08

Tablo 2 Sıralı küme değeri seçerek doğru etiketlemeye göre sapma miktarı (Yüzde oranı cinsinden)

Kümeleme Yöntemi	Şarap	Cam	İyonosfer	Zambak	Tiroit	Ortalama
k-Ortalama + Tek Bağlantı	33.3	71.4	0	33.3	33.3	34.26
Temel Alınan Yöntem + Tek Bağlantı	33.3	57.1	0	0	66.7	31.42
Temel Alınan Yöntem (rastgele) + Tek Bağlantı	33.3	71.4	0	33.3	33.3	34.26
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Tek Bağlantı	33.3	71.4	0	0	33.3	27.6
k-ortalama Ortalama Bağlantı	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Temel Alınan Yöntem + Ortalama Bağlantı	200	57.1	0	33.3	33.3	64.74
Temel Alınan Yöntem(rastgele) + Ortalama Bağlantı	0	57.1	0	33.3	0	18.08
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Ortalama Bağlantı	33.3	71.4	0	33.3	0	27.6
k-Ortalama + Tam Bağlantı	0	71.4	0	33.3	66.7	34.28
Temel Alınan Yöntem + Tam Bağlantı	200	28.6	100	33.3	33.3	79.04
Temel Alınan Yöntem (rastgele) + Tam Bağlantı	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Tam Bağlantı	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
k-Ortalama + Ward	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Pi Temel Alınan Yöntem + Ward	0	71.4	100	33.3	33.3	47.6
Temel Alınan Yöntem (rastgele) + Ward	0	71.4	0	33.3	33.3	27.6
Temel Alınan Yöntem (aykırı noktasız) + Wardu	0	57.1	0	33.3	0	18.08

kmax(belirlenen maksimum küme sayısı değeri) ile sınırlanır.

Aykırı değer tespiti yapılmadan önerilen yöntemi kullanan temel kümeleme, her topluluk içinde bir fikir birliği oluşturmak için Ward metodu kullanılır. Elde edilen sonuçlardan bu fikir birliği kümeleme algoritması öne çıkmaktadır. En çok tekrarlanan k değeri son k değeri olur. Çalışmalarda her bir topluluk için sapmada en fazla sıçramanın olduğu küme sayısı hesaplanmıştır. Çalışmada toplam 100 adet topluluk oluşturularak en fazla tekrarlanan k küme sayısı dikkate alınarak veri setinde gerçek etiketlemeye (sınıf) göre öğelerin standart sapma değişimi hesaplanmıştır. Düşük sapma değeri daha doğru kümeleme yapmıştır şeklinde değerlendirilmelidir. Önerilen yöntemlere temel teşkil eden [6] no'lu çalışmadır. Bu nedenle aşağıdaki tablolarda [6] no'lu çalışma Temel Alınan Yöntem olarak adlandırılmıştır. Çalışmalar fikir birliği fonksiyonları ve farklı küme sayısı değeri seçme gibi alternatiflerle çeşitlendirilmiştir

Kümeleme algoritmaları hali hazırda bir çok uygulama alanında tatbik edilebilir. Geleneksel bölümleyici algoritmaları açgözlü bir yaklaşım sergilerler. O nedenle başlangıçta seçilen ilk çözüm sonraki aşamalarda iyileştirmelerin kalitesi açısından çok önemlidir. Aksi takdirde, erken yakınsayarak yanlış çözümler elde edilmesine yol açabilirler. O nedenle, hemen her alanda örneğin, bir firmadaki müşterilerin profil bilgilerinin elde edilmesinde veya bir tavsiye sisteminde yapılan önerilerin iyileştirilmesinde iyileştirmeler daha iyi bir servis sunulması açısından çok büyük önem taşır. Gelecekte, çalışmamızdaki veri setleri dışında yapılan çalışmaların ayrıca kümeleme algoritmalarının farklı uygulama alanlarına tatbiki üzerine çalışmalar yapılacaktır. Ayrıca, büyük veri üzerine urylanacaktır.

Kaynaklar

- [1] Ahmed, Mohiuddin, Raihan Seraj, and Syed Mohammed Shamsul Islam. "The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation." *Electronics* 9.8 (2020): 1295.
- [2] Asuncion, Arthur, and David Newman. "UCI machine learning repository." (2007).
- [3] Bai, Liang, Jiye Liang, and Fuyuan Cao. "A multiple k-means clustering ensemble algorithm to find nonlinearly separable clusters." *Information Fusion* 61 (2020): 36-47.
- [4] Barakbah, Ali Ridho, and K. Arai. "A new algorithm for optimization of K-means clustering with determining maximum distance between centroids." *IES 2006, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, ITS* (2006).
- [5] Barakbah, Ali Ridho, and Yasushi Kiyoki. "A fast algorithm for K-means optimization using Pillar algorithm." *The 2nd International Workshop with Mentors on Database, Web and Information Management for Young Researchers*. 2010.
- [6] Barakbah, Ali Ridho, and Yasushi Kiyoki. "A pillar algorithm for k-means optimization by distance maximization for initial centroid designation." 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining. IEEE, 2009.
- [7] Borlea, Ioan-Daniel, Radu-Emil Precup, and Alexandra-Bianca Borlea. "Improvement of K-means cluster quality by post processing resulted clusters." *Procedia Computer Science* 199 (2022): 63-70.
- [8] Cano, José Ramón, et al. "A greedy randomized adaptive search procedure applied to the clustering problem as an initialization process using K-Means as a local search procedure." *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 12.3-4 (2002): 235-242.
- [9] Ezugwu, Absalom E., et al. "A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 110 (2022): 104743.
- [10] Ghazal, Taher M. "Performances of K-means clustering algorithm with different distance metrics." *Intelligent Automation & Soft Computing* 30.2 (2021): 735-742.
- [11] Goder, Andrey, and Vladimir Filkov. "Consensus clustering algorithms: Comparison and refinement." 2008 Proceedings of the Tenth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX). Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008.
- [12] Golalipour, Keyvan, et al. "From clustering to clustering ensemble selection: A review." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 104 (2021): 104388.
- [13] Goyal, Poonam, et al. "Spatial locality aware, fast, and scalable slink algorithm for commodity clusters." 2016 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER). IEEE, 2016.
- [14] Ikotun, Abiodun M., et al. "K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data." *Information Sciences* (2022).
- [15] Jia, Yuheng, et al. "Ensemble Clustering via Co-Association Matrix Self-Enhancement." *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* (2023).
- [16] Jumadi Dehotun Sitompul, Bernad, Opim Salim Sitompul, and Poltak Sihombing. "Enhancement clustering evaluation result of davies-bouldin index with determining initial centroid of k-means algorithm." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1235. No. 1. IOP Publishing, 2019.
- [17] Lancichinetti, Andrea, and Santo Fortunato. "Consensus clustering in complex networks." *Scientific reports* 2.1 (2012): 336.
- [18] Sharma, Shweta, and Neha Batra. "Comparative study of single linkage, complete linkage, and ward method of agglomerative clustering." 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon). IEEE, 2019.

- [19] Sinaga, Kristina P., and Miin-Shen Yang. "Unsupervised K-means clustering algorithm." IEEE access 8 (2020): 80716-80727.
- [20] Sreedhar Kumar, S., et al. "A brief survey of unsupervised agglomerative hierarchical clustering schemes." Int J Eng Technol (UAE) 8.1 (2019): 29-37.
- [21] Turgut, Emre, Murat Taşyürek, and Nuh AZGINOĞLU. "Kentsel Dönüşüm Sürecinde Binaların Mekânsal Veri Madenciliği Yöntemleri ile Tespiti." Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 13.2 (2022): 161-167.
- [22] Zhang, Mimi. "Weighted clustering ensemble: A review." Pattern Recognition 124 (2022): 108428.



Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı soğutma ortamları kullanılarak ısıl işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının SBF ve Hank solüsyonlarında biyokorozyon davranışının incelenmesi

*Investigation of biocorrosion behavior of heat-treated Ti6Al4V alloy in SBF and Hank solutions using different cooling environments*Şakir ALTINSOY^{1*}, Rezzan YARDIMCI², Fatma Zehra KÖSE³, Gökçe KOÇ⁴^{1*} İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, sakir.altinsoy@yeniuyuzuil.edu.tr

ORCID: 0000-0002-1893-2266

² İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, rezzan.yardimci@yeniuyuzuil.edu.tr

ORCID: 0000-0002-7709-8718

³ İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, fatmazehra.kose@yeniuyuzuil.edu.tr

ORCID: 0000-0001-5841-7288

⁴ İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, gokce.koc@yeniuyuzuil.edu.tr

ORCID: 0009-0000-0534-3940

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 15 Mart 2024
Revizyon 30 Mart 2024
Kabul 22 Nisan 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Ti6Al4V, ısıl işlem, biyokorozyon, mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü.

ÖZ

Ti6Al4V alaşımı mükemmel korozyon direnci, düşük yoğunluk, yüksek mekanik özellikler ve biyouyumluluk özellikleri nedeniyle ortodonti, medikal implant, cerrahi aletler, gıda ve havacılık endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle biyomalzeme olarak kullanımı korozif ortamlara karşı mekanizmasının anlaşılmasını zorunlu kılmıştır. $\alpha+\beta$ alaşım gurubuna sahip Ti6Al4V alaşımının ısıl işlem sonrası birçok özelliği iyileştirilebilir. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımına 1100°C sıcaklıkta 20 dak ısıl işlem uygulanarak su, hava ve yağ ortamlarında soğutulmuştur. Farklı soğutma ortamlarında işlem görmüş numunelerin SBF (yapay vücut sıvısı) ve Hank solüsyonlarına maruz kalması sonucu mikro yapıdaki faz dönüşümlerinin sertlik, yüzey kalitesi, işlenebilirlik ve korozyon özelliklerine etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda oluşan ikincil fazların malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir. Soğutma ortamının ve korozif ortamın mekanik özellikler ve korozyon direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Yağ ve havada gerçekleştirilen soğutma işlemi sonrasında her iki çözeltide de parçaların korozyon direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca işleme sonrası kesici uçlarda uç yüzeyinde kaplama ayrılması ve serbest yüzey aşınması tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 March 2024
Received in revised form 30 March 2024
Accepted 22 April 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Ti6Al4V, heat treatment, biocorrosion, microstructure, surface roughness.

Doi: 10.24012/dumf.1452762

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Ti6Al4V alloy is used in many fields such as orthodontics, medical implants, surgical instruments, food, and aviation industries thanks to its excellent corrosion resistance, low density, high mechanical properties, and biocompatibility properties. Especially its use as a biomaterial has made it necessary to understand its mechanism against corrosive environments. Many properties of Ti6Al4V alloy with $\alpha+\beta$ alloy group can be improved after heat treatment. In this study, Ti6Al4V alloy was heat treated at 1100°C for 20 minutes and cooled in water, air, and oil environments. The effects of phase transformations in the microstructure on the hardness, surface quality, machinability, and corrosion properties of samples processed in different cooling environments as a result of exposure to SBF (artificial body fluid) and Hank solutions were examined. According to the results, it has been determined that secondary phases formed at high temperatures affect the mechanical and corrosion properties of the material. It has been determined that the cooling environment and corrosive environment have a significant impact on mechanical properties and corrosion resistance. After the cooling process in oil and air, it was observed that the corrosion resistance of the parts increased in both solutions. Additionally, coating separation and flank wear on the tip surface of the inserts were detected after machining.

Giriş

Günümüzde biyomalzemeler yaygın olarak, biyolojik sistemlerle ara yüz oluşturarak vücudun herhangi bir dokusunu, organını veya işlevini incelemek, tedavi etmek, geliştirmek ve de değiştirmek için kullanılan yapay malzemeler olarak tanımlanmaktadır [1]. Biyomalzemeler, kullanıldığı bölgede canlı doku ile direkt etkileşim halinde bulunarak veya organ ya da doku ile yer değiştirerek vücudun çalışma mekanizmasının sürdürülmesine yardımcı olan malzemelerdir. Biyomalzemelerin kullanım alanlarının başında ise implant ve protez malzemeleri gelmektedir. Gün geçtikçe teknolojinin ilerlemesi ile biyomalzemelerin kullanım alanlarının genişlemesi kaliteli malzemeye olan talebin artmasına neden olmaktadır.

Tıp, biyomedikal mühendisliği ve farklı mühendislik uygulamalarında birçok farklı biyomalzeme çeşidi olmasıyla birlikte bu alanda yaygın olarak metaller kullanılmaktadır [2], [3]. Metallerin bazı dezavantajlarını gidermek amacı ile biyomalzeme olarak diğer malzemelere nazaran daha hafif, daha dayanıklı ve kısmen daha düşük maliyetli özelliklere sahip olan titanyum ve alaşımları bu alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları, çelik kadar dayanıklı ancak çelikten %45 daha hafiftir. Alüminyum alaşımlarından ise %60 daha ağır olmasına karşın, iki kat daha dayanıklıdır [4], [5]. $\alpha+\beta$ faz yapısına sahip Ti alaşımları içinde en çok Ti6Al4V kullanılmaktadır. Düşük yoğunluk, ısıl direnci, yüksek mekaniksel dayanım, korozyon dayanımı, biyoyumumluluk özellikleri nedeniyle Ti6Al4V alaşımı çok geniş bir kullanım alanına sahiptir [6]. Bu özellikler titanyum alaşımlarının, tıp, kimya ve biyomedikal alanlarda, denizcilik, otomotiv ve petrokimya sektöründe, gıda ve spor endüstrisinde, denizcilikte ve yiyecek endüstrisinde sıklıkla tercih edilmesini sağlamaktadır [7], [8], [9], [10]. Havacılık, uzay ve medikal endüstrilerinde %80, global üretimde ise %50'den fazla kullanım potansiyeline sahiptir [2], [11], [12]. Titanyum alaşımlarından yapılan tıbbi implantlar, çeşitli ortopedik uygulamalarında yaygın ve başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [13], [14].

Biyomalzeme olarak kullanılan malzemelerin başarısı malzemenin çeşitli özelliklerine bağlıdır. Vücut içerisine yerleştirilen malzemeler vücut sıvısı ve diğer organlar ile etkileşim içerisine girerler. Bu neden ile implant olarak tercih edilecek malzemelerin birçok faktörü bir arada bulundurması gerekmektedir [15]. İmplant tasarımı sırasında ilk ele alınması gereken konu malzemenin korozyonudur. Titanyum alaşımları çok yüksek korozyon direncine sahip malzemeler olarak bilinirler. Bunun temel sebebi ise titanyum yüzeyinde oluşan kararlı ve koruyucu TiO_2 tabakasıdır. Oluşan bu oksit tabakası yapısal bütünlüğünü korur ve hasara uğradığında ise hızlı bir şekilde tekrar oluşur. Bu tabakanın oluşumuna izin veren ortamlarda titanyum, korozyona karşı oldukça dirençlidir. Titanyum alaşımları farklı ortamlarda gösterdiği korozyon direncindeki artış veya azalma olayı malzemenin yüzey yapısını veya iç yapısını etkileyen işlemlerin sonucudur [16]. Bu neden ile korozyona etki eden biyolojik değişkenlerin de araştırılması gerekmektedir. Farklı korozif sıvıların kullanımıyla metal implantların korozyonu üzerine çeşitli in

vitro ve in vivo çalışmalar yapılmıştır [17]. Literatürde Ti6Al4V alaşımının mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Liu ve ark. [18], tarafından titanyum ve alaşımlarına çeşitli yüzey kaplamaları ve ısıl işlemlerini uygulayarak aşınma, korozyon hızı ve korozyon davranışlarını incelemiştir. Çalışmada kaplama ve ısıl işlem proseslerinin aşınma ve korozyon direncini üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu açıklamışlardır. Urtekin ve Keleş [19], yaptıkları çalışmada ise ısıl işlem ve kaplamanın Ti6Al4V alaşımı üzerine etkilerini mukavemet ve süneklik özellikleri (plastik bölge) açısından incelemiştir. Çalışmada kaplama ve ısıl işlem proseslerinin Ti6Al4V alaşımının mukavemet değerini olumlu yönde etkilediğini gözlemlenmiştir. Bao ve ark. [20], yaptıkları çalışmada Ti-3Cu alaşımının mekanik özelliklerinin, biyo-korozyon direncinin ve antibakteriyel özelliğinin, uygun ısıl işlem yoluyla mikro yapı kontrolü ile geliştirilebileceğini göstermişlerdir. Hren ve ark. [21], yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımını, deney sırasında kapalı fırında soğutmalı olarak 550°C ve 600°C olmak üzere iki farklı ısıl işlem sıcaklığında 168 ile 720 saat boyunca korozyon yüküne maruz bırakmışlar ve alaşımda hem mekanik özelliklerinin hemde korozyona karşı direncin geliştiğini gözlemlemişlerdir.

Ancak ısıl işlem ile korozyon arasındaki ilişkinin detaylı olarak incelenmesine yönelik çalışmalar sınırlıdır. Literatürdeki bu boşluğun doldurulması, Ti6Al4V alaşımının biyomedikal alanda kullanımının artırılması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma, SBF ve Hank gibi farklı korozif ortamlarda Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliği ve korozyon direnci üzerindeki ısıl işlemin etkisini incelemeyi ve karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca hangi ısıl işlem sürecinin optimum özellikleri sağladığını bulmak için mekanik testler yapılmıştır.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı silindirik parçalara önce kesme işlemi daha sonrada ısıl işlem basamakları uygulanarak, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, testleri yapılmış ve malzemenin kullanım ömrünü etkileyen parametreleri değerlendirmek için kesici ve işlenen yüzeylerin SEM Analizi yapılmış ve açıklanmıştır. Ayrıca SBF ve Hank gibi farklı korozif ortamlarda Ti6Al4V alaşımının korozyon direnci üzerindeki ısıl işlemin etkisini incelenmiştir.

Kullanılan Malzeme ve Numune Hazırlama

İş Parçası Malzemesi

Bu çalışmada, Varzene Metal San. ve Tic. A.Ş'den temin edilmiş 30 mm çap boyutundaki Ti6Al4V alaşımı çubuklar kullanılmıştır. Ti6Al4V alaşımı çubuklarının ortogonal yüzey tornalama işlemi, YouJi Machine Industrial Co. Ltd. Ş. tarafından üretilen CNC tezgâhta gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan iş parçası malzemesinin spektral analizi, Teknolab Teknoloji Laboratuvar Hizmetleri Ltd. Şirketi'nde Spektrocast 11814/00 optik emisyon spektrometresi ile analiz edilmiştir. İş parçası malzemenin kimyasal bileşim değerleri aşağıdaki Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşenleri (Ağ.%,%) [22].

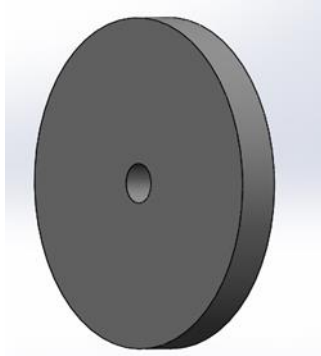
Sınıf	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
Ti6Al4V	6,09	3,9	0,13	0,02	0,01	0,001	0,09	Kalan

Kesme Parametreleri

İş parçası malzemelerini elde etmek amacıyla Ti6Al4V alaşımı çubuklarına kesme işlemi uygulanmıştır. Kesme parametreleri Tablo 2’de verilmiş olup, kesme sıvısı olarak %95’i su ve %5’i ESTRA 320 mikro emülsiyon işleme sıvısından oluşan bir derişim kullanılmıştır. Sonuç olarak deneyde kullanılmak üzere 20 adet 25 mm çapında 2,5 mm kalınlığında iş parçaları elde edilmiştir.

Tablo 2. İş parçası kesme parametreleri.

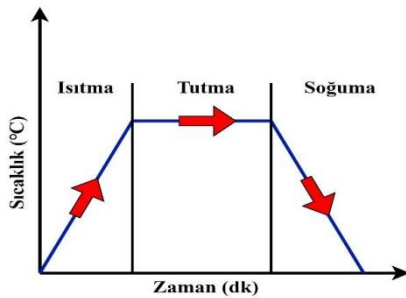
İş parçası Sayısı	Kesme Hızı (m/dak.)	İlerleme Hızı (mm/dev.)	Kesme Derinliği (mm)
20	50	0,35	0,6



Şekil 1. İş parçası örneği

Isıl İşlem Parametreleri

Kesme işlemi sonrasında elde edilen iş parçalarına, CENSAŞ Isıl İşlem San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına ait ısıtma makinaları ile ısıtma işlemi uygulanmıştır. Isıtma işlemi atmosfer kontrollü fırın içerisinde yapılmıştır. Fırın vakum pompasıyla vakumlanarak içerdeki atmosfer gazları boşaltıldıktan sonra yüksek saflıkta argon gazları verilmiştir. Isıtma işlemi uygulandıktan sonra soğutma koşulları hava, su, yağ ve kontrol olmak üzere belirlenmiş ve her soğutma ortamı için beş adet numune kullanılmıştır. Şekil 2’te ısıtma sürecinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. Isıl işlem süreci şematik gösterimi

Tablo 3’te ısıtma koşulları ve parametreleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 3. Isıl işlem parametreleri.

İş Parçası Türü	İş Parçası Sayısı	Isıl İşlem Koşulu
Kontrol	5	Isıl işlemsiz
Suda Soğutulmuş	5	1100°C/20 dak.
Yağda Soğutulmuş	5	1100°C/20 dak.
Havada Soğutulmuş	5	1100°C/20 dak.

Sertlik Testleri

Bu çalışmada iş parçalarının Rockwell sertlik ölçümleri; 980 N yük kapasiteli 2,5 mm bilye çapına sahip Wellmess marka WM-R-C model cihazda yapılmıştır. Sertlik ölçümleri her iş parçasından üç numune seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri ise numunelerin üç farklı noktasından alınan ölçümlerin ortalaması olacak şekilde hesaplanmıştır.

Yüzey Pürüzlülüğü Testleri

Isıl işlem görmüş iş parçaları arasından en yüksek ve en düşük sertlik oranına sahip numuneler seçilmiş ve yüzey pürüzlülük testine tabi tutulması amacıyla tekrardan CNC ile işlenmişlerdir. Yüzey pürüzlülük testleri Mitutoyo Portable Surftest Sj-210 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler seçilen iş parçalarının üç farklı noktasından alınmış ve ortalamaları alınarak yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.

Kesici ve İşlenen Yüzeylerin SEM Analizi

İş parçalarının işlenebilirlik kalitesini analiz etmek amacıyla yüzey pürüzlülüğü testleri öncesinde en düşük ve en yüksek (kontrol ve su) sertlik oranına sahip numuneler CNC ile işlenmişlerdir. CNC ile gerçekleştirilen yüzey tormalama işlemi, 50 m/dak kesme hızında, 0,35 mm/dev ilerleme hızında ve 0,6 mm kesme derinliğinde olacak şekilde ayarlanmış ve uygulanmıştır. Numunelerin işleme sürecinde $TiCN + Al_2O_3 + TiCN$ kaplamalı DNMG karbür tormalama ucu kullanılmış olup kesme sıvısı olarak ise %95’i su %5’i ise ESTRA olan kesme sıvısı kullanılmıştır. İşlenmiş numunelerin ve kesici uçların yüzey SEM analizi, FEI markalı QUANTA FEG 250 model bir tarama elektron mikroskopunda gerçekleştirilmiştir.

Biyokorozyon Testleri

Biyokorozyon testleri elektrokimyasal test yöntemlerini kullanarak korozyon hızının, potansiyelinin ve akım yoğunluğunun ölçülmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada elektrokimyasal test yöntemlerinden olan, Açık Devre Potansiyeli (OCP) ve Tafel deneyleri gerçekleştirilmiştir. OCP testlerinin ana amacı, test işlemi sırasında korozyona karşı direncin ölçülmesi ve korozyona karşı oluşturulan yüzey filmi potansiyelinin belirlenmesidir. Tafel deneyleri ise iş parçasının korozif bir ortamda tutulması sonucunda oluşan elektrokimyasal korozyon hızının kantitatif ve kalitatif biçimde belirlenmesi işlemidir. Kısacası Tafel deneyleri sonucunda elde edilen Tafel eğrileri korozyon hızını (akım yoğunluğu) belirlenmek amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada elektrokimyasal korozyon testleri, SBF ve Hank Solüsyonu içerisinde Potansiyostat yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'te SBF ve Hank solüsyonlarının kimyasal bileşenleri verilmiştir. Hücre düzeneği olarak 3-elektrotlu elektrokimyasal korozyon ölçüm hücresi kullanılmıştır. Karşı elektrot olarak yüksek yoğunluklu grafit, referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot (SCE), olmak üzere elektrotlar ile uygulanmıştır. İlk olarak OCP ölçümü gerçekleştirilmiştir. OCP ölçümüne 2-3 saat süresince, OCP değeri kararlı hale gelene kadar devam edilmiş ve Tafel deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tafel testleri, OCP değerine göre (-250) mv ve (+250) mv arasında 1,0 mv/s tarama hızı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. SBF ve Hank solüsyonlarının kimyasal bileşenleri (g/L) [23], [24].

Kimyasal Bileşenler	SBF	Hank
NaCl	12,053	8
NaHCO ₃	0,533	0,35
KCl	0,338	0,4
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	0,347	-
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0,467	0,1
1 M HCl	50 ml	-
CaCl ₂	0,438	0,14
Na ₂ SO ₄	0,108	-
C ₄ H ₁₁ NO ₃ (Tris)	9,177	-
1 M HCl	8,5 ml	-
Na ₂ HPO ₄ ·2H ₂ O	-	0,06
KH ₂ PO ₄	-	0,6
MgSO ₄ ·7H ₂ O	-	0,06
Glucose	-	1

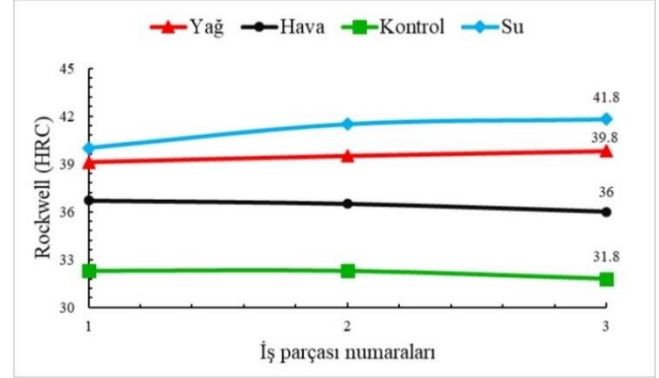
Bulgular ve Tartışma

Sertlik Testleri Sonuçları

Agresif ortamlarda çalışan metalik malzemelerin çoğu mekanik gerilimlere maruz kalır. Bu mekanik gerilimler malzemenin çalıştığı ortamdan gelebileceği gibi malzemelerin kaynak, talaşlı imalat, plastik deformasyonu gibi imalat yöntemlerinden kaynaklanan artık gerilimler de olabilmektedir. Bu tür ortamlarda çalışan elemanların ömrünü belirleyen en önemli faktörlerden biri; stres, korozif ortam ve korozyona duyarlı malzeme faktörlerinin birleşiminden dolayı malzemenin zarar görmesidir [25]. Korozyon, kütle kaybına neden olduğundan biyometalik yapılar için gerçek bir risktir. Isıl işlemin stabilize edilmemiş Ti alaşımlarda sertlik ve mikro yapı değişikliklerine neden olduğu ve korozyon direncini etkileyeceği bilinmektedir. Genel olarak, malzemelerin sertliği yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Isıl işlem süresindeki sıcaklık artışı, numunelerin mikro yapısında değişikliğe yol açmaktadır. Isıl işlem yoğunluğunun artması, malzemenin gözenek yapısının azalmasına ve sertlik direncinin değişmesine neden olduğu bilinmektedir [26], [27], [28]. Sertlik testleri sonucunda elde edilen Şekil 3'teki grafik incelendiğinde; su, yağ ve hava ortamında soğutulmuş iş parçalarının kontrol numunelerine göre sırasıyla yaklaşık olarak %28, %23 ve %13'lük bir fark ile daha yüksek sertlik oranına sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgulara göre iş parçaları türleri arasında su ve yağ sertlik oranı açısından birbirlerine yakın oran göstermiş olsalar da en yüksek sertlik oranına sahip olan iş parçası türü su olmuştur. Suyu

soğutulan numunede sigma fazının etkinliğinin sertliği artırıcı etkiye sahip olduğu düşünülmektedir [29].

Isıl işlem ile yüksek sıcaklığa ulaşan iş parçaları daha sonra su ortamında soğutulması nedeniyle ani sıcaklık değişimine maruz kalarak diğer türlere nazaran çok daha fazla sertleştiği tespit edilmiştir [26], [27], [28], [30], [31].

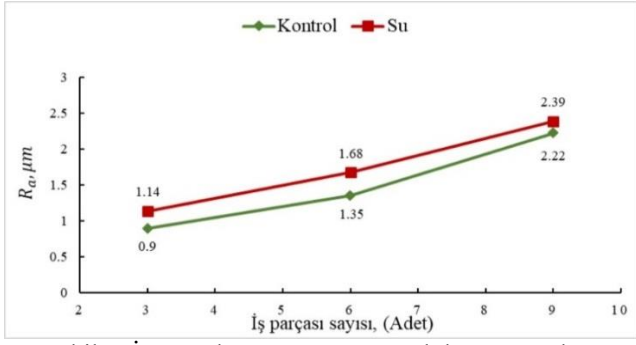


Şekil 3. İş parçalarının Rockwell sertlik deneyi sonuçları.

Yüzey Pürüzlülük Sonuçları

Biyomedikal alanlarda implant olarak kullanılan biyomateryallerin kullanımında yüzey pürüzlülüğü önemli bir parametredir. Biyomalzemelerin yüzey pürüzlülüğü, hidrofilik ve yüzey enerjisi gibi yüzey özelliklerini etkilemesinin yanı sıra korozyon direnci açısından da kritiktir [32]. Titanyum alaşımlarında işlenmiş yüzeyin yüzey pürüzlülüğü, en sık ölçülen kalite özelliklerinden birisidir. Yüzey pürüzlülüğü, implantın hizmet ömrü açısından önemli bir rol oynamaktadır. Isıl işlem yöntemi, iş parçalarının mikro yapısında değişime yol açtığı literatürde de yer almaktadır. İmplant parçası olarak kullanılacak bir Titanyum alaşımının belirli bir yüzey pürüzlülüğü katsayısına sahip olması gerekmektedir. Fakat yüksek yüzey pürüzlülük katsayısına sahip implant yüzeylerinin, sürtünme katsayısı ve aynı zamanda yüzey kirlilik oranının çok daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, iş parçalarının yüzey pürüzlülük oranını tespit etmek amacıyla sertlik ölçümlerinden hemen sonra yüzey pürüzlülüğü testleri gerçekleştirilmiştir.

Isıl işlem görmüş iş parçaları arasından en yüksek ve en düşük sertlik oranına sahip numuneler seçilmiş ve yüzey pürüzlülük testine tabi tutulması amacıyla tekrardan CNC ile işlenmişlerdir. Şekil 4'te en yüksek ve en düşük sertliğe sahip numunelerin yüzey pürüzlülüğü grafiği incelendiğinde; işleme parametrelerinin sabit tutulmasına rağmen işlenen numune sayısının artmasıyla kontrol ve su ile soğutma ortamında ısıl işlem görmüş Ti6Al4V parçalarının yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada işlem görmüş parçalardan su ile soğutulmuş numune kontrol numunesine göre yaklaşık olarak %16,55 artış oranı göstermiştir. Su ve kontrol numuneleri arasındaki yüzey pürüzlülüğü değerindeki fark, parçaların ısıl işlemlere tabi tutulması sonucu mikro yapılarında belirli oranlarda değişimin gerçekleştiğinden kaynaklanmıştır [33], [34], [35].

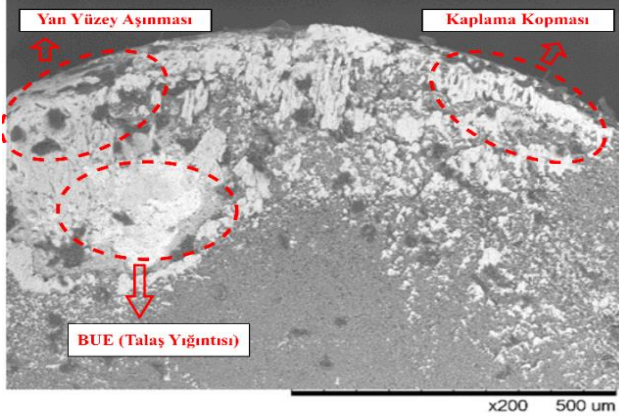


Şekil 4. İş parçalarının yüzey pürüzlülüğü sonuçları.

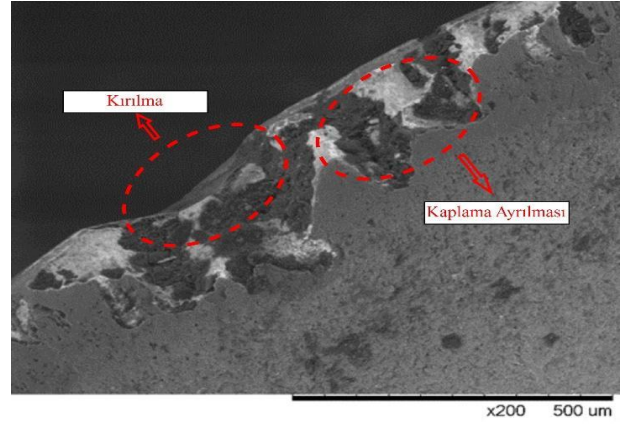
SEM Analizi Test Sonuçları

Kullanım alanının bu derece geniş ve işlenen yüzey kalitesinin oldukça önemli olduğu Ti6Al4V alaşımlarının işlenebilirliği de oldukça önemlidir. Kesici takımın daha uzun ömürlü olabilmesi, iş parçasının da istenilen kalitede üretilerek hammadde israfının önlenmesi için, kesme performansı ve şartlarını iyi belirlemek gerekir. Bunu gerçekleştirebilmek için, kesici takımın kullanım ömrüne etki eden faktörler ve iş parçasının yüzey kalitesinin belirlenmesinde etkili olan etkenler belirlenmelidir [36], [37], [38], [39], [40].

Kontrol ve su ile soğutulmuş numunelerin tornalama işlemi karbür kaplamalı DNMG kesici uç kullanarak gerçekleştirilmiş ve kesici uçta meydana gelen aşınmalar sırasıyla; Şekil.5 ve Şekil. 6'da verilmiştir.



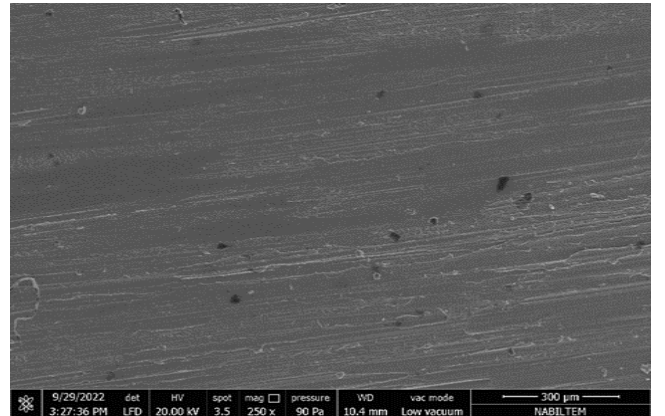
Şekil 5. Kontrol numunelerinin CNC ile işleme sonrası kesici ucun SEM görüntüsü.



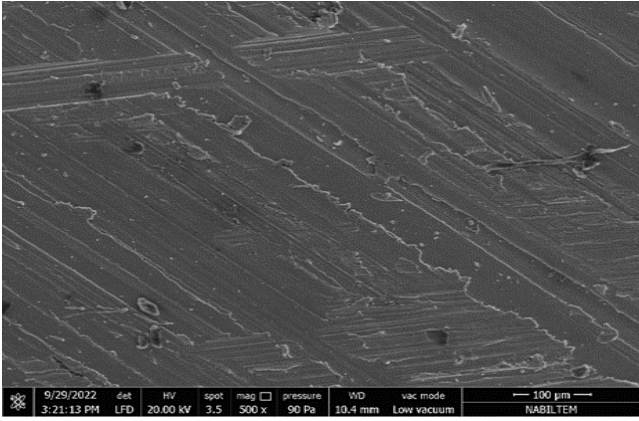
Şekil 6. Su numunelerinin CNC ile işleme sonrası kesici ucun SEM görüntüsü.

Şekil 5'te verilen SEM görüntüsünde burun bölgesindeki yan yüzey aşınması, işleme sırasında özellikle sertlik artışından dolayı açığa çıkan yüksek sıcaklıktan dolayı kesici ucun burun kısmının plastik deformasyona maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kesici ucun kaplama yapısı bozulmuş ve kesici yüzeyinde kaplama kopması gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan birçok çalışmada bunu desteklemektedir [41], [42], [43], [44], [45]. Şekil 5. ve Şekil 6.'da sırasıyla kontrol ve su numunelerinin CNC ile işleme sırasında kullanılan DNMG kesici uçlarının SEM görüntüleri incelendiğinde, sertlik değeri arttıkça kesici uçlarda ki aşınmanın arttığı ve su ortamında soğutulan iş parçasının burun kısmında oluşan kırılma belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Kontrol numunesinin işlenmesi sonucunda kesici takımın kesme kenarı ve yan yüzeyinde olmak üzere sürtünmeden kaynaklı yan yüzey aşınması, kırılma ve kaplama kopması meydana gelmiştir. Kesme esnasında sertlik, sıcaklık artışı ve yığıntı talaş sertliğinin artışına karşılık mukavemet azalmış ve azalan dayanım kesici ucun kenarında kopmalara sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 7. ve Şekil 8.'de ise sırasıyla; kontrol ve su ortamında soğutulmuş numunelerin tornalama sonrası işlenen yüzeylerindeki aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7. Kontrol numunelerinin tornalama işlemi sonrası yüzey aşınma SEM görüntüsü.

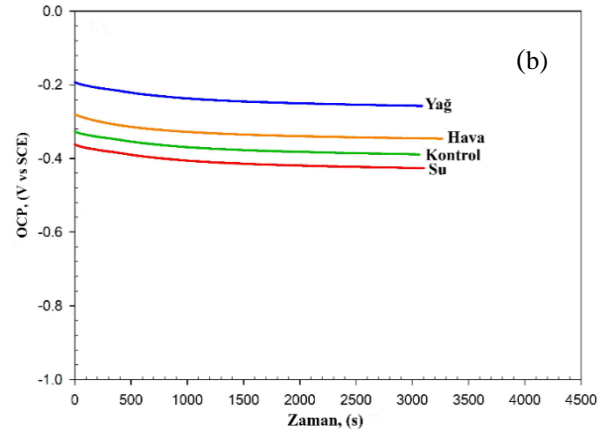
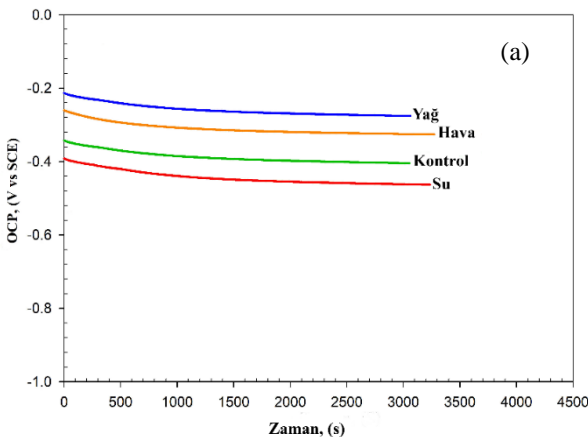


Şekil 8. Su numunelerinin tornalama işlemi sonrası yüzey aşınma SEM görüntüsü.

Şekil 7. ve Şekil 8.'de verilen görüntüler incelendiğinde; sertlik oranının daha yüksek olduğu su ortamında soğutulmuş numunelerin sahip olduğu besleme izlerinin kontrol numunelerine göre çok daha belirgin olduğu görülmüştür. Sertliğin artmasıyla kesici uçların oluşturduğu besleme izlerinin artışı ve yüzey kalitesinin bozulduğu görülmektedir. Bu durum kesici takımındaki kaplamasının yerinden atıp kesici ucu ve dolayısıyla işlenen yüzeyi bozmasıyla ilgilidir [46]. Önceki bölümde verilen yüzey pürüzlülük sonuçları ile uyum içerisinde.

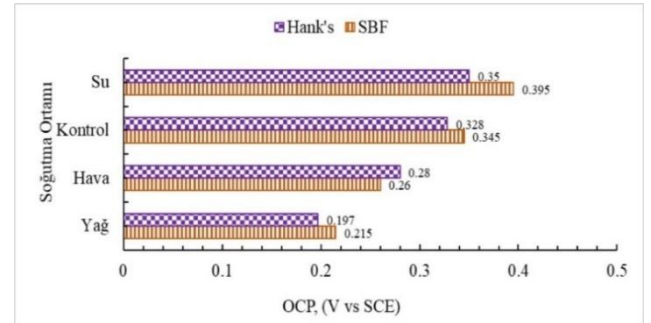
Biyokorozyon Test Sonuçları

Titanyum alaşımları, karbon başta olmak üzere diğer elementlere karşı gösterdiği tepkiden dolayı ısı işlem sonucunda, gevrekleşmekte ve yüzey katmanı dış ortam ile reaksiyona girerek kimyasal ürünler üretebilmektedir [47]. Gerçekleşen bu reaksiyon işlemine korozyon adı verilmektedir. Biyokorozyon ise implant yüzeyinde kimyasal bir reaksiyonun gerçekleşmesi sonucunda, oksijen, hidroksit ve benzeri istenmeyen elementlerin açığa çıkmasıyla implant yüzeyinin aşınması olarak adlandırılmaktadır [48], [49]. Biyokorozyon aynı zamanda biyomalzemelerin kimyasal veya elektrokimyasal etkileşimleri sonucunda malzeme yüzeyinde meydana gelen değişimler olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 9 (a) ve (b)'de sırasıyla, SBF ve Hank solüsyonunda bulunan Ti6Al4V alaşımı iş parçalarının OCP test sonuçları verilmiştir.



Şekil 9. (a) Açık Devre Potansiyel testi, SBF solüsyonu, (b) Açık Devre Potansiyel testi, Hank solüsyonu.

Şekil 9. (a) ve (b)'de verilmiş olan OCP-Zaman grafikleri incelendiğinde, iş parçası türleri arasından su ile soğutma dışındaki diğer türlerin korozyon dirençlerinin daha yüksek olduğu ve koruyucu film oluşturdukları görülmektedir. Şekil 9. (a) ve (b) 'de verilen OCP-Zaman grafiklerine göre SBF solüsyonunda bulunan yağ, hava, kontrol ve su iş parçası türlerinin OCP değerleri sırasıyla; -0,215 V – 0,26 V -0,345 V ve -0,395 iken, Hank's solüsyonunda ise sırasıyla; -0,197V, -0,28V, -0,328V ve -0,36V'a doğru kaydığı görülmektedir. Ölçülen değerler arasındaki farkın daha anlaşılabilir olması amacıyla Şekil 10'da farklar grafiği çizdirilmiştir.



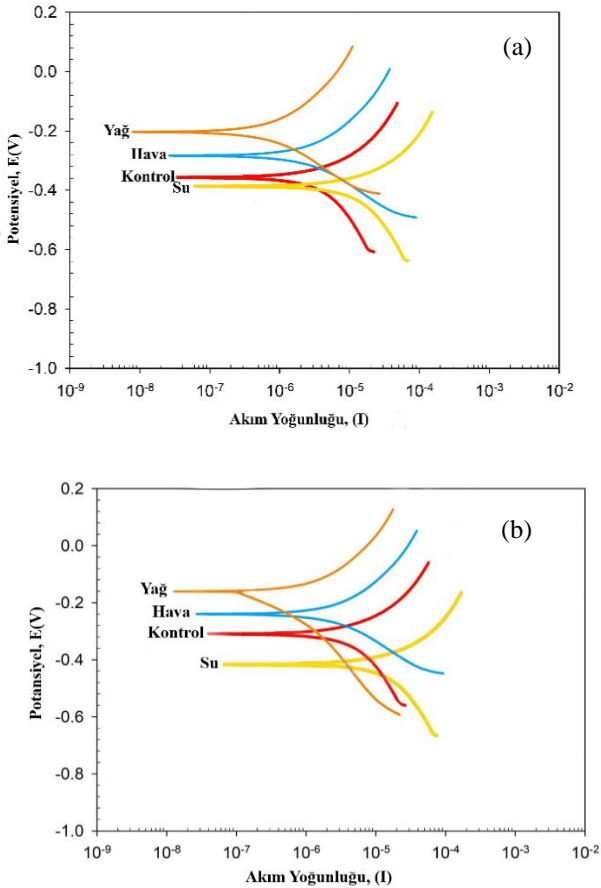
Şekil 10. SBF ve Hank solüsyonunda Ti6Al4V numunelerin OCP değerlerinin değişimi

Ti6Al4V kontrol malzemesine göre yağ, hava ve su soğutma şartları altında bu numunelerin korozyona karşı direnci SBF solüsyonunda sırasıyla; %38, %34 ve %-14 oranlarında olduğu görülmektedir. Ti6Al4V kontrol malzemesine göre yağ, hava ve su soğutma şartları altında bu numunelerin korozyona karşı direnci Hank solüsyonunda sırasıyla; %40, %20 ve %-7 oranlarında olduğu görülmektedir. Bu çalışmada Hank solüsyonunun SBF solüsyonuna göre yağ, hava, kontrol ve su soğutma şartları altında %8, %-8, %5 ve %11 şeklinde artış ve azalma olduğu tespit edilmiştir. Isıl işlem sonrası değişen yüzey özellikleri de bu değişimi etkilemektedir. Yüzey oluklarında, klorür ortamından gelen aşındırıcı iyonların konsantrasyonu çukurlar oluşturur ve daha sonra bu tepe noktalarında çatlak başlangıcı tetiklenir [50]. Cl konsantrasyonunun artırılması hem genel korozyon

hasarını hem de çatlak yayılma hızını artmaktadır. Bu nedenle tüm numunelerde en fazla korozyon, yüksek HCl konsantrasyonuna sahip SBF çözeltisinde meydana geldi. SBF çözeltisinde korozyon sonrası Ra değerlerinin artması da bu sonucu desteklemektedir. Sonuçlar, ısıl işlemin ve korozif ortamın korozyon direnci açısından yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Literatürde sonuçlarımızı destekleyen benzer yaklaşımlar mevcuttur [51].

Şekil 9. (a) ve (b)'de gösterildiği üzere, OCP eğrisi sıfıra ne kadar yakın olursa numunelerin korozyona olan direnci o kadar yüksek olduğu söylenebilir. Her iki solüsyonda gerçekleştirilen test sonuçlarına göre, yağ ortamında soğutulan iş parçası türlerinin korozyon direncinin diğer türlere nazaran yüksek olduğu gözükmemektedir. Farklı ısıl işlem süreçleri sonrası değişen sertlik ve yapı elektrokimyasal dataların değişmesine ve pasif alanlarda dataların saçılmalarına neden olmaktadır [52].

Literatürde ısıl işlem sonrasında iş parçalarının yağ ile soğutulması, numuneler üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturmuş ve korozyona karşı direncini arttırmış olabileceği düşünülmektedir [53], [54], [55], [56]. Numunelerin Hank solüsyonu sonuçları, hava ile soğutulan iş parçası türleri hariç SBF sonuçlarına göre çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Şekil 11. (a) ve (b)'de sırasıyla, SBF ve Hank solüsyonunda bulunan Ti6Al4V alaşımı iş parçalarının Tafel eğrisi test sonuçları verilmiştir.



Şekil 11. (a) Tafel eğrisi, SBF solüsyonu, (b) Tafel eğrisi, Hank solüsyonu.

Soğutma türüne göre Ti6Al4V alaşımlarının korozyona gösterdikleri direnç farklılığı, Şekil 11. (a) ve (b)'de açıkça görülmektedir. Düşük korozyon akımı düşük korozyon hızı anlamına gelmekte ve yüksek korozyon potansiyeli ise yüksek aşınma dayanımı olarak ifade edilmektedir. SBF ve Hank solüsyonlarında gerçekleştirilen test sonuçlarına bakıldığında, su ortamında soğutulmuş olan Ti6Al4V alaşımı numunelerinde korozyon direncinin çok daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Yağ ortamında soğutulmuş numunelerin Tafel eğrileri ise düşük akım yoğunluğu ve yüksek potansiyel özellik göstermiştir. Bu durum biyometalik yapıda olan Ti6Al4V alaşımının ısıl işlem sonrası mikro yapısının değiştiğini ve elektrolit ortamda iyon salınım oranının azaldığını olduğunu göstermektedir. Isıl işleme tabi tutulan parçaların ana malzemeye göre daha iyi korozyon dayanım özellikleri elde etmesinin temel nedeninin, ısı girdisinin etkisiyle mikro yapıda meydana gelen değişime bağlı olarak sertlik değerlerinin artması olduğu varsayılmaktadır [57].

Genel Sonuçlar

Bu çalışmada ısıl işlem soğutma ortamlarının Ti6Al4V alaşımının sertlik, yüzey pürüzlülüğü, aşınma özellikleri ve korozyon üzerine olan etkileri incelenmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Isıl işlem soğutma ortamlarının Ti6Al4V alaşımının sertliği üzerine etkisinin olduğu çok net bir şekilde görülmüştür. Su, yağ ve hava ile soğutma ortamlarında sırasıyla; %28, %23 ve %13 sertlik artışı tespit edilmiştir.
- İşlenen numune sayısının artmasıyla kontrol ve su ile soğutma ortamında ısıl işlem görmüş parçaların yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Su ile soğutulmuş numunenin kontrol numunesine göre, yüzey pürüzlülüğü değerinde yaklaşık olarak %16,55 artış oranı göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğü artışı metalik malzemelerde aşınma ile ters orantılı, canlılık ve çoğalma için doğru orantılıdır.
- Sertlik değeri arttıkça kesici uçlarda aşınma artışı tespit edilmiştir. Su numunesinin işlenmesi sonucunda kesici takımının burun kısmında oluşan kırılma tespit edilmiştir. İşlem sonrası kesici takımın kesme kenarı ve yan yüzeyinde olmak üzere sürtünmeye bağlı yan yüzey aşınması tespit edilmiştir. Ayrıca sertliğin artması ile kesici uçların oluşturduğu besleme izlerinin arttığı ve yüzey kalitesinin bozulduğu görülmüştür.
- Ti6Al4V alaşımının OCP test sonuçlarına göre; su ile soğutma işlemi dışında diğer soğutma şartlarında yüzeylerde koruyucu film oluşturduğu görülmüştür. SBF ve Hank solüsyonlarında korozyon direnci değerlerinde yağ ve hava ile artış gösterirken su ile işlenmiş numunelerde azalma tespit edilmiştir.

- Tafel eğrisi sonuçlarında; SBF ve Hank çözeltilerinde su ortamında soğutulan Ti6Al4V numunelerinde korozyon direncinin daha düşük olduğu görülmüştür. Yağda soğutma sonrası Tafel eğrileri daha düşük akım yoğunluğu ve yüksek potansiyel göstermiştir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Ayrıca hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit derecede katkıda bulunmuştur.

Kaynaklar

- [1] Z. D. Çırak ve D. B. Yakıncı, "Tibbi uygulamalarda kullanılan biyoyumlu biyomalzemeler", *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, c. 8, sy 2, ss. 515-526, 2020.
- [2] J. Park ve R. S. Lakes, *Biomaterials: an introduction*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] B. D. Ratner, A. S. Hoffman, F. J. Schoen, ve J. E. Lemons, *Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*. Academic Press, Elsevier, 2004.
- [4] Y. Kayalı, Ş. Talaş, Y. Yalçın, ve C. Taşkın, "H2 plazma ön işleminden sonra anodik oksidasyon uygulanmış Ti6Al4V alaşımının elektrokimyasal korozyon davranışının incelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 17, sy 3, ss. 1088-1095, 2017.
- [5] F. Taylan ve O. Nazım, "Ti-6AL-4V ELI malzemesinin tornalama işleminde yüksek basınçlı jet soğutmanın yüzey pürüzlülüğüne etkisi", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, c. 10, sy 1, ss. 31-46, 2018.
- [6] T. P. S. Sarao, H. Singh, ve H. Singh, "Enhancing Biocompatibility and Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V Alloy by Surface Modification Route", *J Therm Spray Tech*, c. 27, sy 8, ss. 1388-1400, Ara. 2018, doi: 10.1007/s11666-018-0746-7.
- [7] M. Armendia, P. Osborne, A. Garay, J. Belloso, S. Turner, ve P.-J. Arrazola, "Influence of Heat Treatment on the Machinability of Titanium Alloys", *Materials and Manufacturing Processes*, c. 27, sy 4, ss. 457-461, Nis. 2012, doi: 10.1080/10426914.2011.585499.
- [8] S. Bruschi, R. Bertolini, A. Bordin, F. Medea, ve A. Ghiotti, "Influence of the machining parameters and cooling strategies on the wear behavior of wrought and additive manufactured Ti6Al4V for biomedical applications", *Tribology International*, c. 102, ss. 133-142, Eki. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.036.
- [9] T. Özel, M. Sima, A. K. Srivastava, ve B. Kaftanoglu, "Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations", *CIRP annals*, c. 59, sy 1, ss. 77-82, 2010.
- [10] Y. Qin vd., "Adaptive-lubricating PEO/Ag/MoS2 multilayered coatings for Ti6Al4V alloy at elevated temperature", *Materials & Design*, c. 107, ss. 311-321, 2016.
- [11] G. Ateş, "Ti6Al4V titanyum alaşımının iç yapısı ve yüzey özellikleri üzerine termokimyasal işlem parametrelerinin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2018.
- [12] G. Lütjering ve J. C. Williams, Ed., "Special Properties and Applications of Titanium", içinde *Titanium*, içinde Engineering Materials, Processes. , Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, ss. 383-415. doi: 10.1007/978-3-540-73036-1_10.
- [13] E. C. Santos, M. Morita, M. Shiomi, K. Osakada, ve M. Takahashi, "Laser gas nitriding of pure titanium using CW and pulsed Nd:YAG lasers", *Surface and Coatings Technology*, c. 201, sy 3, ss. 1635-1642, Eki. 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.048.
- [14] Y. S. Tian, C. Z. Chen, S. T. Li, ve Q. H. Huo, "Research progress on laser surface modification of titanium alloys", *Applied Surface Science*, c. 242, sy 1, ss. 177-184, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.011.
- [15] Z. Tüylek, "Biyomateryaller ve sağlıkta kullanımı", *Bozok Tıp Dergisi*, c. 7, sy 4, Art. sy 4, Ara. 2017.
- [16] S. Erkan, "Bakır nanopartikül kaplama sonrası Ti6Al4V alaşımının antibakteriyel, biyoyumluluk ve biyokorozyon özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, 2022. Erişim: 01 Nisan 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [17] A. Parsapour, S. N. Khorasani, ve M. H. Fathi, "Effect of Surface Treatment and Metallic Coating on Corrosion Behavior and Biocompatibility of Surgical 316L Stainless Steel Implant", *Journal of Materials Science & Technology*, c. 28, sy 2, ss. 125-131, Şub. 2012, doi: 10.1016/S1005-0302(12)60032-2.
- [18] X. Liu, P. K. Chu, ve C. Ding, "Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, c. 47, sy 3-4, ss. 49-121, 2004.
- [19] L. Urtekin ve Ö. Keleş, "Biyomedikal Uygulamalar İçin TiN Kaplı Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", *Savunma Bilimleri Dergisi*, c. 18, sy 36, ss. 91-108, 2019.
- [20] M. Bao vd., "Optimization of mechanical properties, biocorrosion properties and antibacterial properties of wrought Ti-3Cu alloy by heat treatment", *Bioactive materials*, c. 3, sy 1, ss. 28-38, 2018.
- [21] I. Hren, S. Kuśmierczak, R. Horký, ve J. Mach, "Analysis of the Effect of Heat Treatment and Corrosion Load on the Microstructure and Microhardness of the Ti6Al4V Alloy", *Manufacturing Technology*, c. 22, sy 4, ss. 414-422, 2022.

- [22] S. N. Sawant, S. K. Patil, D. R. Unune, P. Nazare, ve S. Wojciechowski, "Effect of copper, tungsten copper and tungsten carbide tools on micro-electric discharge drilling of Ti-6Al-4V alloy", *Journal of Materials Research and Technology*, c. 24, ss. 4242-4257, May. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.067.
- [23] M. Talha, C. K. Behera, ve O. P. Sinha, "Potentiodynamic polarization study of Type 316L and 316LVM stainless steels for surgical implants in simulated body fluids", *Journal of chemical and Pharmaceutical research*, c. 4, sy 1, ss. 203-208, 2012.
- [24] M. Yazıcı, O. Çomaklı, T. Yetim, A. F. Yetim, ve A. Çelik, "The effect of plasma nitriding temperature on the electrochemical and semiconducting properties of thin passive films formed on 316 L stainless steel implant material in SBF solution", *Surface and Coatings Technology*, c. 261, ss. 181-188, 2015.
- [25] A. Almubarak, W. Abuhaimed, ve A. Almazrouee, "Corrosion behavior of the stressed sensitized austenitic stainless steels of high nitrogen content in seawater", *International Journal of Electrochemistry*, c. 2013, 2013.
- [26] J. M. S. Al-Murshdy ve B. J. Ghayyib, "Effect of heat treatment on properties of titanium biomedical alloy", *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, c. 27, sy 1, ss. 232-246, 2019.
- [27] J. M. Salman ve M. L. Aziz, "Some properties of biomedical Ti6Al4V alloy in different solutions", *The Iraqi Journal for Mechanical and Materials Engineering*, c. 19, sy 2, ss. 138-156, 2019.
- [28] B. Vrancken, L. Thijs, J.-P. Kruth, ve J. Van Humbeek, "Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties", *Journal of Alloys and Compounds*, c. 541, ss. 177-185, Kas. 2012, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.07.022.
- [29] Y. H. Kim vd., "The effect of sigma phases formation depending on Cr/Ni equivalent ratio in AISI 316L weldments", *Materials & Design*, c. 32, sy 1, ss. 330-336, 2011.
- [30] D. R. Askeland, P. P. Phulé, W. J. Wright, ve D. K. Bhattacharya, "The science and engineering of materials", 2003.
- [31] X. Yan vd., "Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting", *Journal of Alloys and Compounds*, c. 764, ss. 1056-1071, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.06.076.
- [32] T. Hryniewicz, R. Rokicki, ve K. Rokosz, "Corrosion and surface characterization of titanium biomaterial after magnetoelectropolishing", *Surface and Coatings Technology*, c. 203, sy 10-11, ss. 1508-1515, 2009.
- [33] H. Başak ve Ş. Baday, "Küreselleştirilmiş orta karbonlu bir çeliğin işlenmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin regresyon analizi ile modellenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 22, sy 4, Art. sy 4, Ağu. 2016.
- [34] E. Cerri, E. Ghio, ve G. Bolelli, "Effect of surface roughness and industrial heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy manufactured by laser powder bed fusion in different built orientations", *Materials Science and Engineering: A*, c. 851, s. 143635, Ağu. 2022, doi: 10.1016/j.msea.2022.143635.
- [35] P. Thao Mai, T. Bormann, R. Sonntag, J. Philippe Kretzer, ve J. Gibmeier, "Short-term heat treatment of Ti6Al4V ELI as implant material", *Materials*, c. 13, sy 21, ss. 1-14, 2020.
- [36] H. Gökkaya, "AA5052 alaşımının işlenmesinde işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 12, sy 3, Art. sy 3, Mar. 2006.
- [37] A. R. Motorcu, "Isıl işleme sertliği 53 HRC'ye çıkarılmış AISI 1050 çeliğinin kaplamalı karbür takımla işlenmesinde takım aşınmasının değerlendirilmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 12, sy 3, Art. sy 3, Mar. 2006.
- [38] M. cemel Çakir ve K. Özdemir, "Kesme parametrelerinin başlangıç aşınmasına etkisinin deneysel olarak incelenmesi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 13, sy 2, Art. sy 2, Ağu. 2008, doi: 10.17482/uujfe.55280.
- [39] Y. Kayır ve A. Aytürk, "AISI 316Ti paslanmaz çeliğin işlenebilirlik karakteristiklerinin incelenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 18, sy 1, 2012.
- [40] R. Lindvall, F. Lenrick, R. M'Saoubi, J.-E. Ståhl, ve V. Bushlya, "Performance and wear mechanisms of uncoated cemented carbide cutting tools in Ti6Al4V machining", *Wear*, c. 477, s. 203824, Tem. 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203824.
- [41] P.-J. Arrazola, A. Garay, L.-M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, ve F. Le Maître, "Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)", *Journal of Materials Processing Technology*, c. 209, sy 5, ss. 2223-2230, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020.
- [42] N. Muthukrishnan ve P. Davim, "Influence of coolant in machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V)", *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, c. 2011, 2011.
- [43] S. Pervaiz, A. Rashid, I. Deiab, ve C. M. Nicolescu, "An experimental investigation on effect of minimum quantity cooling lubrication (MQCL) in machining titanium alloy (Ti6Al4V)", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 87, ss. 1371-1386, 2016.
- [44] S. Ramesh, L. Karunamoorthy, ve K. Palanikumar, "Surface roughness analysis in machining of titanium alloy", *Materials and Manufacturing Processes*, c. 23, sy 2, ss. 174-181, Oca. 2008, doi: 10.1080/10426910701774700.
- [45] K. A. Venugopal, S. Paul, ve A. B. Chattopadhyay, "Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling", *Wear*, c. 262, sy 9, ss. 1071-1078, Nis. 2007, doi: 10.1016/j.wear.2006.11.010.
- [46] N. B. Ullen, S. M. A. Hasak, ve M. H. Dirikolu, "Factors influencing the machinability during turning

- sinter-hardened Cu-Ni-Mo based steel: Dependency on cutting speed, feed rate and cutting depth”, *Journal of Engineering Research*, c. 8, sy 4, 2020.
- [47] E. Ünal ve F. Karaca, “Ti – 6Al – 4V alaşımının dik işlem merkezli CNC tezgahında işlenebilirliğinin araştırılması”, (*DAD*), c. 6, sy 1, Art. sy 1, Kas. 2007.
- [48] H. Kazancıoğlu, S. Kılıç, ve A. K. Gülsüm, “Titanyum dental implantlarda korozyon”, *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, c. 24, sy Supplement 8, ss. 82-87, 2015.
- [49] A. C. Tas, “Synthesis of biomimetic Ca-hydroxyapatite powders at 37 C in synthetic body fluids”, *Biomaterials*, c. 21, sy 14, ss. 1429-1438, 2000.
- [50] S. Ghosh, V. P. S. Rana, V. Kain, V. Mittal, ve S. K. Baveja, “Role of residual stresses induced by industrial fabrication on stress corrosion cracking susceptibility of austenitic stainless steel”, *Materials & Design*, c. 32, sy 7, ss. 3823-3831, 2011.
- [51] L. Tóth, F. Haraszti, ve T. Kovács, “Surface roughness effect in the case of welded stainless steel corrosion resistance”, *Acta Materialia Transylvanica*, c. 1, sy 1, ss. 53-56, 2018.
- [52] Z. E. Sánchez-Hernández, M. A. Dominguez-Crespo, A. M. Torres-Huerta, E. Onofre-Bustamante, J. A. Adame, ve H. Dorantes-Rosales, “Improvement of adhesion and barrier properties of biomedical stainless steel by deposition of YSZ coatings using RF magnetron sputtering”, *Materials characterization*, c. 91, ss. 50-57, 2014.
- [53] F. R. García-Galvan, S. Fajardo, V. Barranco, ve S. Feliu Jr, “Experimental apparent stern–geary coefficients for AZ31B Mg alloy in physiological body fluids for accurate corrosion rate determination”, *Metals*, c. 11, sy 3, s. 391, 2021.
- [54] P. O. Omoniyi, E. T. Akinlabi, R. M. Mahamood, ve T. C. Jen, “Corrosion resistance of heat treated Ti6Al4V in NaCl”, *Chemical Data Collections*, c. 36, s. 100780, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.cdc.2021.100780.
- [55] N. Pulido-González, P. Hidalgo-Manrique, S. García-Rodríguez, B. Torres, ve J. Rams, “Effect of heat treatment on the mechanical and biocorrosion behaviour of two Mg-Zn-Ca alloys”, *Journal of Magnesium and Alloys*, c. 10, sy 2, ss. 540-554, Şub. 2022, doi: 10.1016/j.jma.2021.06.022.
- [56] E. Zhang, J. Ren, S. Li, L. Yang, ve G. Qin, “Optimization of mechanical properties, biocorrosion properties and antibacterial properties of as-cast Ti–Cu alloys”, *Biomed. Mater.*, c. 11, sy 6, s. 065001, Eki. 2016, doi: 10.1088/1748-6041/11/6/065001.
- [57] J. C. Lippold, *Welding metallurgy and weldability*. John Wiley & Sons, 2014. Erişim: 07 Nisan 2024.



3U ve 12U küp uyduların fırlatma ve uzay koşullarındaki yapısal davranışlarının incelenmesi

Investigation of structural behaviors of 3U and 12U cube satellites under launch and space conditions

Ahmet ÖZDEMİR¹, Şakir ALTINSOY^{2*}, Nuray BEKÖZ ÜLLEN³, M. Hüsnü DİRİKOLU⁴

^{1*} İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ozdemirahmed93@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3315-3877

^{2*} İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, sakir.altinsoy@yeniyuzyil.edu.tr

ORCID: 0000-0002-1893-2266

³ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, nbekoz@iuc.edu.tr

ORCID: 0000-0003-2705-2559

⁴ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, dirikolumh@iuc.edu.tr

ORCID: 0000-0001-6279-2283

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 06 Mart 2024
Revizyon 04 Nisan 2024
Kabul 16 Nisan 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Kompozit güneş paneli, küp uydular, güneş yelkenli, fırlatma kutusu.

ÖZ

Günümüzde uzay ortamındaki çalışmalara yönelik bilimsel araştırmalarda, işlevsellik ve maliyet açısından uygun olan çeşitli uydular ve bileşenleri geliştirilmektedir. Bunlar arasında küp uydular düşük olan fırlatma maliyetleri nedeniyle araştırma ve geliştirme projelerinde yoğun ilgi görmektedir. Uyduda fırlatma sırasında oluşabilecek hataları önlemek için küp uyduların tasarımları ve testleri geliştirilmelidir. Bu çalışmada, 3U ve 12U tipi küp uyduları ve fırlatma kutusunun (P-POD) en kritik alt sistemlerinin tasarımları Solidworks 3D CAD programı kullanılarak yapılmıştır. Hafiflik, üretilebilirlik ve göreceli rijitlik gibi özellikleri nedeniyle uydu üretiminde Al 6061-T1 (Al-Mg-Si) alaşımı tercih edilmiştir. Söz konusu küp uydular için şasi yapısı, alt sistemleri, dağıtım mekanizmaları ve fırlatma kutusu için katı modellemeler oluşturulmuş ve ardından tüm parçalar montaj edilerek nihai küp uydu model tasarımları tamamlanmıştır. Daha sonra bu tasarımlar esas alınarak, Dünya yüzeyindeki ve uzay ortamındaki statik ve titreşim analizleri ANSYS 2022-R1 paket programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Son olarak uyduların fırlatma ve uzay koşullarında ortaya çıkan yapısal davranış farklılıkları karşılaştırılmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 06 March 2024
Received in revised form 04 April 2024
Accepted 16 April 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Composite solar panel, solar sail, CubeSats, dispenser box.

ABSTRACT

Today, in scientific research for studies in the space environment, various satellites and their components that are suitable in terms of functionality and cost are being developed. Among these, cube satellites attract great attention in research and development projects due to their low launch costs. The designs and tests of cubesats must be improved to prevent errors that may occur during satellite launch. In this study, the designs of the most critical subsystems of 3U and 12U type cubesats and the launch box (P-POD) were made using Solidworks 3D CAD program. Al 6061-T1 (Al-Mg-Si) alloy was preferred in satellite production due to its features such as lightness, manufacturability and relative rigidity. Solid models were created for the chassis structure, subsystems, distribution mechanisms and launch box for the cubesats in question, and then all parts were assembled and the final cubesat model designs were completed. Then, based on these designs, static and vibration analyzes on the Earth's surface and in the space environment were examined with the finite element method using the ANSYS 2022-R1 package program. Finally, the differences in structural behavior of the satellites that occur under launch and space conditions are compared.

Doi: 10.24012/dumf.1447963

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yapay uydular dünyanın ve diğer gezegenlerin yörüngelerine belirli amaçlar için yerleştirilen bilgisayar kontrollü yarı bağımsız uzay araçlarıdır. Yapay uyduları meydana getiren belli başlı kısımlar; güneş paneli ve batarya gibi güç kaynakları, roket esaslı motor, bilgi aktarımı yapan anten ve uydunun hareketlerini kontrol eden yerleşik işlemcilerdir [1]. Yapay uyduların başlangıçta çalışmasında kullanılan enerji ilk aşamada uydu içerisinde bulunan bataryalardan temin edilir. Ancak uydu aracında bulunan bataryalar kullanım ömrü bittiğinde devre dışı kalırlar. Bu durum uydu ile iletişimin kopmasına, uydunun yörüngeden çıkmasına, uydunun kontrolden çıkmasına, uzay boşluğunda artan hızlarla tehlikeli şekilde savrulmasına ve ciddi boyutta maliyet içeren hasarlara neden olur. Bu tür olumsuzluklarla karşılaşılması için bataryalar tükendiğinde devreye çözüm olarak güneş panelleri girmektedir. Güneş diğer çevresel unsurlara göre oldukça büyük boyutta olduğundan uyduların en büyük ısı yük kaynağıdır. Bu yüzden birçok tasarım sürecinde güneş panelleri önemli rol oynamaktadır [2]. Güneş panelleri gereken enerjiyi doğal bir kaynak olan güneşten sağlayarak uyduların kullanım ömrünü uzatırlar. Bu paneller dağıtım mekanizmaları ile uzay aracının iskelet yapılarına monte edilir ve uydu iskeleti ile panellerini taşıyan güneş yelkenleri arasında mekanizmalı bağlantı elde edilir. İhtiyaç duyulan enerjiyi sağlamakta yararlanılan güneş panellerinin güvenli kullanımını sağlayan en önemli ekipman dağıtım mekanizmalarıdır. Bunlar güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek ve alt yapıda var olan sistem elemanlarını besleyen önemli mekanizmalardır. Bu mekanizmalar güneşten gelen ışınların geliş açısına göre hareket ederek maksimum seviyede enerji alınmasını sağlar. Böylece uydular uzay ortamında güneş enerjisinden daha yüksek verimlilikle yararlanır.

İlk kullanılan uyduların yapısal olarak büyük boyutlu olması ve üretim ve fırlatma maliyetlerinin çok yüksek bütçeli olması, daha düşük maliyetli ve nispeten gözden çıkarılabilir sistemlere sahip farklı uyduların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Farklı görevler için farklı boyut ve kütleyle sahip bu uydular kütlelerine göre büyükten küçüğe mini, mikro, nano, pico ve femto uydu olarak sınıflandırılabilir. Küp uydu boyut olarak “U birimi” ile ifade edilir ve ihtiyaca göre 2U, 3U, 6U ve 12U boyutlarında olabilir [3], [4]. Gelişen küp uydu teknolojisi ile günümüzde küp uydular bilimsel çalışmalar, haberleşme, sistemlerin radyasyon dayanımlarının tespiti, eğitim, hava durum tahminleri ve gözlemler gibi birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Küp uyduların gelişimindeki başlıca nedenler; oldukça küçük boyutlarda sahip olması, boyutsal seçeneğin genişliği, test edilebilirliği, fırlatma hizmeti için çok sayıda opsiyonunun olması, karmaşık sistemler içermemesi, üretim ve işletme maliyetlerinin ekonomik oluşudur. Ayrıca, büyük uydulara kıyasla gereken noktalarda risk alınıp gözden çıkarılabilir. Tüm bu özellikleri göz önüne alındığında kullanım alanının giderek daha da genişleyeceği kaçınılmazdır [3], [4]. Küp uydular gerek bilim dünyasının gerekse endüstriyel kurumların araştırma ve geliştirme projeleri kapsamında

oldukça ilgi görmektedir. Küp uydularla ilgili bazı çalışmalar olmasına rağmen konunun önemi göz önüne alındığında çalışma sayısı artırılmalıdır. Wallace ve diğ., [5] EIRSAT-1 küp uydusunun ısı modellemesinin yapmışlardır ve ön tasarım aşamasında Autocad-Thermal Desktop yörünge ısıtım programı kullanmışlardır. Dinh [6], nano uydunun performans analizini pasif kontrol ile Thermal Desktop programında belirlemiştir. Coker [7], 1,5 küp uydu modellemesini gerçekleştirmiş ve analizlerini aynı programda gerçekleştirmiştir. Tsai [8] araştırmalarında küp uydu modelleri üzerinde analitik çözümler gerçekleştirmiştir. Czernik [9], 10x10x10 cm³ küp uydu paneli üzerine analitik çözümler üreterek, panellerin termo-optik özelliklerinin etkisini incelemiştir.

Küp uyduların malzeme seçimi ve tasarımında uzay ortamı, radyasyon, sıcaklık, aerodinamik, oksitlenme, plazma ve vakum etkileri gibi birçok unsur dikkate alınmalıdır. Bunun yanı sıra küp uydunun maliyeti, ağırlığı, üretilebilirliği, sürdürülebilirliği, kullanım ömrü ve şekil verilebilirliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Küp uyduların düşük ağırlık gereksinimi, düşük yoğunluğa sahip metal alaşımları ve kompozit esaslı malzemelerin kullanımı gerektirmiştir. Al alaşımları içinde Al 6061-T1 alaşımı silikon ve magnezyum içeriğinden dolayı çok yönlü ısı işlem görebilen alaşımlardan biridir. Çok iyi mekanik özelliklere ve korozyona dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra, çok iyi şekillendirilebilirlik özelliğine sahiptir. Uygulama alanları içinde; savunma ve havacılık sanayi, demiryolu vagonlarında ağır yapılar, gemi inşa sektörü, köprüler ve uzay uygulamaları gibi geniş bir yelpaze bulunmaktadır [4], [10]. Al alaşımından üretilen küp uyduların uzay ortamında statik, dinamik ve ısı yüklerine karşı yapısal davranışlarının incelendiği bazı bilimsel çalışmalar bulunmaktadır [11], [12], [13], [14]. Mojica [12], Al alaşımından imal edilen küp uydunun yapısal alt sistemlerini tasarlamış, analiz etmiş ve optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Stevens ve diğ., [13], Al alaşımının yüzeyini modifiye ederek, güneş panellerinin tasarımını yapmıştır. Gündoğdu [14], Al alaşımından üretilen 1U küp uydusunun fırlatma koşullarında maruz kaldığı yüklerde oluşan yapısal davranışını statik ve rastgele modal titreşim analiz teknikleri ile gerçekleştirmiştir.

Son dönemde yapılan uzay çalışmalarında, küçük boyutlu uydularla yapılan işlerin hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Birçok bilimsel çalışmanın geliştirilen küçük ölçekli uydularla daha düşük maliyetlerle daha etkin ve sürdürülebilir ölçekte yapılması, küçük uyduları ön plana çıkarmıştır. Bu çalışmada küçük ölçekli uydu sınıflarından olan küp uydulardan, 3U ile 12U küp uyduları ve Poly Picosatellite Orbital Deployer (P-POD) fırlatma kutusunun en kritik alt sistemlerinin tasarımları Solidworks 3D programı kullanılarak yapılmıştır. Hafiflik, elastisite modülü ve üretilebilirlik gibi unsurlar dikkate alınarak uydu üretiminde Al 6061-T6 alaşımı seçilmiştir. Küp uydu parçalarının (iskelet yapısı, alt sistemler, dağıtım mekanizmaları ve fırlatma kutusu) katı modellemeleri ayrı ayrı oluşturulmuş ve sonradan tüm parçalar montaj edilerek nihai küp uydu model tasarımları tamamlanmıştır. Dünyada ve uzay ortam koşullarındaki davranışları, ANSYS 2022-R1 programı ile doğal frekans analizi, frekans cevap analiz sonuçları

kullanılarak rastgele titreşim analizi, bir frekans ve onun fonksiyonunu arasındaki bağlantıları belirleyen harmonik ölçümler ve statik analizleri yapılarak test edilmiştir. Bu çalışma ile küp uyduların iskelet yapısı, güneş yelkenlisi, güneş paneli ve fırlatma kutusu mekanizmaları hakkında özgün bir tasarım ve iyileştirme sağlanması hedeflenmiştir.

Uydu Materyali ve Metodu

3U küp uydusu, 12U küp uydusu ve fırlatma kutusu iskelet malzemesi olarak havacılıkta sıklıkla kullanılan Al alaşımı 6xxx serisinden; hafiflik, yüksek korozyon ve yorulma direnci, kolay işlenebilirlik ve yüksek gerilme mukavemeti özellikleri sebebiyle Al 6061-T6 alaşımı tercih edilmiştir. Al 6061-T6 alaşımına ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Al 6061-T6 alaşımının kimyasal ve mekanik özellikleri.

Kimyasal Bileşim	Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
		0,5	0,6-1,0	0,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,6-1,1	0,1	0,15
Mekanik Özellikler	Akma Mukavemeti, MPa				Çekme Mukavemeti, MPa			Uzama, %50		Sertlik, HB
	240-270				260-310			20		95

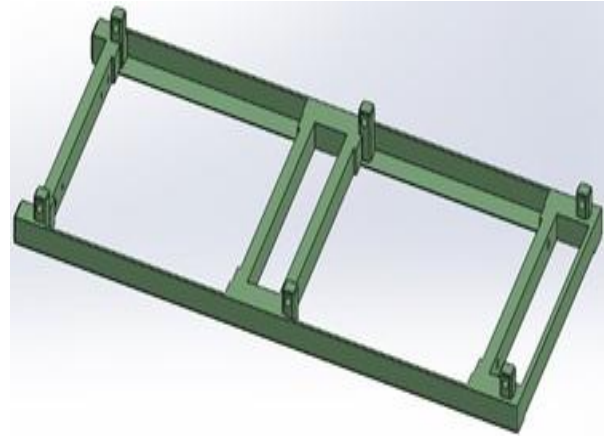
3U ile 12U küp uyduları ve P-POD fırlatma kutusunun kritik alt sistemlerinin tasarımları 3-boyutlu katı modelleme programı olan Solidworks 3D ile yapılmıştır. Tasarımlarda; uydu standartları, tasarım gereksinimleri, malzeme seçimi, yer ve uzay ortam koşulları dikkate alınmıştır. Nihai küp uydu model tasarımları iskelet yapısı, alt sistemler, dağıtım mekanizmaları ve fırlatma kutusu gibi sistemlerin katı modellemesi yapıldıktan sonra birleştirme montajı yapılması ile tamamlanmıştır. ANSYS 2022-R1 programı ile çeşitli analizler yapılarak, Dünyada ve uzay ortam koşullarındaki davranışları belirlenmiştir. Program sayesinde tasarım sürecinin erken aşamalarında iyileştirmeler yapılarak, kalite, güvenilirlik ve maliyet konusunda olumlu gelişmeler sağlanması hedeflenmiştir.

3U Küp Uydu Parçalarının Tasarımı

3U küp uydunun parçaları; yan paneller, panelleri birbirine bağlayan bağlantı elemanları, uydunun üst ve alt kapağı, güneş paneli ve güneş yelkeni dağıtım mekanizmalarından oluşmaktadır. Ayrıca yapı elemanları arasında pim, menteşe gibi bağlantı elemanları, ara parçalar, yapıştırıcı ve montaj bağlantı elemanları da yer almaktadır.

Yan Paneller

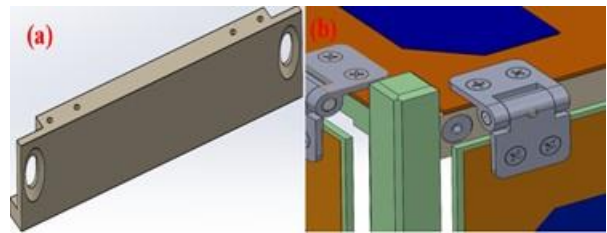
Küp uydu iskelet yapılarına stabilite, sertlik ve kesme kuvvetlerine karşı direnç sağlayan en önemli eleman yan panellerdir. Güneş yelkenli 3U küp uydusunun plaka, güneş paneli, dağıtım mekanizması ve bağlantı elemanları gibi parçaları yan panellere bağlantılıdır. Yapılan tasarımda iki tane yan panel bağlantı elemanları ile birbirine montaj edilmiştir. Bu bağlantı M3x8 DIN 7991 A2 havşa başlı Inox Imbus civata ile sağlanmıştır. 3-Boyutlu katı modelleme programı ile tasarlanan güneş yelkenli 3U küp uydusunun yan paneli Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Tasarlanan güneş yelkenli 3U küp uydusunun yan paneli.

Bağlantı Elemanı

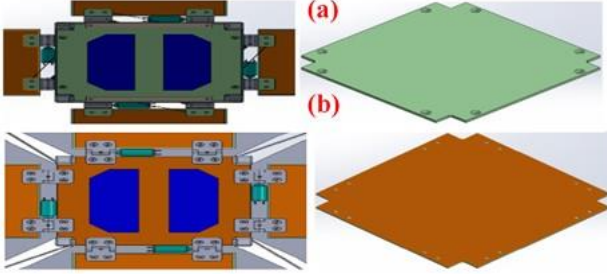
Yan panellerin karşılıklı bir şekilde birbirine montaj edilmesini bağlantı elemanları sağlamaktadır. Tasarımda bulunana dikey ekseni delikler M2x3 silindir başlı vidalar ile uydunun üst plakası ile güneş panellerinin açılıp kapanmasını sağlayan menteşeler arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Alt sistemlerin yükünü taşıyarak yükleri ana panele aktarmakta bağlantı elemanlarının görevidir. Eğilme ve burulma yüklerine karşı dayanımda bağlantı elemanları ile sağlanır. Bağlantı elemanları ve montaj ile birleştirme görüntüleri Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. (a) Bağlantı elemanı ve (b) montajlanma sonrası görüntüsü.

Alt ve Üst Kapak

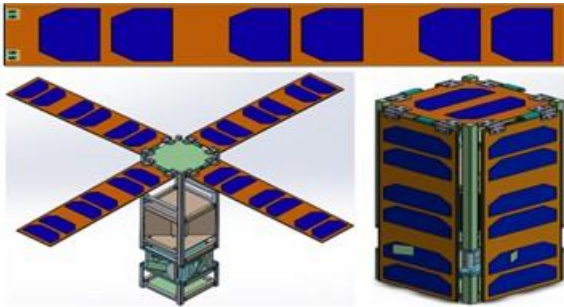
3U küp uydusunun üst kapağı ve alt kapağı, yan panellere ve bağlantı elemanlarına M2x3 silindir başlı vidalar ile bağlanmıştır. Tasarlanan bu bağlantılarda üst kapak için 16 adet, alt kapak için 16 adet vida kullanılmıştır. Tasarlanan kapakların görüntüsü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. (a) Üst kapak ve (b) alt kapak görüntüsü.

Güneş Panelleri

Küçük uydu pazarının önde gelen şirketlerinden biri olan ISSPACE firmasının istenilen özelliklerde 1U ile 12U küp uyduları için tasarladığı güneş panelleri tercih edilmiştir. Tasarlanan güneş paneli ve güneş panellerinin montajlanmış görüntüsü Şekil 4'de verilmektedir. Tasarımda güneş yelkenli 3U küp uydusunun gövdesine, enerji ihtiyacını karşılamak için 4 adet açılıp kapanan güneş paneli montajlanmıştır. Paneller menteşeli mekanizma ile açılıp kapanma işlemini gerçekleştirmektedir. Güneş panellerinin hasar almasını önlemek için 165°'lik bir açılma açısı tasarlanmıştır. Panellerin hepsi açılarak devreye girip, hareket ederler. Yapılan tasarım boyut sınırlamaları içerisinde ve güç çıkışı gereksinimlerine uygundur. Yapılan tüm işlemlerdeki amaç, güneş panelinin seri ve basit bir şekilde değiştirilebilmesi için güvenilir bir sistem tasarlamaktır.

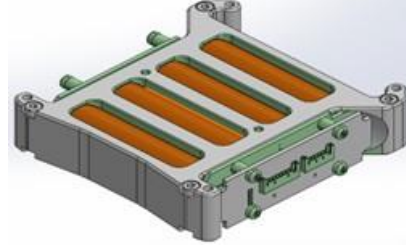


Şekil 4. Güneş paneli ve güneş panellerinin montajlanmış görüntüsü.

Batarya

Uzay araçları güneş enerjisine ulaşamadıkları alanlarda enerji sorunu yaşamaya başlarlar. Bu durumda uyduya enerji sağlayan bataryalar devreye girer. Güneş yelkenli 3U küp uydusunun güç depolaması için ISSPACE firması tarafından üretilen elektrik güç sistemi (iEPS) olarak adlandırılan şarj edilebilir bataryalar kullanılmıştır. C-tipi veri tabanlı elektrik güç sistemi, sistem kartı, 4 hücreye sahip pil paketi, güneş

panel ara yüzüne sahip ek kart ve ek uydudan oluşmaktadır. Tasarımda en önemli unsur, kablo direnç kayıplarının azaltmak için bataryanın uydunun gövdesine güvenli şekilde montaj edilmesidir. Bunun içinde bataryanın montaj konumu ve sınırları belirtilen ölçüler içerisinde, güç yönetim ve üretim sistemlerinin yanında olmalıdır. Bataryanın 3-boyutlu katı modeli Şekil 5'te gösterilmiştir.



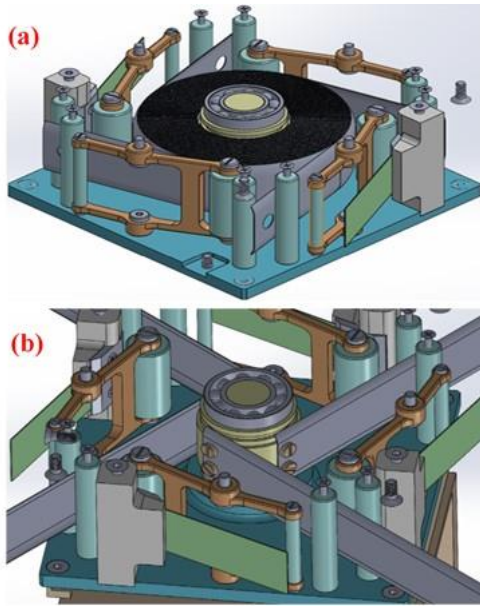
Şekil 5. Bataryanın 3-boyutlu katı modeli.

Güneş Paneli ve Güneş Yelkeni Dağıtım Mekanizmaları

3U küp uydusunun güneş yelkenlisinde iki mekanizma açma amacıyla kullanılır. Bunlar, güneş paneli açma ve güneş yelkeni açma mekanizmalarıdır. Tasarımda istenen güneş panellerinin ve yelkenin stabil ve sorunsuz olarak açılmasını sağlamaktır. Güvenli bir açılım sağlamak için panellerin dönüş hızını belirleyen DC motorlu menteşe mekanizması tasarlanmıştır. Mekanizmada DC motor kullanılmasının temel nedenleri; küçük boyut ve ağırlıkta yüksek güç ve dinamik performans sunması, vuruş torku oluşturmaması, yük-hız dengesi kurulabilmesi, yüksek tork ve güç avantajına sahip olması, başlatma ve durdurmada üstün dinamik özelliklerdir. Faulhaber 0816K003SR DC-Micromotor modeli tasarımda tercih edilmiştir. Motor mili menteşe içerisindeki mile setskur vidalar ile bağlanarak, hem iskelete hem de güneş panellerine M2X3 havşa başlı vida ile montaj işlemi yapılmıştır. Kullanılan 8 adet menteşeden 4 tanesi motor ile bağlantılıdır, diğerleri panellerinin dengeli olarak açılmasını sağlayan karşılayıcılar şeklinde tasarlanmıştır. Buradaki amaç, motordan alınacak kuvvet ile menteşeleri harekete geçirip panellerinin güvenli şekilde açılmasını sağlamaktır.

Yaylı mekanizmalar, pasif açılma sonucu kontrolü zor olan açılma sorunundan dolayı yelkeni yırtabilir. Bu yüzden yelken açma mekanizmalarının tasarımında kullanılmamıştır. En önemli sistem elemanlarından biri olan yelkenlerin hasar görme riskinin önüne geçmek için DC motor kullanılarak kontrol edilebilir hıza sahip aktif dağıtım sistemi tasarlanmıştır. Yelken tutucular vidalar yardımıyla merkezin etrafına montaj edilmiştir. Yelken tutucuların kademeli olarak kontrollü bir şekilde açılması için planet dişli redüktörlü bir step motor kullanılarak merkez sargının döndürülmesi planlanmıştır. Tasarımda Faulhaber AM1524 DC-Micromotor modeli tercih edilmiştir. Her biri dört eşit parçaya bölünmüş yelkenler 3,88 m² alana sahiptir ve toplamda 15,52 m² alan içermektedir. Burada istenen temel amaç yelkenin açılabilmesi olduğundan yelken boyutu etki dışı bırakılmıştır. Boyut yüksekliği çıkılan

en düşük eğrilik yarıçapını ve optimum hacim verimi sunmaktadır, tasarımda bu dikkate alınarak; uzunluğu 2,8 metre olan 4 adet yelken tutucu bulunmaktadır. Yelken tutucu tasarımında yarım daire kesitine sahip istiflenmiş konfigürasyonda kompozit malzeme kullanımı tercih edilmiştir. Bu seçimdeki amaç, düşük kuvvetlerle istiflenebilmesi ve basit yerleşim mekanizması ile kullanım imkânı vermesidir. Yelken tutucularda kullanılan malzeme 0,04 mm'lik et kalınlığında Toray M30S tipi ara modüllü elyaflar kullanılmıştır. Seçilen elyaf türü oldukça düşük yoğunluğa ve plastik deformasyonu önlemek için yeterli esnekliğe sahiptir. Yelken tutucuların her biri M3X5 mm düz paslanmaz vida ile göbek merkez miline montaj edilmiştir. Yelken tutucuların merkez göbek miline sarılı ve yelken tutucularına açılmış görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



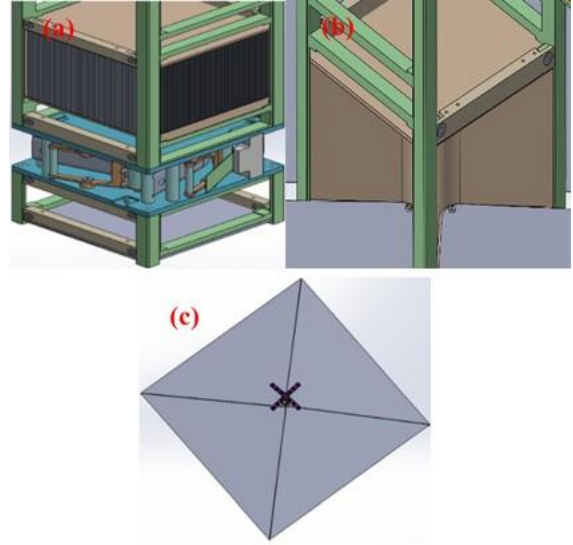
Şekil 6. (a) Yelken tutucuların merkez göbek miline sarılmış hali ve (b) yelken tutucuların açılmış görüntüsü.

Yelken malzemesi olarak; elektronik bileşenlerde yaygın olarak kullanılan bir taraftan Al kaplamalı 12,0 µm ve 120 µm kalınlıklarında Mylar, 7,5 µm kalınlığında Al kaplamalı polyamid (Kapton) bant ve her iki tarafı da Al kaplı 4,0 µm polietilen-naftalat (PEN) seçilmiştir. Yelkenler istiflendikleri kısımlara her biri 1 adet M2X3 mm düz vida ile montaj edilmiştir. Alman Havacılık ve Uzay Araştırma Kurumu (German Aerospace Center, DLR) tarafından üretilen yelken segmentlerine ait özellikler Tablo 2'de bulunmaktadır. Şekil 7'de yelkenlerin istiflenmiş görüntüsü, istiflenme kutusundaki montaj görüntüsü ve tam açılmış görüntüsü verilmiştir.

Tablo 2. DLR'ye ait yelken segment içerikleri.

Özellikler	Kapton	PEN	Mylar
Bant kalınlığı, µm	7,5	4,0	12,0
Bant genişliği, mm	1410	515	628
Şerit sayısı	7	19	15
Yelken alanı, m ²	82,6	82,6	82,6

Segment kütlesi, kg	1,0	0,8	1,6
Segment (g=m ²)	12,4	10,5	18,9



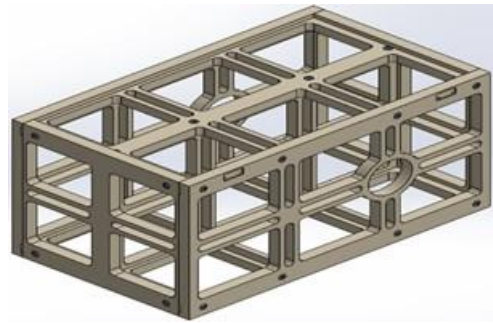
Şekil 7. (a) Yelkenlerin istiflenmiş, (b) istiflenme kutusundaki montaj ve (c) tam açılmış görüntüleri.

12U Küp Uydu Tasarımı

12U küp uydunun parçaları; yan ve destek panelleri, alt ve üst kapaklar, güneş paneli, alt sistemler, güneş paneli dağıtım mekanizmasıdır. Alt sistemleri oluşturan parçalar ise tutum ve yörünge kontrol elektroniği, yıldız izleyici, kamera ve bataryadır.

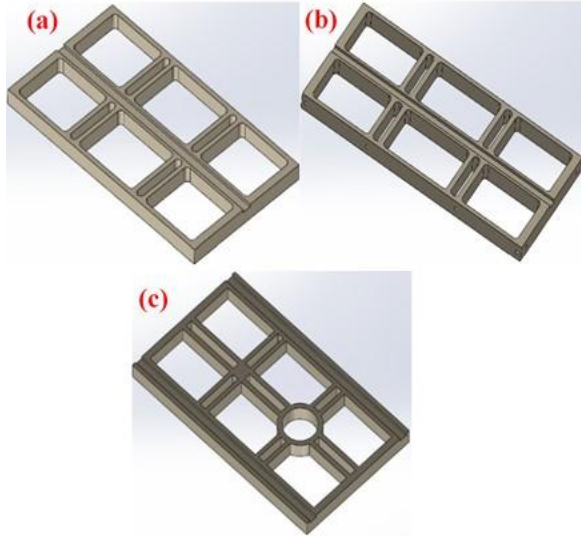
Paneller

12U küp uydusunun iskelet kısmı M4x10 mm havşa başlı imbus civatalar ile birbirine montaj edilen; yan paneller, destek panelleri, üst ve alt panelden oluşmaktadır. Panellerin tasarımında kolay üretim ve ulaşım için montaj ve demontaj edilebilirlik tercih edilmiştir. 12U küp uydusunun iskelet yapısı Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. 12U küp uydusunun iskelet yapısı.

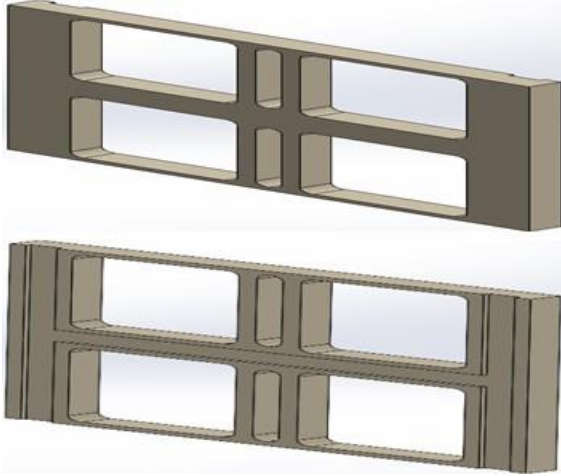
İskelet yapısındaki destek panelleri yapısal olarak yüksek oranda çekme, eğme ve burulmaya karşı dayanım sağlamaktadır. Tüm panellerin birbirine güvenli şekilde bağlanabilmesi için 2x12 mm boyutunda kanallar açılmıştır. Şekil 9 (a), (b) ve (c)'da sırasıyla; güneş yelkeni 12U küp uydusunun ara destek paneli, güneş yelkeni uydusunun alt ve üst paneli ve güneş yelkeni uydusunun yan destek paneli gösterilmiştir.



Şekil 9. Güneş yelkenli 12U küp uydusunun (a) ara destek paneli, (b) alt-üst paneli ve (c) yan destek panelleri.

Küp Uydu Alt ve Üst Kapaklar

Güneş yelkenli 12U küp uydusunun üst ve alt kapaklarının her biri 16 adet M2x3 paslanmaz çelik Inox silindir başlı imbus vidalar kullanılarak hem bağlantı paneline hem de yan panellere montaj edilmiştir. 12U küp uydusunun üst ve alt kapak tasarımları Şekil 10'da gösterilmektedir.



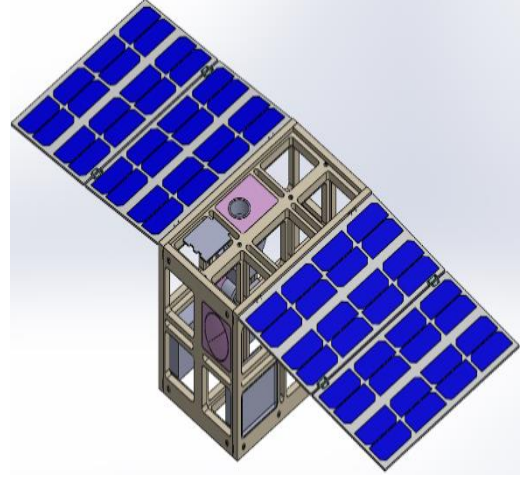
Şekil 10. Üst kapak ve alt kapak.

Güneş Panelleri

12U küp uydu güneş panelleri, 3U küp uydusuna ait güneş panellerinin seri şekilde sıralanması ile tasarlanmıştır. Kanatların her birine 32 tane güneş paneli yerleştirilerek, 12U küp uydusu için elektrik üretimi sağlanması planlanmıştır. Tasarım için seçilen güneş panellerinin teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. 12U küp uydu güneş panellerinin açılmış görüntüsü Şekil 11'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Güneş panellerinin teknik özellikleri.

Ayrıntılar	Özellik	Genel Özellikler
Hücre malzemesi	GaAs (Galyum Arsenit)	Tam uyumlu,
Verimlilik, %	30	yüksek verimli, 4
Çalışma sıcaklığı	-40 °C +125°C	paralel güç
Radyasyon toleransı	Alçak irtifada minimum 2 yıl	konektörü, harici bağlantılı



Şekil 11. 12U küp uydu güneş panellerinin açılmış görüntüsü.

Alt Sistemler

Güneş yelkenli 12U küp uydusu da panellerin güneş ışından mahrum kalan yerlerinde enerji ihtiyaçlarını 3U küp uydusu gibi bataryalardan sağlarlar. 12U küp uydusunda batarya olarak; EXA-Ecuadorian Space Agency tarafından üretilen EXA TITAN-1 350Whr yüksek enerji kapasitesi ve yedekliliği sağlayan ve 7 pil dizisinden oluşan bir güç bankası modülü kullanılmıştır. Batarya da güç kapasitesi, pil modülü başına 50 Whr, toplamda 350 Whr'dir. Tasarımda alt sistem olarak, yıldız izleyici, kamera, yönerge ve tutum kontrol elemanları kullanılmıştır. Bu alt sistemlerin sahip olduğu teknik özellikler Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Alt sistemlerin teknik özellikleri.

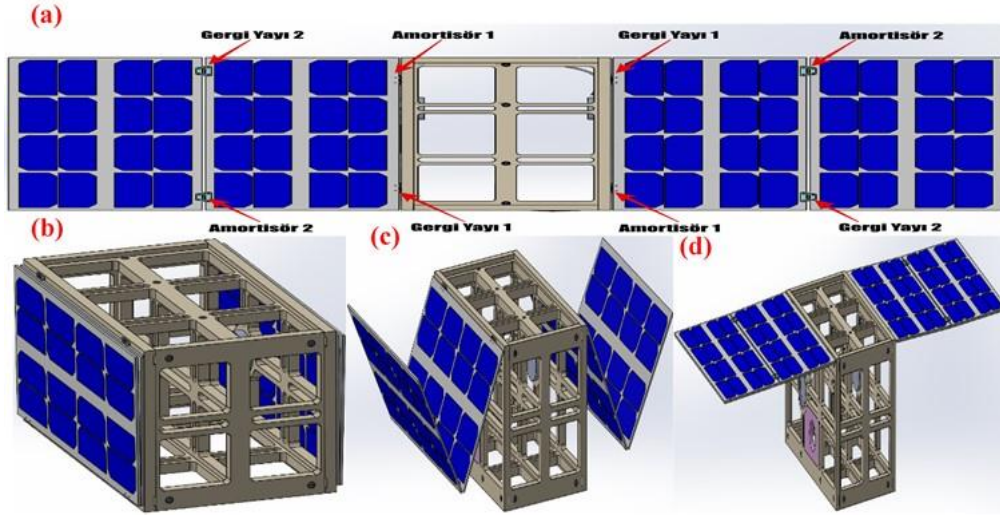
Tutum ve yönerge kontrol elemanı	Yıldız izleyici		
Kütle, g	506	Kütle, g	197
Boyutlar, mm	90 x 96 x 59	Genişlik, mm	56 mm
Güç tüketimi, W	≈1,0	Yükseklik, mm	60 mm

Veri yolu voltajı, V	3,3 - 5	Uzunluk, mm	93 mm
Çalışma voltajı, V	3,3 - 5	Besleme gerilimi, V	5,0 ± 0,25
Akü voltajı, V	7,5 - 16	Veri ara yüzü, kbit/sn	500
Çalışma sıcaklığı, °C	-10 ile +60	Çalışma sıcaklığı, °C	-30 ile +40
Kamera			
Kütle, kg	1,14 ± 5%		
Atalet momenti (Ixx), kg.m ²	3,70E-03 ± 5%		
Atalet momenti (Iyy), kg.m ²	3,65E-03 ± 5%		
Atalet momenti (Izz), kg.m ²	1,55E-03 ± 5%		
Kütle merkezi (X), mm	< 0,5 ± 0,5		
Kütle merkezi (Y), mm	< 0,5 ± 0,5		
Kütle merkezi (Z), mm	7 ± 1 mm		

12U Küp Uydu Güneş Paneli Dağıtım Mekanizması

Panellerin açılma ve kapanmasında sorun yaşanmaması için ek parça ve kaynak gereksinimi olmadan işlevselliği daha yüksek bir tasarım yapılması hedeflenmiştir. 12U küp uydu güneş paneli dağıtım mekanizması tasarımı için işlevsel, erişimi kolay, anlaşılır, dayanımı yüksek, düşük parça maliyeti gibi unsurlar ön planda tutulmuştur. Uzay ortamının zorlu çevre koşullarına dayanan bir tasarım için; NASA, PSC ve CSA tasarımlarının mekanik unsurları temel alınmıştır. 12U küp uydusunun gövdesine yerleştirilen dağıtım mekanizması burulma yaylı amortisör yerleştirme sistemi ile panellerin üst gövde yüzeyi ile

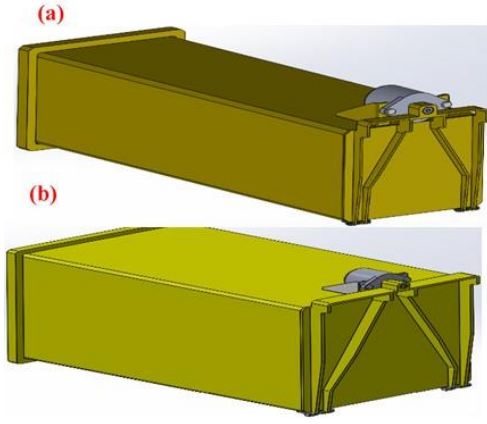
aynı hizada kalacak şekilde tasarlanmıştır. Burulma yaylarına sahip özel tasarım 8 adet menteşe M1,5 havşa başlı vida kullanılarak panellere montaj edilmiştir. Dağıtım mekanizmasının itici gücü her birinden iki adet olan gergi yayından ve amortisörden kaynaklanmaktadır. Menteşelere etki eden yaylar panelleri hareket ettirerek açar ve mekanizmanın pozisyonunu durdurarak sistemin açık olmasını destekler. Amortisör yayları, gergi yaylarının karşısına panellerin açılırken sarsılmasını önlemek için yerleştirilmiştir. Şekil 12 (a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla; yay çeşitlerine göre menteşelerin konumlandırılması, kapalı konumda mekanizma, açılma başladığında mekanizma ve tam açıldıktan sonra mekanizma gösterilmiştir.



Şekil 12. (a) Yay çeşitlerine göre menteşelerin konumlandırılması, (b) kapalı konumda mekanizma, (c) açılma başladığında mekanizma ve (d) tam açıldıığında mekanizma.

Fırlatma Kutusu Tasarımı

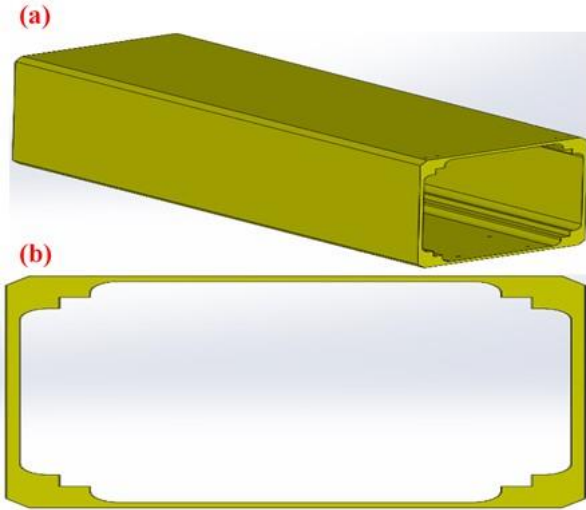
P-POD'lar küp uyduların uzay aracına kolay uyumunu, güvenilir şekilde uzaya fırlatılmasını ve sürdürülebilir bir hareket sürecini sağlayan bir dağıtım sistemidir. Fırlatma sürecinde, küp uydu ve P-POD'ların düzgün bir formda eşleşmesi için adaptör ve uydu sistem eşleşmesi gereklidir. Fırlatma kutusu, kare boru şekline sahip, dört yüzeyi de benzer özelliklerde, çok fonksiyonlu mekanik ara yüzey içermektedir. Panel kenarları boyunca uzunlamasına bir dizi ray sistemi bulunmaktadır. Şekil 13 (a) ve (b)'de; 3U ve 12U küp uydularına ait fırlatma kutularının 3-boyutlu katı model görüntüleri verilmiştir.



Şekil 13. (a) 3U ve (b) 12U küp uyduların fırlatma kutularının 3-boyutlu katı model görüntüleri.

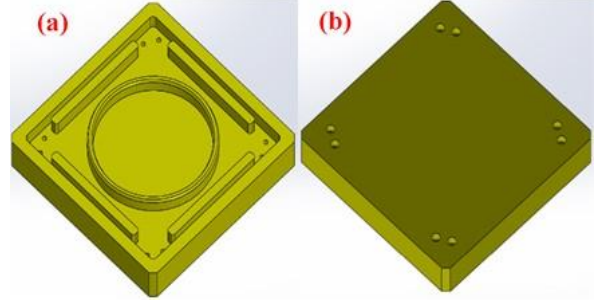
Gövde, Arka Panel ve Kapı

Uydunun fırlatma kutusunun gövdesi serbest bırakma mekanizmasının monte edilmesini mümkün kılan kare şeklinde boru profili kullanılarak tasarlanmıştır. Serbest bırakma mekanizması gövdenin üstündedir ve küp uydulara konumlandırılmasını sağlayan ray sistemine sahiptir. Şekil 14'te tasarlanmış boru şeklindeki gövde yapısının yandan ve önden görüntüsü verilmiştir.



Şekil 14. Tasarlanmış boru şeklindeki gövde yapısının yandan ve önden görüntüsü.

Fırlatma kutusunun arka kısmı tamamen düz olarak tasarlanmıştır ve bu düzlük fırlatma aracına montaj edilmesini kolaylaştırmaktadır. Küp uyduyu dışarı fırlatacak olan yayı sabit olarak tutan arka panellerin iç kısmıdır. Bunlar M3x10 mm vidalarla fırlatma kutusunun gövdesine montaj edilmiştir. Şekil 15'te tasarlanana arka panellerin iç ve dış görüntüsü verilmiştir.

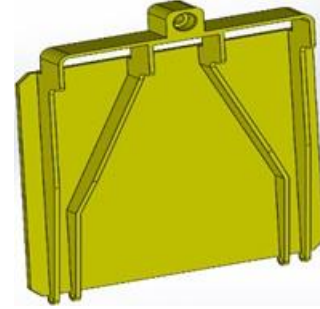


Şekil 15. Arka panellerin iç ve dış görüntüsü.

Burulma yayları ile fırlatma kutusunun kapısı gövdeye alt taraftan monte edilmiştir. Tasarımda üst kısımlar M5x15 mm cıvata ile serbest bırakma mekanizmasına monte edilmiştir. Bu mekanizma devreye girdiğinde cıvata eriyerek ortamdan ayrılmakta ve böylece küp uyduyu fırlatacak olan yayın itme kuvveti ortaya çıkmaktadır. Şekil 16'da tasarlanmış kapı elemanının 3-boyutlu görüntüsü verilmiştir.

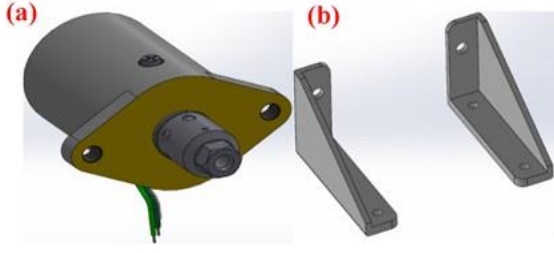
Serbest Bırakma Mekanizması

Kritik bileşenlerden olan mekanizma, sinyal alır almaz fırlatma kutusunun kapısı ile bağlantısını gerçekleştiren cıvatayı eritmek için yüksek sıcaklıkta işlemi gerçekleştirir.



Şekil 16. Kapı elemanının Tasarım sonrası 3 boyutlu görseli.

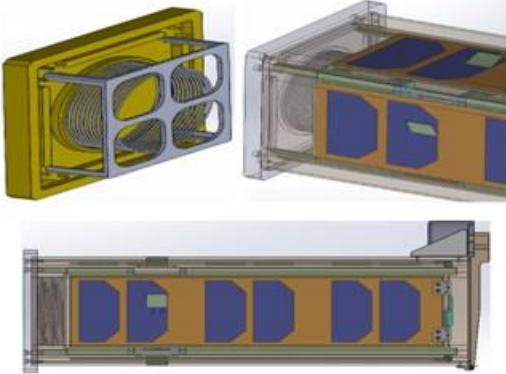
Bu mekanizmanın arızalanması halinde ciddi hasarlar oluşur. Bu yüzden mekanizma açısından güvenilir ve sürdürülebilir bir tasarım büyük önem taşır. Ejektör Serbest Bırakma Mekanizması (EBAD TiNi™ E1000 ERM) bu amaç için kullanılmıştır. Maksimum güvenilirlik, yedekli ateşleme devresine sahip olması, tasarım kolaylığı ve test edilebilir özellikte olması nedeniyle tercih edilmiştir. Serbest bırakma mekanizmasının sahip olması gereken unsurlar; fırlatma ortamına karşı dayanım göstermesi, maliyetleri azaltmak için oldukça hafif olmasıdır. Şekil 17 (a) ve (b)'de serbest bırakma mekanizmasının 3 boyutlu katı modeli ve tasarlanmış braket görüntüleri verilmiştir. Mekanizma braket ile gövdeye ve kapıya sabitlenmiştir. Tasarımında basit fakat etkili bir braket için braketten etkilenen kuvvetler tanımlanmıştır. M4x12 mm vida ile kapıya, M3x10 mm vida ile gövdeye montaj işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17. (a) Serbest bırakma mekanizmasının 3-boyutlu katı modeli ve (b) braket tasarım görüntüleri.

Küp Uydu Fırlatma Yayı

Fırlatma sağlayıcısı tarafından istenilen fırlatma unsurlarını sağlayacak bir küp uydu fırlatma yay tasarımı yapılmıştır. Fırlatma kutusundan kopan parçaların birbiri ile çarpışmasını önlemek için maksimum 2 m/s hız farkı gerekmektedir. Ayırma sinyali alınmasından itibaren bir saniyeden çok daha kısa bir sürede gerçekleşmelidir. Fırlatma işleminde süreç, küp uydularda serbest bırakma mekanizmasının kapıyı bırakması ile başlamaktadır. Küp uydu, fırlatma plakasına bağlı olan kapı sıkıştırılmış fırlatma yayı tarafından tamamen açınca fırlatılır. Fırlatma plakası uydunun yay ile arasındaki bağlantıyı sağlamakta ve uydunun ayaklarından iterek dışarı fırlatmayı gerçekleştirmektedir. Şekil 18’de tasarlanan küp uydu fırlatma yayı gösterilmiştir.



Şekil 18. Küp uydu fırlatma yayı.

Tasarım Sonuçları ve Tartışma

Uydular, yapım aşaması ve kullanım süreleri boyunca farklı ortam ve yapısal yükler altında kalırlar. Fırlatma koşullarında çok fazla mekanik yüklemelere maruz kalmaktadır. Ortam değiştirme sırasında da yapısal açıdan zorlayıcı yüklerle karşı karşıya kalmaktadır. Dünya ve uzayda değişen ortam koşullarında malzeme özellikleri değişmektedir. Bu değişimler uydunun yapısal mekanik dayanımlarını da etkilemektedir. Farklı ortamların yarattığı yüklerin ve etkilerinin tanımlanması uydu hasarlarının önlenmesi için şarttır [15]. Bu çalışmada fırlatma sırasında küp uyduların ve bağlantı elemanlarının maruz kaldığı yüklerin uydunun yapısal sistemlerine olan etkileri analiz edilmiştir. ANSYS programı ile tasarımı tamamlanan Güneş yelkenli 3U ve 12U küp uyduları ve fırlatma

kutularının çok yönlü analizleri fırlatma ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu program yeni ürünlerin geliştirilmesinde, mali hatalardan korunmak için, ürün kalite ve güvenilirliği açısından karar verme sürecini iyileştirmede sıklıkla tercih edilmektedir. Tasarlanan uydular ve fırlatma kutuları içerisinde buldukları roketlerin katılık gereksinimlerini karşılamak için Hindistan Uzay Araştırma Örgütü (ISRO) tarafından geliştirilen PSLV (Polar Satellite Launch Vehicle) dört kademeli bir fırlatma roketi temel alınmıştır. Yapılan analizlerde ayrıntılı analitik yaklaşım gerektiren, uzun ve yüksek hesap isteyen modellerden kaçınılmıştır. Gereksiz ek parçalar ve fiziksel süreçte etkisi olmayan parçalar kaldırılarak daha basit ve etkili analitik modeller tercih edilmiştir.

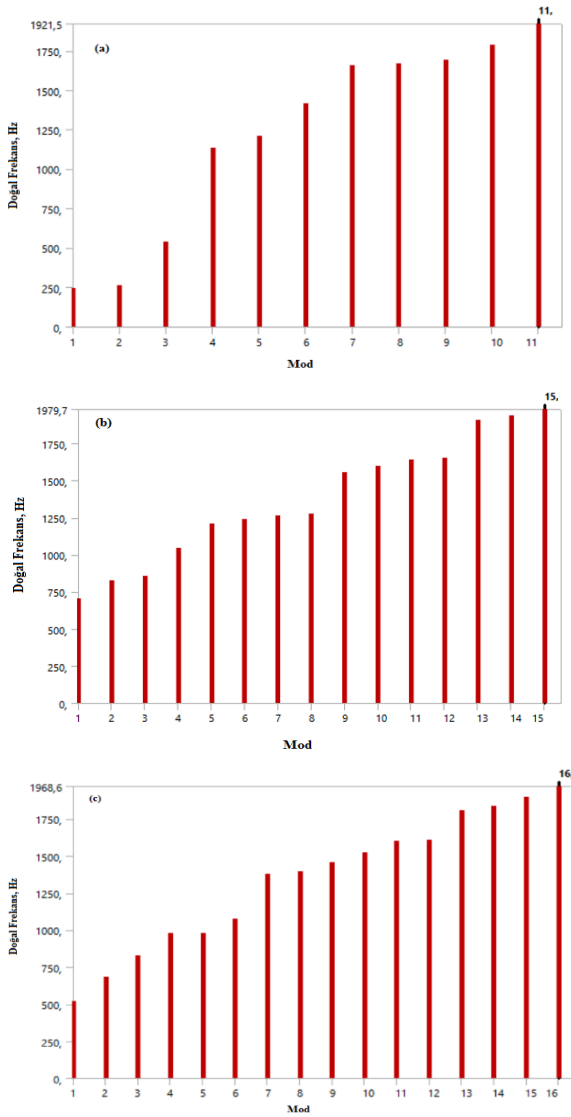
Doğal Frekans Analizleri

Doğal frekanslar, doğada bulunan bütün fiziksel yapıların sahip olduğu ve bu yapıların farklı dış kuvvetlere maruz kaldığında titreşme eğiliminde olduğu oluşumlardır. Rezonans olarak bilinen bu doğal frekanslarda titreşim olayı, uyduları fırlatıldığı roketlerin içerisinde etki altına alırlar. Rezonansa giren uydularda yapısal olarak ciddi oranda hasar görülebilmektedir. Uyduların fırlatılacakları roketler için belirlenen katılık gereksinimlerini mutlak suretle karşılamaları gereklidir. Katılık gereksinimlerinin ne ölçüde karşılandığı modal analizler ile belirlenmiştir. Bir yapının doğal karakteristik ve dinamik özellikleri açısından tanımlanmasında kullanılan modal analizde temel amaç ilk doğal frekans değerini belirlemek ve bu değeri roket el kitapçığında belirtilen minimum limit değer ile karşılaştırmaktır. Bu çalışmada da modal analizlerle elde edilen doğal frekans değerleri roketin el kitapçığında yazan değerler ile karşılaştırılarak analiz tamamlanmıştır. Tablo 5’te analizlerde kullanılmak üzere çalışmada kullanılan PSLV fırlatma aracının doğal frekans değerleri verilmiştir.

Tablo 5. PSLV fırlatma aracına ait minimum doğal frekans değerleri [16].

Yük Tipi	Eksenel yönde	Yanal yönde
Birincil Yük, Hz	35	20
İkincil Yük, Hz	90	45

Her iki yük tipinde de fırlatılacak uydunun aksel yönde (Y) ve yanal yönlerden (X, Z) daha yüksek doğal frekans değerlerine sahip olması gerekmektedir. Tasarımı gerçekleştirilen 3U, 12U küp uydularının ve fırlatma kutusunun sahip olduğu doğal frekans değerleri sırasıyla Şekil 19a, b ve c’de verilmiştir. 20 Hz’den 2000 Hz’ye kadar olan frekanslar, doğal frekans değerleri yük faktörlerinin hesabında kullanılmaktadır [16]. Güneş Yelkenli 3U küp uydunun, 12U küp uydusunun ve fırlatma kutusunun 20-2000 Hz arasında sırasıyla 11, 15 ve 16 adet doğal frekans değeri tespit edilmiştir.

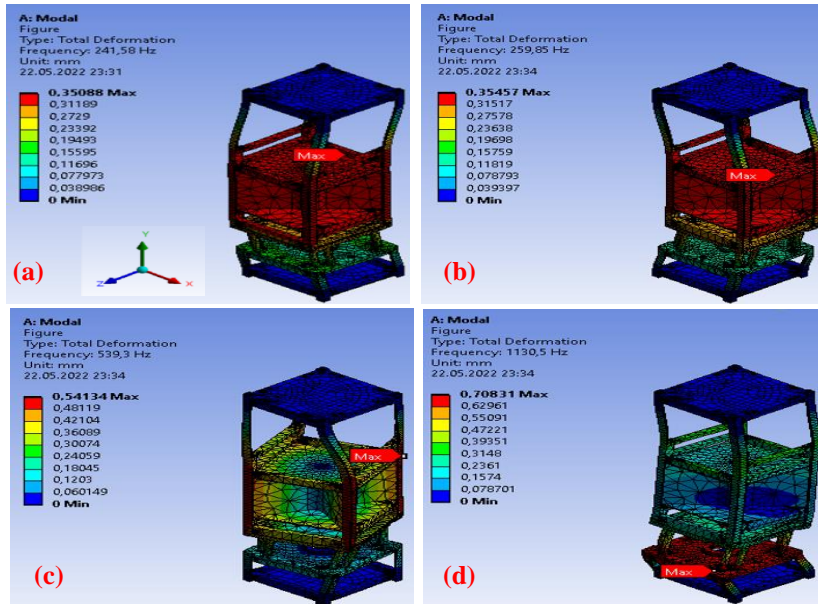


Şekil 19. Doğal frekans değerleri: (a) 3U küp uydusu, (b) 12U küp uydusu ve (c) fırlatma kutusu.

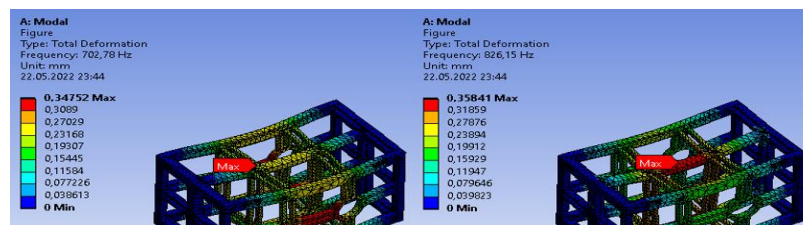
Model analizler ile uyduların doğal frekans değerleri ve mod şekilleri,

$$(K - \omega^2 M)q = 0 \quad (1)$$

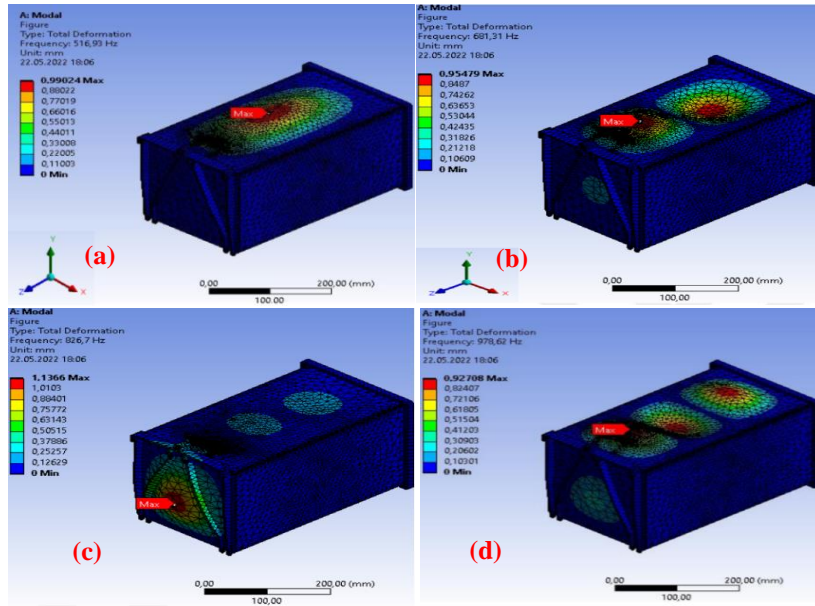
öz değer probleminin çözümü ile belirlenmektedir. Eşitlikteki K ve M sırasıyla direngenlik ve kütle matrislerini ω ve q ise sırasıyla harmonik hareketin açısal frekansı ve genlik vektörünü ifade etmektedir [17]. Sistemin doğal frekans değerleri, denklemin çözümü ile hesaplanan öz değerlerdir. İlgili frekansta oluşan mod şekli öz değerler ile öz vektörler tarafından belirlenir. Doğal frekans değerlerinde meydana gelen deformasyonlar program ile tespit edilmiştir. Bu analizlerde kullanılan sınır şartları olarak yanal ivme $169,91 \text{ m/sn}^2$; dikey yerçekimi ivmesi $9,81066 \text{ m/sn}^2$ ve tabandan sabitleme şeklinde sınır şartları kullanılmış olup, 3U ve 12U küp uyduları için kullanılan sonlu elemanlar modellerinde sırasıyla 79897 düğüm - 39944 eleman ve 113712 düğüm - 54830 eleman kullanılmıştır. 3U küp uydusu deformasyonlarından ilk 4, 12U küp uydusu ve fırlatma kutusu için de 4 mod şekli verilmiştir. Şekil 20 (a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla; 1. Mod, 2. Mod, 3. Mod ve 4. Mod değerlerine karşılık gelen 3U küp uydusunun deformasyon analizlerinin sonuçları verilmiştir. Şekil 21 (a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla; 1. Mod, 2. Mod, 3. Mod, ve 5. Mod değerlerine karşılık gelen 12U küp uydusunun deformasyon analizlerinin sonuçları verilmiştir. Şekil 22 (a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla; 1. Mod, 2. Mod, 3. Mod ve 4. Mod değerlerine karşılık gelen fırlatma kutusu deformasyon analizlerinin sonuçları verilmiştir.



Şekil 20. (a) 1. Mod, (b) 2. Mod, (c) 3. Mod ve (d) 4. Mod değerlerinde 3U küp uydusunun deformasyon analiz sonuçları.



Şekil 21. (a) 1. Mod, (b) 2. Mod, (c) 3. Mod, ve (d) 4. Mod değerlerinde 12U küp uydusunun deformasyon analiz sonuçları.



Şekil 22. (a) 1. Mod, (b) 2. Mod, (c) 3. Mod, ve (d) 4. Mod değerlerinde fırlatma kutusunun deformasyon analiz sonuçları.

Eksenel ve yanal modların belirlediği doğal frekans değerleri modal analiz sonuçları incelenerek uydular üzerinde belirlenmiştir. 1.Mod için; 3U küp uyduda 241,58 Hz, 12U küp uyduda 702,78 Hz ve fırlatma kutusunda 516,93 Hz frekans değerleri bulunmuştur. Uydu modellerinin maksimum yer değiştirme değerleri ise; 3U küp uydusunda 4. Mod'da 0,70831 mm, 12U küp uydusunda 5. Mod'da 0,77062 mm ve fırlatma kutusunda 3. Mod'da 1,1366 mm olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; tüm 3U, 12U küp uyduları ve fırlatma kutusu modellerinin modal analizlerinde doğal frekans değerleri birbirlerine yakın olup, aracın talep ettiği gereksinimleri üstün bir şekilde karşılamıştır [18], [19].

Rastgele Titreşim Analizleri

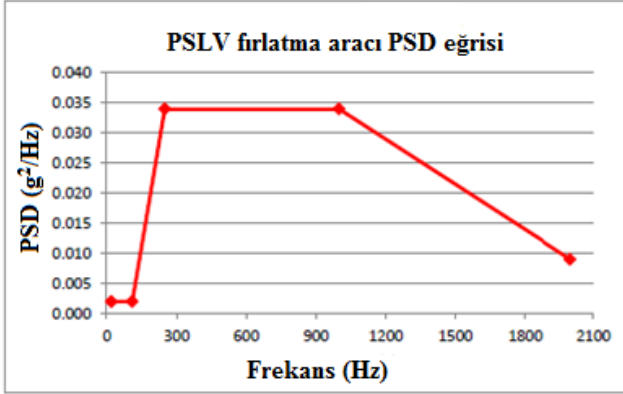
Rastgele titreşim, tahmine dayalı bir genlik olan ve beyaz titreşim olarak da tanımlanan titreşim türüdür. Bu titreşimlerin yardımıyla yapılan analizlerde yapılarda

doğal olarak gerçekleşen titreşimlerden kaynaklı yüklerin yarattığı etkiler belirlenir [20].

Özellikle havacılık ve uzay yapılarında yüksek seviyede titreşime maruz kalan yapılarda rastgele titreşimlerle analiz yöntemi sıklıkla kullanılır. Bu analizde geçen zaman spektrumlarının frekansları, statiksel olarak yakalanır ve elde edilen yük rastgele titreşim analizinde kullanılır. Spektrumlarda analiz girdisi spektral güç yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) olarak tanımlanır ve rastgele değişkenlerin sınırlayıcı ortalama kare değerlerinin istatistiksel bir ölçüsüdür. Doğada rastgele titreşim analizlerindeki girdilerin ve çıktılarının uyarıları istatistikseldir. Bu analizler 20-2000 Hz arasında gerçekleştirilir ve Modal analiz sonuçları ile değerlendirilir. ANSYS programında parametre olarak kullanılmak amacıyla, PSLV fırlatma aracının el kitapçığında belirtilen rastgele titreşim değerleri Tablo 6'da verilmektedir. Şekil 23'te fırlatma aracının PSD eğrisi verilmiştir.

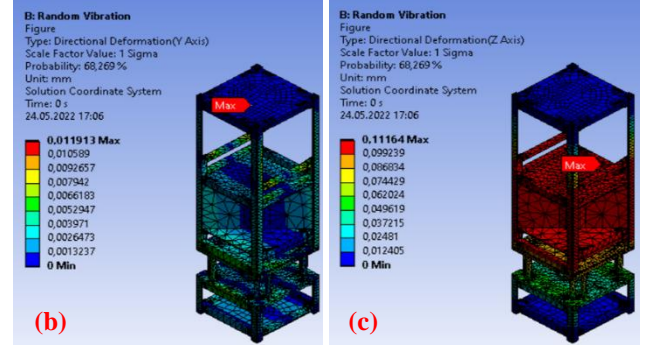
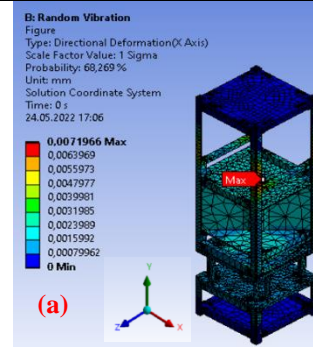
Tablo 6. PSLV fırlatma aracının rastgele titreşim seviyeleri [21].

Frekans (Hz)	Yeterlilik PSD (g^2/Hz)	Kabul PSD (g^2/Hz)
20	0,002	0,001
110	0,002	0,001
250	0,034	0,015
1000	0,034	0,015
2000	0,009	0,004
GRMS	6,7	4,47

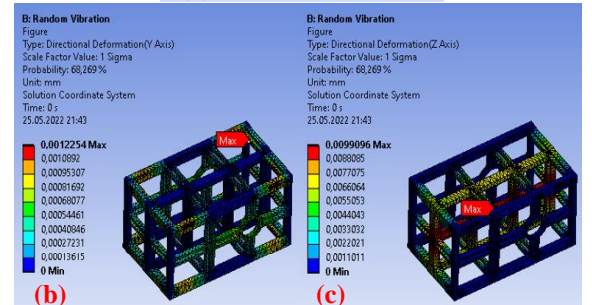
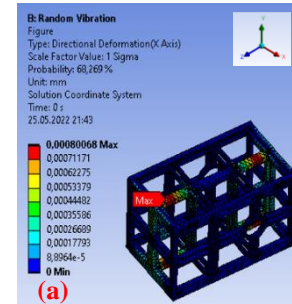


Şekil 23. Fırlatma aracının PSD eğrisi [17].

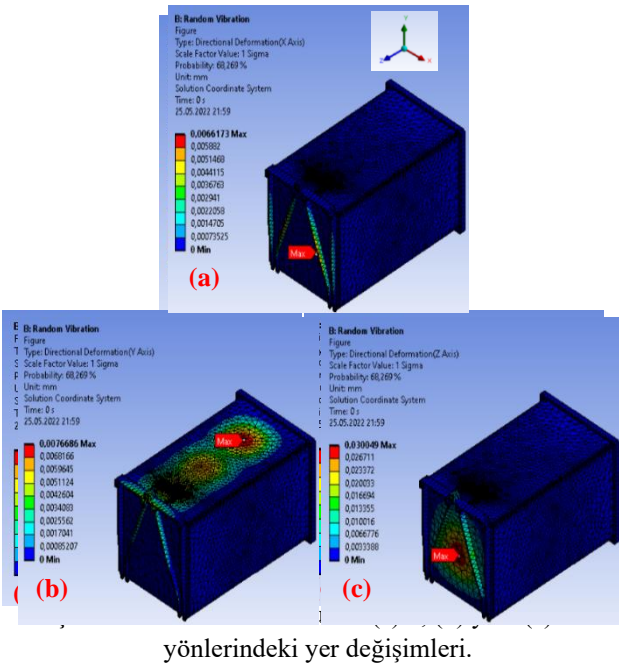
Güneş yelkenli 3U ve 12U küp uydularının ve fırlatma kutusunun ANSYS 2022 R1 programı kullanılarak belirlenen rastgele titreşim analizleri ile deformasyon, hız ve ivme değerleri tespit edilmiştir. Yapılan analizlerle elde edilen veriler; Şekil 24-Şekil 32’de gösterilmiştir. Şekil 24 (a), (b) ve (c), Şekil 25 (a), (b) ve (c) ve Şekil 26 (a), (b) ve (c)’de sırasıyla; 3U küp uydusunun, 12U küp uydusunun ve fırlatma kutusunun x, y ve z yönlerindeki yer değişim sonuçları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde; 3U küp uydusunun gövdesinde; 0,0071 mm x-yönünde, 0,0119 mm y-yönünde ve 0,1116 mm z-yönünde deformasyon olduğu tespit edilmiştir. 12U küp uydusunun gövdesinde; 0,0008 mm x-yönünde, 0,0012 mm y-yönünde ve 0,0099 mm z-yönünde deformasyon belirlenmiştir. Fırlatma kutusunda ise 0,0066 mm x-yönünde, 0,0076 mm y-yönünde ve 0,0300 mm z-yönünde deformasyon tespit edilmiştir. Tüm yönler ele alındığında üç bileşende de maksimum deformasyonun z-yönünde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum ivmelenmenin z-yönünde olmasından dolayı en fazla yer değiştirmenin de bu yönde olmasıyla açıklanmaktadır [18], [22], [23], [24].



Şekil 24. 3U küp uydusunun (a) x, (b) y ve (c) z yönlerindeki yer değişimleri.



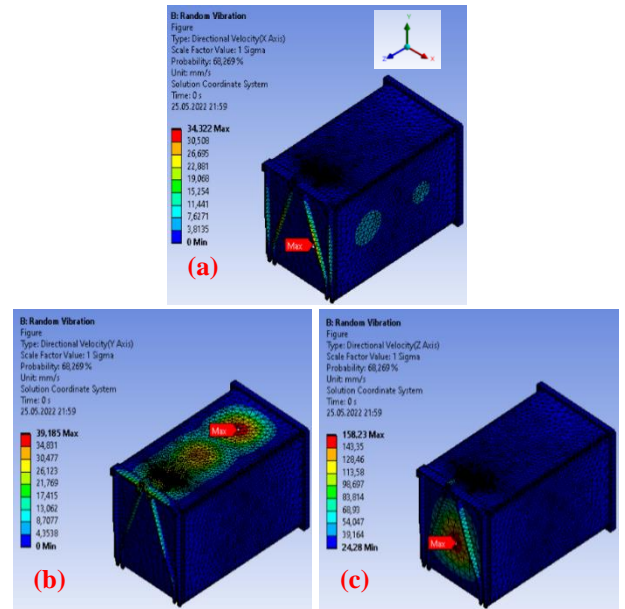
Şekil 25. 12U küp uydusunun (a) x, (b) y ve (c) z yönlerindeki yer değişimleri.



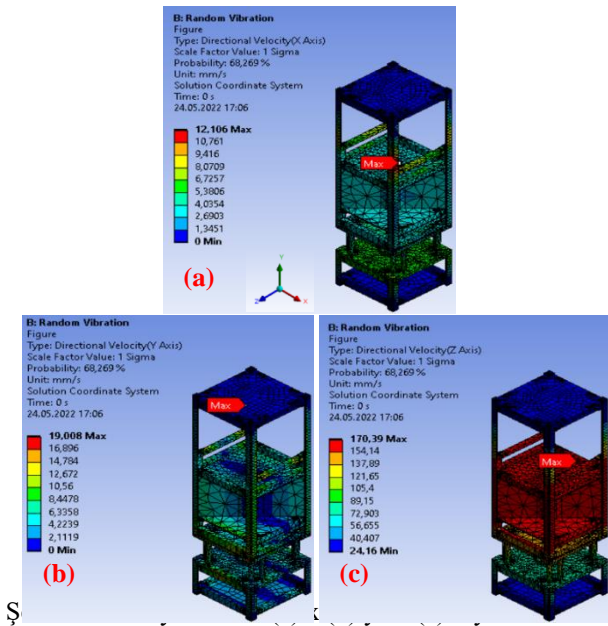
yönlerindeki yer değişimleri.

Şekil 27 (a), (b) ve (c), Şekil 28 (a), (b) ve (c) ve Şekil 29 (a), (b) ve (c)'de sırasıyla; 3U küp uydusunun, 12U küp uydusunun ve fırlatma kutusunun x, y ve z yönlerindeki hız sonuçları gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde; 3U küp uydusunun gövdesinde, x-yönünde 0,012 mm/s, y-yönünde 0,019 mm/s ve z-yönünde 0,170 mm/s hız görülmüştür. 12U küp uydusu gövdesinde, x-yönünde 0,006 mm/s, y-yönünde 0,009 mm/s ve z-yönünde 0,083 mm/s hız tespit edilmiştir. Fırlatma kutusunda ise x-yönünde 0,034 mm/s, y-yönünde 0,039 mm/s ve z-yönünde 0,158 mm/s hız belirlenmiştir. Her üç bileşende de, yer değiştirme oranlarıyla orantılı olarak maksimum hız z-yönünde belirlenmiştir [18], [20], [23].

Şekil 28. 12U uydusunun (a) x (b) y ve (c) z-yönlerindeki hızları.

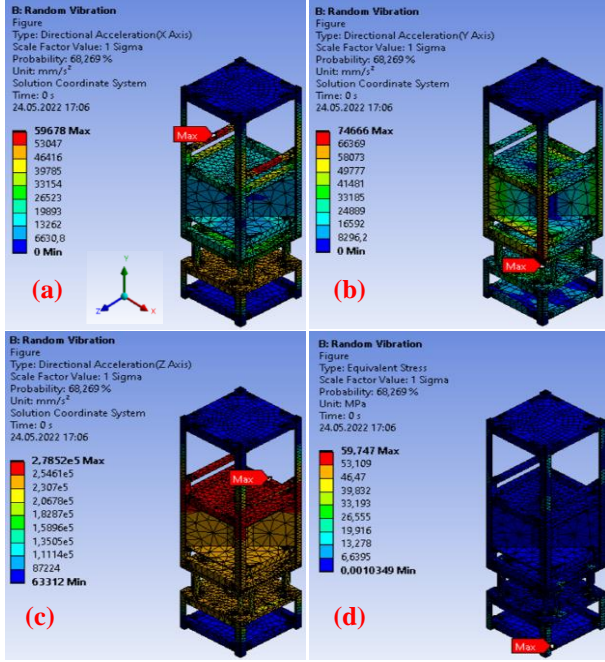


Şekil 29. Fırlatma kutusunun (a) x (b) y ve (c) z-yönlerindeki hızları.

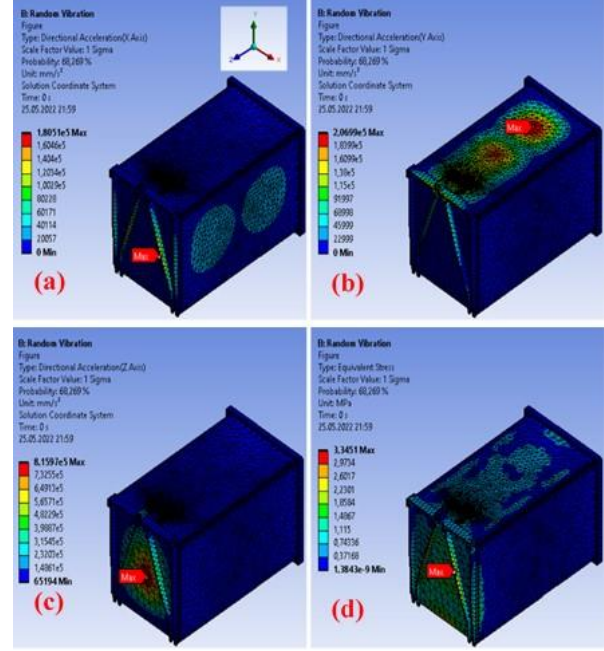


hızları.

Şekil 30 (a), (b), (c) ve (d), Şekil 31 (a), (b), (c) ve (d) ve Şekil 32 (a), (b), (c) ve (d)'de sırasıyla; 3U küp uydusunun, 12U küp uydusunun ve fırlatma kutusunun x, y ve z yönlerindeki ivme değerleri ve gerilme sonuçları gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde; 3U küp uydusunun gövdesinde z-yönünde 278 mm/s² ivme ve 59,7470 MPa maksimum gerilme görülmüştür. 12U uydusunun gövdesinde z-yönünde 630 mm/s² ivme ve 4,9504 MPa maksimum gerilme görülmüştür. Fırlatma kutusunda ise z-yönünde 815 mm/s² ivme ve 3,3451 MPa maksimum gerilme görülmüştür. Her üç durumda, yer değiştirme ve hız sonuçlarıyla benzer şekilde z-yönünde maksimum ivme ve gerilme belirlenmiştir. Rastgele titreşim analizi sonuçlarından elde edilen değerlere göre tasarlanan uydü modelinin güvenilir olduğu tespit edilmiştir [18], [20], [25], [26].



Şekil 30. 3U uydusunun (a) x (b) y ve (c) z-yönlerindeki ivmeler ve (d) gerilme sonuçları.



Şekil 32. Fırlatma kutusunun (a) x (b) y ve (c) z-yönlerindeki ivmeler ve (d) gerilme sonuçları.

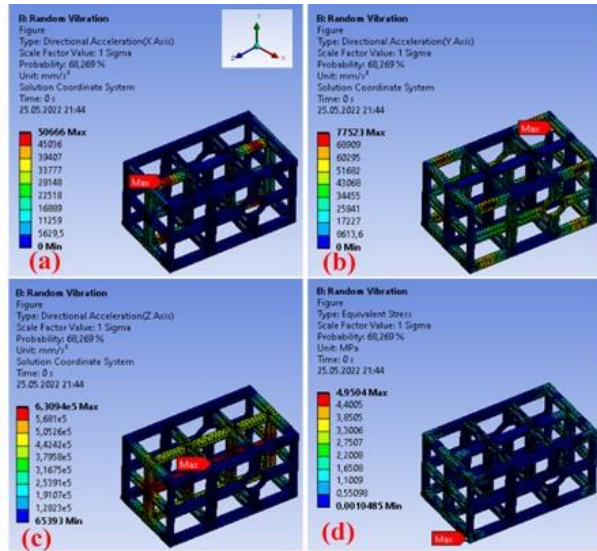
Harmonik Analizler

Harmonik analiz, temel dalgaların üst üste binmesi sonucu oluşan sinyallerin temsili ile ilgili matematiksel bakış açıdır. Yapısal tasarımların rezonans, yorulma ve diğer gerilme etkilerine karşı dayanım gösterip gösteremeyeceğini belirleyen bir analizdir. Bu analizde ele alınan yapının tümü sabit ya da frekansa bağlı olarak çeşitli etkilere maruz kalır. Bu analiz ile en üst tepkilerin verdiği sinyaller tanımlanır ve tepe noktalarının frekanslarındaki stresler temel alınır ve değerlendirilir. Harmonik analiz ile yapının sürekli dinamik davranışı tahmin edilebilir. Ancak sınırlama olarak yapıların sadece kararlı durumdaki zorlanmış titreşimi hesaplanmaktadır [27]. Tablo 7’de yatay ve dikey eksenlerin sinüzoidal titreşim test değerleri verilmiştir.

Tablo 7. Dikey eksenlerin sinüzoidal titreşim test değerleri [21].

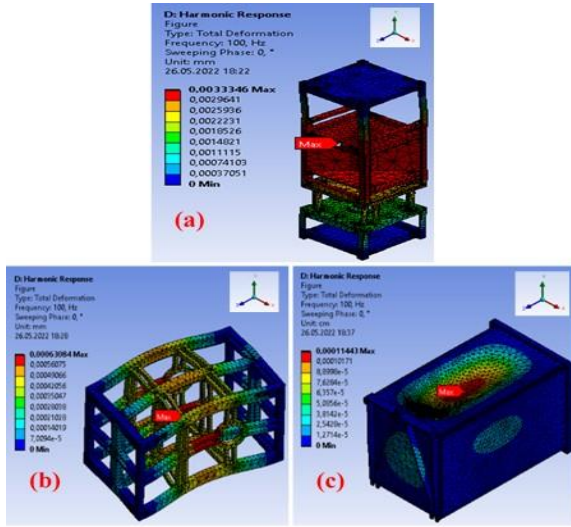
	Frekans Aralığı (Hz)	Yeterlilik Test Değerleri	Kabul Test Değerleri
Dikey Eksen	5,0-11,5	6,75 mm (DA)	4,5 mm (DA)
	11,5-20,0	1,80g	1,2g
	20-25	1,8-3,75g	1,2-2,5g
	25-33	3,75g	2,5g
	33-35	3,75-0,75g	2,5-0,5g
Yatay Eksen	35-100	0,75g	0,5g
	5,0-7,0	6,75 mm (DA)	4,5 mm (DA)
	7,0-30,0	0,67 g	0,45 g
	30-100	0,45 g	0,30 g

Güneş yelkenli 3U ve 12U küp uyduları ve fırlatma kutusunun, harmonik analizinde gerek frekans gerekse kuvvetin en maksimum tepe noktaları temel alınmıştır.



Şekil 31. 12U uydusunun (a) x (b) y ve (c) z-yönlerindeki ivmeler ve (d) gerilme sonuçları.

Yüksek genliğe sahip harmonik tahrik frekansları çoğunlukla 100 Hz değerinin altındadır. Düşük seviyelerde titreşim genliğine sahip olmak için yapının doğal frekansı bu değer üzerinde olması beklenir [16]. Tasarlanan 3U ve 12U küp uyduları ve fırlatma kutusu sırasıyla; 241,58 Hz, 702,78 Hz ve 516,93 Hz ilk doğal frekans değerleri içermektedir. Bu değerler, harmonik analizi için uygun değerlerdir [18], [27]. Şekil 33 (a), (b) ve (c)'de sırasıyla; 3U küp uydusu, 12U küp uydusu ve fırlatma kutusunun harmonik titreşim analizleri gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde; 100 Hz ve 0° faz açısında 3U küp uydusu, 12U küp uydusu ve fırlatma kutusunda meydana gelen yer değiştirmeler sırasıyla; 0,0033 mm, 0,0006 mm ve 0,0001 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 33. (a) 3U küp uydusu, (b) 12U küp uydusu ve (c) fırlatma kutusunun harmonik titreşim analizleri.

Statik Analiz

Aerodinamik etkiler ve oluşan ivmeden kaynaklı uydular fırlatma sırasında dinamik ve statik yükler altında kalırlar. Tasarımlarında bu yükleri göz önünde bulundurmamak ve testlerin yapılması gereklidir. Yarı statik yük olan eşdeğer bir statik yükte statik ve dinamik yükleri bir araya getirmek oldukça sıklıkla tasarımlarda kullanılmaktadır [28]. Eşdeğer statik yük, eksenel ve yanal bileşenlere ayrılarak tasarımda kullanılır. PSLV fırlatma aracının fırlatma sürecinde ortaya çıkardığı yöne göre değişen yük değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

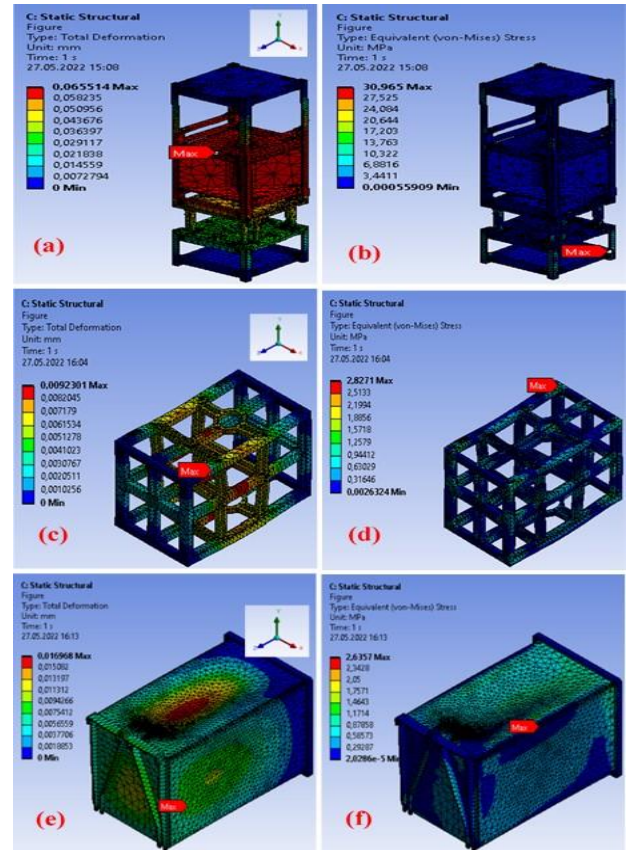
Tablo 8. PSLV fırlatma sisteminin yük faktör gereksinimleri [21].

Fırlatma Sistemi	Eksenel (g)	Yanal (g)
DNEPR	8,3	0,2
PSLV		
Birincil Yük	3,75	2,5
İkincil Yük	9,5	6,0

Güneş yelkenli 3U ve 12U küp uyduları ve fırlatma kutusu, her biri yarı statik analiz olan doğal frekans analizine, rastgele titreşim analizine ve harmonik analize göre test edilmiştir. Fırlatma aracının uygulanan değerler üzerinde dayanım gösterip göstermeyeceğini belirlemek

için, PSLV fırlatma aracı roketinin talep ettiği değerlerden daha yüksek, her ekseninde 10 g değerinde bir statik ivmeye karşı test edilmiştir. Şekil 34 (a) ve (f)'de sırasıyla; 3U küp uydusu deformasyonu, 3U küp uydusu gerilme, 12U küp uydusu deformasyonu, 12U küp uydusu gerilme, fırlatma kutusu deformasyonu ve fırlatma kutusu gerilme değerleri verilmiştir. Yapılan işlemlerde yer çekimi ivmesi 9,81 m/sn² olarak alınmıştır.

Statik analiz testine göre; 3U küp uydusunda 0,0655 mm yer değiştirme ve 30,96 MPa gerilme, 12U küp uydusunda 0,0092 mm yer değiştirme ve 2,82 MPa gerilme ve fırlatma kutusunda 0,0169 mm yer değiştirme ve 2,63 MPa gerilme değerleri tespit edilmiştir. Analizler sonucuna göre yarı statik ivmeler karşısında 3U küp uydusu, 12U küp uydusu ve fırlatma kutuları güvenli bir sonuç sergilemişlerdir [18], [19]. Günümüzde farklı üreticiler tarafından tasarlanan ve test edilen farklı boyutlardaki kalifiye küp uydusu gövde yapılarını temin etmek mümkündür. Ancak tasarlanan uyduların üzerinde bulunan sistemlerin yük dağılımları ve uydunun maruz kalacağı yükler, uydusu görev türü ve fırlatma aracı seçimine göre değişkenlik göstermektedir. Bu çalışma görev türüne uygun bir gövde yapısının pratik şekilde geliştirilme sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 34. (a) 3U küp uydusu deformasyonu, (b) 3U küp uydusu gerilme, (c) 12U küp uydusu deformasyonu, (d) 12U küp uydusu gerilme, (e) fırlatma kutusu deformasyonu ve (f) fırlatma kutusu gerilme değerleri.

Sonuçlar

Küp uydular; küçük boyutlu olması, karmaşık olamayışı ve ekonomiklik gibi avantajlarından dolayı test edilmeleri yer gözlem uydularına göre oldukça kolay gerçekleşmektedir. Bu çalışmada güneş yelkenli küp uydular bu uyduları taşıyan fırlatma kutusu için gerekli standartlar, yer ve uzay ortam şartları göz önüne alınarak özgün tasarımsal iyileştirmeler yapılarak geliştirilmiştir. Yapılan analizlerde ayrıntılı analitik yaklaşım gerektiren, uzun ve yüksek hesap isteyen modellerden kaçınılmıştır. Gereksiz ek parçalar ve fiziksel süreçte etkisi olmayan parçalar kaldırılarak daha basit ve etkili analitik modeller tercih edilmiştir. Tasarımın güvenilirliğini kanıtlamak amacıyla yapının titreşim gereksinimlerini belirlemek için doğal frekans analizi, frekans cevap analiz sonuçları kullanılarak rastgele titreşim analizi, frekans ve fonksiyonu arasındaki bağlantıları belirlemek için harmonik ölçümler ve statik analizler yapılmıştır. Üretimden önce tasarım aşamasında uydunun istenilen değerleri karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre güneş yelkenli 3U ve 12U küp uyduları ve fırlatma kutusu yapısal sistemi belirtilen koşullar altında dayanıklı bir yapı sergilediği görülmüştür. Geliştirilen tasarım en kötü senaryoda dahi uydu yapısının elastikliğini ve güvenliğini koruduğunu doğrulamıştır. Yeni tasarımda, kullanılan Al 6061-T6 malzemesi özellikle güneş yelkenli 3U ve 12U küp uyduları ve fırlatma kutusu yapıları üzerinde oluşabilecek hasarların engellediğini göstermiştir.

Kaynaklar

- [1] S. Duijsens, "Cubesat deployment", Master Theses, Université de Liège -iAcademic, Université de Liège -iAcademic, 2017. Erişim: 08 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2586/2/TFE%20Summary.pdf>
- [2] K. N. Shukla, "Heat pipe for aerospace applications—an overview", *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, c. 5, sy 01, s. 1, 2015.
- [3] H. Heidt, J. Puig-Suari, A. Moore, S. Nakasuka, ve R. Twiggs, "CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation", 2000, Erişim: 18 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2000/All2000/32/>
- [4] J. E. Herrera-Arroyave, B. Bermúdez-Reyes, J. A. Ferrer-Pérez, ve A. Colín, "CubeSat system structural design", içinde *67th International Astronautical Congress. Guadalajara, Mexico*, 2016, ss. 1-5. Erişim: 18 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.academia.edu/download/54613490/IAC-2016_Barbara.pdf
- [5] P. Wallace, A. Kalapura, ve S. I. Kim, "Thermal Modelling and Analysis of a Cube Satellite, EIRSAT-1: Steady Analysis", içinde *2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, Orlando, FL: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Eyl. 2018. doi: 10.2514/6.2018-5285.
- [6] D. Q. Dinh, "Thermal modeling of NanoSat", M.S., Ann Arbor, United States. Erişim: 18 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.proquest.com/docview/1145711379/abstract/52292285D38F4D7APQ/1>
- [7] R. Coker, "Thermal Modeling in Support of the Edison Demonstration of Smallsat Networks Project", içinde *43rd International Conference on Environmental Systems*, Vail, CO: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Tem. 2013. doi: 10.2514/6.2013-3368.
- [8] J.-R. Tsai, "Overview of Satellite Thermal Analytical Model", *Journal of Spacecraft and Rockets*, c. 41, sy 1, ss. 120-125, Oca. 2004, doi: 10.2514/1.9273.
- [9] S. Czernik, "Design of the Thermal Control System for Compass-", *University of Applied Sciences Aachen, FACH Hochschule Aachen, Germany*, ss. 4-91, 2004.
- [10] K. Koçyiğit, "Savunma Sanayiinde Kullanılan su Araçlarının Al 6061 Malzeme Yüzeylerinde Kaplama Yöntemleri Uygulanarak Korozyon ve Aşınma Etkilerinin Deneysel İncelenmesi", Master's, Ann Arbor, United States, 2022. Erişim: 18 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.proquest.com/docview/2787195769/abstract/C99C62680A62448FPQ/1>
- [11] K. I. M. Rokstad, R. Birkeland, ve N. P. Vedvik, "Investigation of using composite materials for the cubesat primary structure", içinde *European Cubesat Symposium, Brussels*, 2012.
- [12] M. A. Mojica, "Structural Subsystem Design, Analysis and Optimization for a Nanosatellite", PhD Thesis, MS Dissertation, San José State University, Department of Mechanical and ..., 2012.
- [13] C. L. Stevens, J. L. Schwartz, ve C. D. Hall, "Design and system identification of a nanosatellite structure", içinde *Proceedings of the 2001 AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference, Quebec City, Quebec*, 2001. Erişim: 18 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Christopher-Hall-12/publication/240610268_DESIGN_AND_SYSTEM_IDENTIFICATION_OF_A_NANOSATELLITE_STRUCTURE/links/541879ae0cf25ebee9881dbf/DISEIGN-AND-SYSTEM-IDENTIFICATION-OF-A-NANOSATELLITE-STRUCTURE.pdf
- [14] A. Gündoğdu, "Bir Uydunun Fırlatma Esnasında Maruz Kaldığı Yükler Altındaki Yapısal Davranışının İncelenmesi", PhD Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008. Erişim: 18 Ekim 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/4657>
- [15] J. J. Wijker, *Spacecraft structures*. Springer Science & Business Media, 2008. Erişim: 10 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=6cyTjKyjOUYC&oi=fnd&pg=PA4&dq=%E2%80%A2%09Wijker,+J.+J.+\(2008\).+Spacecraft+structures.+Springer+Science+%26+Business+Media&ots=JJQ4vYsgw6&sig=wRboWGJdYX9eu5SNwflxv1MSBs](https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=6cyTjKyjOUYC&oi=fnd&pg=PA4&dq=%E2%80%A2%09Wijker,+J.+J.+(2008).+Spacecraft+structures.+Springer+Science+%26+Business+Media&ots=JJQ4vYsgw6&sig=wRboWGJdYX9eu5SNwflxv1MSBs)

- [16] C. A. M. Soares, C. M. M. Soares, ve M. J. Freitas, *Mechanics of composite materials and structures*, c. 361. Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] E. Menteş, “Kompozit 3U küp uyduların yapısal analiz ve tasarımları”, PhD Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015. Erişim: 31 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/items/b131ad48-3ca4-4cdf-a584-2fbf2cb3e53f>
- [18] M. F. Ercan, “Earth Observation Satellite Design, Control and Analyze”, MSc. Thesis, Yıldız Technical University, Institute of Science and Technology, Yıldız Technical University, 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [19] A. K. Karaaslan ve C. Tola, “3 birimlik küp uydular için yörtüngeneden düşürme sistemi tasarımı”, Erişim: 09 Nisan 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Ceyhun-Tola/publication/344225029_3_Birimlik_Kup_Uydular_icin_Yorungeden_Dusurme_Sistemi_Tasarimi/links/5f5dc1664585154dbbce1c61/3-Birimlik-Kuep-Uydular-icin-Yoerungeden-Duesuerme-Sistemi-Tasarimi.pdf
- [20] I. B. Shafique, F. Rabbi, R. Halim, ve A. Mahmood, “Modeling and testing of a nano-satellite and implementation of a BalloonSat with data analysis”, PhD Thesis, BRAC University, 2016. Erişim: 10 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://dspace.bracu.ac.bd/xmlui/handle/10361/6197>
- [21] Indian Space Research Organisation, *Polar Satellite Launch Vehicle User's Manual*. India, 2005.
- [22] N. E. Coşkunpınar vd., “Anlık yer gözlem amaçlı nano-uydu takımı tasarımı ‘FUEGOSAT’”, program adı: VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Kocaeli University, 2016, ss. 1-14. Erişim: 10 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Ukte-Oner/publication/326679145_Anlik_Yer_Gozlem_Amacli_Nano-Uydu_Takimi_Tasarimi_FUEGOSAT/links/5b5e05270f7e9bc79a6d4f84/Anlik-Yer-Goezlem-Amacli-Nano-Uydu-Takimi-Tasarimi-FUEGOSAT.pdf
- [23] G. I. Barsoum, H. H. Ibrahim, ve M. A. Fawzy, “Static and Random Vibration Analyses of a University CubeSat Project”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, c. 1264, sy 1, s. 012019, Tem. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1264/1/012019.
- [24] B. Topcu, C. C. Güvenç, ve C. Tola, “3 birimlik bir küp uydu için gövde yapısı tasarımı”, Erişim: 09 Nisan 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Ceyhun-Tola/publication/328581816_3_Birimlik_Bir_Kup_Uydu_icin_Govde_Yapisi_Tasarimi/links/5bd73bf792851c6b27971be6/3-Birimlik-Bir-Kuep-Uydu-icin-Goevde-Yapisi-Tasarimi.pdf
- [25] X. Zhang, H. Zhou, W. Shi, F. Zeng, H. Zeng, ve G. Chen, “Vibration Tests of 3D Printed Satellite Structure Made of Lattice Sandwich Panels”, *AIAA Journal*, c. 56, sy 10, ss. 4213-4217, Eki. 2018, doi: 10.2514/1.J057241.
- [26] NASA-STD-5002, *Load Analyses of Spacecraft and Payloads*. NASA, Huntsville, 1996.
- [27] G. F. Abdelal, N. Abulfoutouh, ve A. H. Gad, *Finite element analysis for satellite structures: applications to their design, manufacture and testing*. Springer Science & Business Media, 2012. Erişim: 11 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=SuPahTa-bnIC&oi=fnd&pg=PR6&dq=Abdelal,+G.,+F.,+Abulfoutouh,+N.,+Gad,+A.,+H.,+\(2013\).+Finite+Element+Analysis+for+Satellite+Structures,+Springer,+London.&ots=XBWsJARgq&sig=4jkI3M3MmKXup_XCKucPerQHmA](https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=SuPahTa-bnIC&oi=fnd&pg=PR6&dq=Abdelal,+G.,+F.,+Abulfoutouh,+N.,+Gad,+A.,+H.,+(2013).+Finite+Element+Analysis+for+Satellite+Structures,+Springer,+London.&ots=XBWsJARgq&sig=4jkI3M3MmKXup_XCKucPerQHmA)
- [28] G. Vulpetti, L. Johnson, ve G. L. Matloff, *Solar Sails: A Novel Approach to Interplanetary Travel*. New York, NY: Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-0941-4.



Çarpışma sonrası oluşan sub-litosferik manto kökenli alkalin lavlar: Elazığ volkanitleri

Sub-lithospheric mantle-derived alkaline lavas formed after the collision: Elazığ volcanics

Sevcan Kürüm^{1*}, Safiye Aydemir², Abdullah Sar³, İsmail Yıldırım⁴

¹ Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, skurum@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6121-5564>

² Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, saydemir2300@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2108-5694>

³ Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, asar@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9752-7807>

⁴ Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, iyildirim@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5588-1210>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 19 Şubat 2024
Revizyon 19 Nisan 2024
Kabul 22 Nisan 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Alkalin lavlar, Elazığ volkanitleri,
Sr-Nd izotop jeokimyası, petroloji

ÖZ

Bu çalışmada, Elazığ yakın çevresinde üç farklı bölgede bulunan volkanik kayaların jeokimyasal ve Sr-Nd izotop verilerine dayalı olarak değerlendirilmeleri yapılmıştır. Bölgedeki volkanizma, esas olarak bazaltik lav akıntıları ile daha az yayımlı bazik cüruf konileri ve piroklastik kayalardan oluşmuştur. Kuvaterner yaşlı bu bazaltik lavların jeokimyasal verileri, kayaların silise doymamış alkali özellikte; potasik trakibazalt, hawaiiit ve bazanit bileşiminde olduğunu gösterir. Volkanitlerin ana ve iz elementlerinin SiO₂ ile değişimleri ve element içerikleri, genelde birbirleriyle uyumlu olarak bulunur. Benzer dağılım kondrit ve ilksel mantoya göre normalize edilmiş çoklu element değişim diyagramlarında da görülmektedir. Örneklerde genel olarak büyük iyon litofil elementler ile yüksek alan kuvvetine sahip elementlerden Nb, Ta'nın zenginleşmesi, düşük ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_(i) (0.703499-0.703923) ve yüksek ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd_(i) (0.512829-0.512884) izotop içerikleri ve pozitif εNd (3.76-4.84) değerleri ile jeokimyasal verilerin değerlendirilmesi sonucunda, bu volkanitlerin tüketilmiş mantodan türemiş, kalınlaşan kıtasal kabuğun etkisiyle oluşan kirlenmeyle beraber yitime bağlı olarak yitim ergiyiklerinin neden olduğu metasomatizmadan da etkilendiğini göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 February 2024
Received in revised form 19 April 2024
Accepted 22 April 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Alkaline lavas, Elazığ volcanics, Sr-Nd isotope geochemistry, petrology

ABSTRACT

In this study, volcanic rocks located in three different regions around Elazığ were compared based on geochemical and Sr-Nd isotope data. Volcanism in the region consists mainly of basaltic lava flows and less widespread basic cinder cones and pyroclastic rocks. Geochemical data of these Quaternary basaltic lavas show that the rocks are silica-unsaturated, alkaline, with a composition of potassic trachybasalt, hawaiiite and basanite. The variations of major and trace elements against SiO₂ and the element contents indicate geochemical similarities between these volcanics. This similarity is also apparent in the primary mantle- and chondrite-normalized multi-element variation diagrams. The enrichment large ion lithophile elements together with high field strength elements Nb-Ta, the low ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_(i) (0.703499-0.703923), high ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd_(i) (0.512829-0.512884) isotope ratios, and positive εNd (3.76-4.84) values indicate that, these volcanics are mainly derived from depleted mantle. In addition, their geochemistry is also consistent with contribution from subduction-related melts and crustal contamination due to thickening continental crust.

Giriş

Doğu Anadolu, Alp-Himalaya orojenik sistemi içerisinde bir sıkışma bölgesi olarak önemli bir yere sahip olup, çarpışma sonrası magmatizmanın yaygın olduğu önemli bir kuşaktır. Sıkışma tektoniği ve buna bağlı olarak magmatik-tektonik olayların oluşumunu sağlayan Arabistan ile Avrasya arasındaki ilk temasın ne zaman başladığı kesin olarak belirlenememekle beraber, yakınlaşma-çarpışmanın Geç Kretase'den [1]-[4] Geç Eosen-Oligosen (35-25 My; [5]-[7] ve Miyosen'e [8]-[12] kadar sürdüğü belirtilmektedir. Böylece, Doğu Anadolu Bölgesinde Arap-Avrasya levhasının yakınsamasının sonucu olan Bitlis-Zagros Çarpışma Kuşağının erken Miyosen'de (~20 My) gelişmesi sonucunda [13], Neojen tektonik evrimini kontrol eden en önemli ana jeodinamik süreçlerin başladığı belirtilir [10], [14]-[17]. Buna bağlı olarak Doğu Anadolu Bölgesi, içerisinde bulunduğu Alp-Himalaya Orojenez sisteminde olduğu gibi, levhalar arası yitimi (Arabistan-Avrasya) ve dolayısıyla etkileşimi, kıta kıta çarpışmasını, kalınlaşmış kıtasal kabuğun oluşumunu ve aşırı ağırlaşmış kabuğun çöküşü ile daha birçok özgün yapısal özellik içerir. Bölge karmaşık bir tektonik birimler mozaiki olarak kabul edilmekle beraber [18], [3], [10], [19]-[21], dünyadaki kıtasal çarpışma örneklerinin en iyi görüldüğü yerlerden birisi kabul edilmektedir [22]. Bu gelişmelere paralel olarak tüm Doğu Anadolu Bölgesi'nde yoğun olarak oluşan magmatizmanın çoğunun çarpışma-çarpışma sonrası olduğu ve bu magmatizmanın bazı bölgelerde ~ 1 km kalınlığa kadar volkanik istifler oluşumuna sebep olduğu belirtilmektedir [23].

Doğu Anadolu Bölgesi'nde kıtasal kabuğun çarpışma sonrası kalınlaşması [24] nedeniyle ülkemizdeki en derin Moho sınırına (~50 km) sahip olduğu belirtilerek [25] başlangıçta çarpışma sonrası kalınlaşan yığılma (accretion) ürünlerinden oluşmasına karşın, manto litosferinin çok ince veya olmadığı ileri sürülmektedir [26]-[28]. Ancak kıtasal litosferin zamana bağlı olarak orojenik süreçlerle inceltildiği ve böylece oluşan volkanizmanın ya da magma kaynaklarının değişiminin bölgenin jeodinamik çerçevesinin gelişimini yansıttığı belirtilmektedir [29], [30]. Tüm bunlara bağlı olarak volkanik ürünlerin, yaklaşan levha yayının etkisiyle geç-orojenik magmatik olaylar şeklinde değiştiği ve devamında da ardışık genişleme dönemlerine geçiş gösterdiği belirtilmektedir [31]-[33]. Bu jeodinamik evrim sonucunda volkanik ürünler ya orojenik özelliklerini belirtecek şekilde kalkalkalinden alkaline değişen (örneğin; yüksek büyük iyon yarıçaplı element-BİYE/yüksek çekim alanlı element-YÇAE oranları, yüksek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ve düşük $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ izotop bileşimleri) ya da tipik levha içi jeokimyasal karakteristikler (düşük BİYE/YÇAE oranları, düşük $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ve yüksek $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) ile basit petrotektonik yapıya uymayan geçiş üyeleri [34]-[38], [30], [33] gibi farklı özellikler göstermektedir. Ayrıca, bölge volkanizması için asimilasyon ve fraksiyonel kristalleşmenin oluşturduğu farklılaşmayla beraber, yaklaşık % 2-10 oranında üst kabuk kirliliği ve yitim sedimanları tarafından modifiye edilmiş bir manto kaynağının varlığı öne sürülmektedir [38]-[39]. Yine, bölgedeki ana magmanın, sadece litosferik manto

[34], [40]-[41] veya Neo-Tetis Okyanusu'nun kuzeye doğru yitilen levhasının dikleşmesi ve kırılmasıyla oluşan yitim bileşeninden etkilenmiş astenosferik mantodan [42], [9], [33] oluşabileceği gibi esas olarak litosfer ve astenosferik ergiyiklerin değişken karışımından türetildiği de belirtilmektedir [38]. Ayrıca, bölgedeki volkanizmanın orojenik ve tipik levha içi jeokimyasal özellikler gösterdiği yani orojenikten anorojenik magmatik aktiviteye geçişin bulunduğu en iyi laboratuvarlardan birini temsil ettiği belirtilmektedir [43]-[44].

Çarpışma sonrası volkanizma için yaygın olarak kabul edilen ve astenosferik ergimelerden artan bir katkı öngören modellerden farklı olarak, Doğu Anadolu'daki magmatizmada, ergime derecesi ve litosfer mantosunun katkısının, Miyosen-Pliyosen'den Kuvaterner'e kadar artmış olduğu belirtilmektedir [38]. Bölgede çarpışma sonrası magmatizma; Erzurum-Kars platosunda ~ 11 My [45]-[46], Erzurum bölgesinde ~14 My [45, Van'ın kuzey bölgesinde ~ 15 My [48], Elazığ batısında Yamadağ ve Tunceli çevresi volkanitlerinde ~ 16 My [30], [49]-[50] gibi farklılık göstermektedir. Bu yaş farklılıkları, volkanizmanın güneyden (~ 17 milyon yıl) kuzeye doğru gidildikçe daha gençleştiği (~ 11 ila 9 milyon yıl) [23] fikrini desteklemekle beraber, güneyde de örneğin Elazığ ve Karakoçan çevresinde saptanan 1.6-4.6my [29]-[30] yaş verilerinde olduğu gibi daha genç volkanitler de bulunmaktadır. Tüm bu verilere karşın, genel olarak volkanizmanın erken - orta Miyosen'de başladığı belirtilmekte, ancak volkanizmanın geç Miyosen'de daha yoğun olduğu da kabul edilmektedir.

Elazığ volkanitlerinin Doğu Anadolu Bölgesi'nin güncel tektonik yapısını kontrol eden Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay sistemlerini oluşturan doğrultu atımlı hareketin başlamasından sonra yerleştiği belirtilmektedir [29]. Bu volkanitlerin 1.4 ile 1.9 My (Neojen-Kuvaterner) yaş verisiyle bölgedeki en son magmatizma ürünü olduğu ve bölgenin jeodinamik sisteminin göstergelerinden olan magmatik aktivite sonucu olduğu belirtilir [30] [51]-[52].

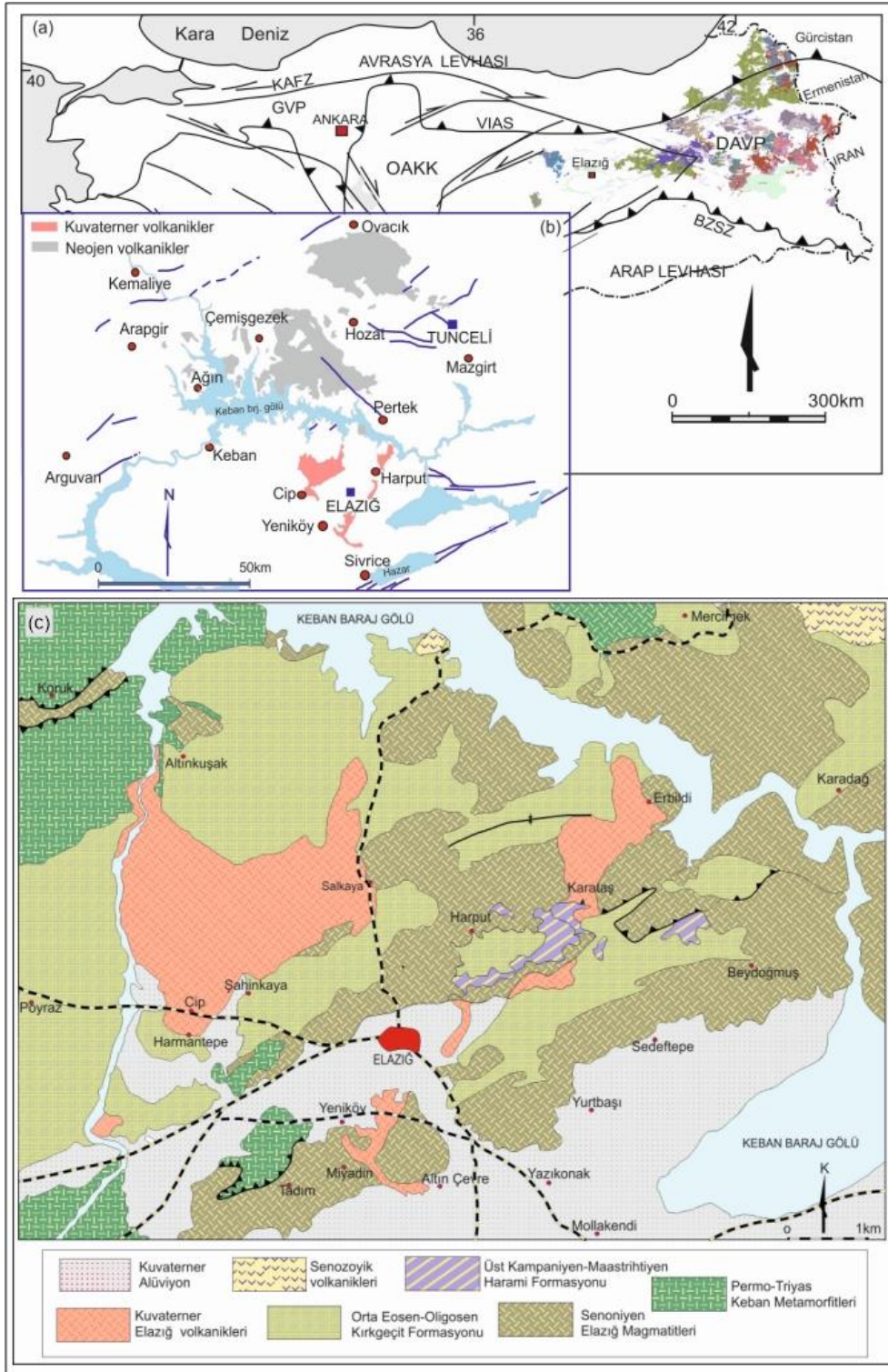
Bu çalışmada, Doğu Anadolu Volkanik Provensi (DAVP; Şekil 1a) olarak tanımlanan volkanizmanın batı devamını oluşturan ve Elazığ il merkezi yakın çevresinde yayılım gösteren Elazığ volkanitlerinin, tüm kayaç ve Sr-Nd izotop analiz verilerinin bölgede yapılan diğer referans çalışmalarla birlikte değerlendirilerek, volkanitlerin oluşumunda rol oynayan magmanın kökeni ve jeotektonik ortamını belirleyebilmek amaçlanmıştır.

Bölgesel Jeoloji

Elazığ ve çevresinde temel kayaçları oluşturan metamorfik ve magmatik kayaçlarla birlikte bölgede yaygın olarak bulunan sedimanter kayaçlar bulunmaktadır. Çalışma bölgesindeki çalışma konusu volkanitlerden yalnızca Cip köyü çevresindeki volkanitlerle kuzeybatı sınırında dokanak oluşturan Permo-Triyas yaşlı Keban Metamorfitleri, yer yer Üst Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri ile tektonik dokanaklıdır (Şekil 1c). Bölgede esas yayılımını Keban ve çevresinde izleyebildiğimiz bu birimin oldukça kalın istif sunan sığ denizel ortam

çökellerinin, Erken Permiyen-Geç Triyas'ta çöktüğü belirtilir [53]. Çökelen sığ denizel sedimanların bölgesel

metamorfizma geçirmesi ile oluşan birimin metamorfizma yaşının ise Jura-Alt Kretase olduğu kabul edilir [54].



Şekil 1. (a) Türkiye'nin sadeleştirilmiş tektonik birimlerini ([57] ve [9]'dan değiştirilmiştir) ve Doğu Anadolu'daki çarpışma sonrası yayılım gösteren volkanizmanın (Doğu Anadolu'nun volkanik provensi) görünümü, (b) Elazığ ve çevresinin lokasyon haritası, (c) Çalışma alanının jeolojik haritası ([58]'dan sadeleştirilmiştir). KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, BZSZ: Bitlis Zagros Sütur Zonu, DAVP: Doğu Anadolu Volkanik Provensi, GVP: Galatya Volkanik Provensi. OAKK: Orta Anadolu Kristalin Kompleksi, VIAS: Vardar İzmir Ankara Süturu.

Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri, çalışma konusu volkanitlerle çok daha fazla dokanak ilişkisi göstermektedir. Cıp köyünün kuzeybatı tarafı ile doğu ve kuzeyde Pertek yolu ile Salkaya, Toraman köyleri ve Harput, Tadım,

Yeniköy çevresinde ve Güney çevre yolunun da bulunduğu alanda gözlenmektedir (Şekil 1c). Tüm bu yayılım alanlarında farklı litolojilerde plütonik kayalar ile Elazığ güneyi ve Harput çevresinde onların eşlenikleri volkanik

kayaçlar ve yine Harput çevresinde asidik damar kayaçları şeklinde yüzeylenmektedir. Harput çevresinde ve Elazığ seviyeleri içeren bir istif oluşturan Harami Formasyonu, Elazığ Magmatitleri üzerinde uyumlu olarak bulunmaktadır (Şekil 1c). Bölgedeki diğer bir sedimanter istifi oluşturan Orta Eosen–Oligosen yaşlı Kırkgeçit Formasyonu [55], killi-kumlu kireçtaşları ile beraber genellikle konglomera, kumtaşı ve çamurtaşı araldanmasından oluştuğu belirtmektedir. Çalışma konusunu oluşturan ve bölgedeki en genç birim olan Elazığ volkanitleri, Elazığ il merkezi yakın çevresinde coğrafik olarak birbirinden bağımsız üç farklı lokasyonda yayılım göstermektedir. Bu yayılımlardan Cip köyü çevresindeki volkanitler en geniş olanıdır. Bu bölgedeki volkanitler Cip köyü merkez olmak üzere güneyde Harmantepe köyü ile doğu ve kuzeyde Salkaya ve Toraman köylerinden sonra Keban Barajı göl alanına kadar yayılım göstermektedir (Şekil 1c). Volkanitlerin diğer yayılımı Harput doğusunda Karataş tepeden başlayıp doğu ve kuzeydoğuya doğru devam ederek Keban Barajı göl alanında sonlanmaktadır. Bölgedeki en az yayılımı olan volkanitler ise Yeniköy ve güney çevreyolu bölgesinde bulunmaktadır.

Materyal ve Metot

Elazığ merkezi yakın çevresinde farklı lokasyonlarda yayılım gösteren volkanitlerden ikişer adet olmak üzere toplam altı örneğin tüm kayaç (ana oksit, iz ve nadir toprak element) analizleri ACME (Vancouver, Kanada) Analitik laboratuvarlarında yaptırılmıştır. Ana oksitler, ICP-AES (İndüktif Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometresi), iz ve nadir toprak element analizleri ise ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) ile gerçekleştirilmiştir. 5 örnekte yaptırılan Sr ve Nd İzotop jeokimyası analizleri, ODTÜ Merkez Laboratuvarı (Ar-Ge Eğitim ve Ölçme Merkezi, Radyojenik İzotop Laboratuvarı)nda Köksal [55]'de detayları ve koşulları verilen metodları baz alan laboratuvar içi deney talimatları uygulanarak yapılmıştır.

Bulgular

Tüm kayaç jeokimyası

Çalışma konusu kayaçlarda analizi yapılan örneklerin tüm kayaç ana oksit, iz ve nadir toprak element analiz sonuçları Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Örneklerin SiO₂ değerleri % ağı. 47.33-49.21 aralığında değişirken, Al₂O₃ % ağı. 16.71-17.41, Na₂O % ağı. 4.11-5.00, K₂O % ağı. 2.30-2.64 ve Fe₂O₃ % ağı. 9.15-10.59 ile MgO % ağı. 5.02-7.46 aralığında olup, ateşte kayıp (AK) değerleri ise %0.4- 1.0 arasında değişmektedir (Tablo 1).

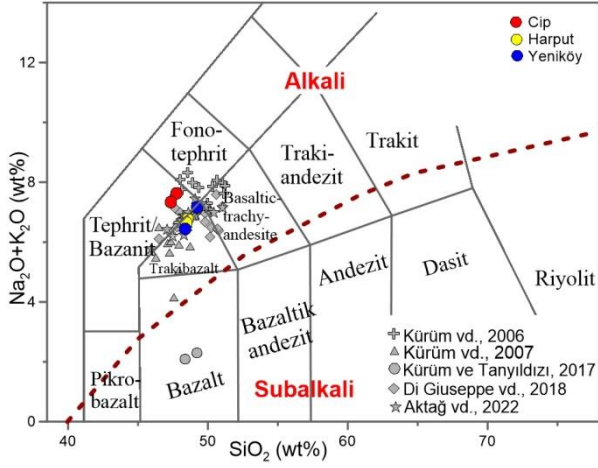
Ana element analiz verilerinden yararlanarak yapılan CIPW norm hesaplamalarına göre örneklerde yüksek oranda normatif plajiyoklasla (albit+anortit) (%40.86-47.08) beraber farklı ortoklas (%13.59-15.60), nefelin (%4.86-10.13), diyopsit (%8.55-12.29), olivin (%9.05-13.08) ve magnetit (%13.17-15.35) ile daha düşük oranda ilmenit (%3.42-4.35) ve apatit (%1.53-2.06) bulunmaktadır (Tablo 1). Örneklerde kuvars, korund ve hipersten bulunmazken, örneklerin olivince zengin olması ve nefelin içermeleri gibi normatif mineral içerikleri, bu kayaçların

güneyinde yüzeyleyen Üst Kampaniyen-Maastrichtiyen yaşlı tabanda kırmızı renkli konglomera, kumtaşı ve kireçtaşı alkali bazaltik özellikte olduğunu göstermektedir. Yine tüm örneklerin yaklaşık %14 oranında magnetit ve %1.53-2.06 arasında ilmenit içermesi petrografik verilerde saptanan opak mineral oranları ile uyumluluk göstermektedir [59].

Jeokimyasal ve izotop verilerinin değerlendirilmesinde bu çalışma kapsamında alınan örneklerle beraber, çalışma konusu kayaçların farklı bölgelerinde yapılan önceki çalışmalar referans veri olarak kullanılıp birlikte değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan toplam alkali (Na₂O+K₂O)-silis (SiO₂) isimlendirilme diyagramında [60] tüm örneklerin alkali özellikte ve bazik bileşimli olduğu görülmektedir (Şekil 2a). Bu durum normatif mineral içerikleriyle de uyumluluk gösterir. Diyagramda Yeniköy (S14, S15) ile Harput (S18, S20) örneklerinin trakibazalt bileşiminde, Cip köyü örneklerinin (S2, S8) ise tefrit/bazanit bileşiminde olduğu görülür. Trakibazalt alanındaki Harput örneklerinin (Na₂O-2=2.26-2.11) potasik trakibazalt (Na₂O-2≤ K₂O), Yeniköy örneklerinin ise Na₂O-2=3.0-2.82 değerleri ile havait (Na₂O - 2≥ K₂O) bileşiminde olduğu [61], Cip köyü örneklerinin (S2, S8) ise %13.8-12.32 oranındaki olivin içeriklerine göre bazanit (OI>%10) bileşimde olduğu belirlenmiştir. Toplam alkali silika içeriğine göre alkalen özellikteki Elazığ volkanitlerine ait örnekler ile referans alınan [30], [39], [62]-[64] tüm örneklerin alkalen oldukları görülmektedir (Şekil 2).

Tablo 1. Elazığ volkanitlerine ait kayaçların ana oksit (%) ve normatif mineral değerleri.

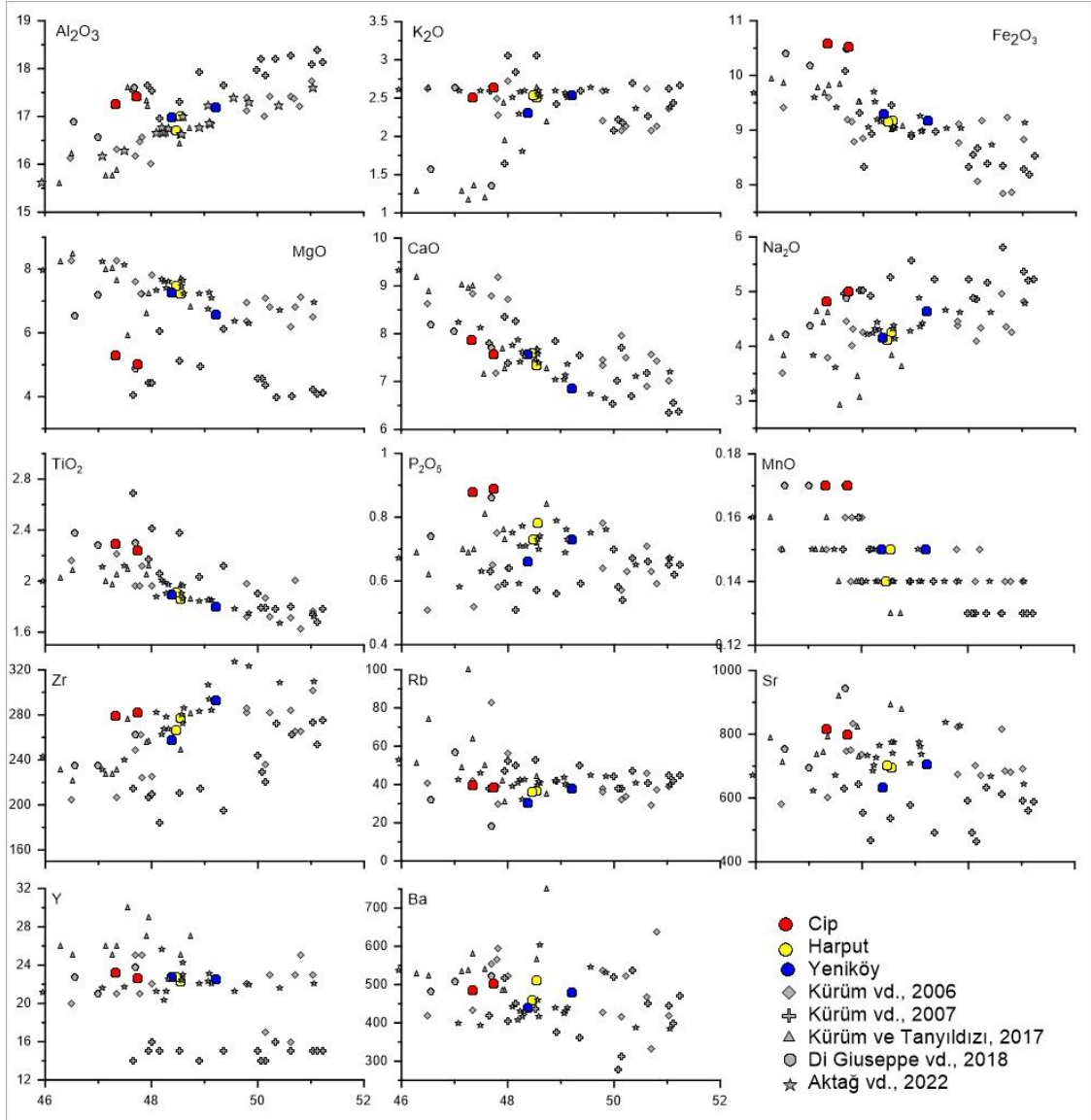
Örnek	Cip-Salkaya Bazanit		Harput Potasik Trakibazalt		Yeniköy Havait	
	S-2	S-8	S-18	S-20	S-14	S-15
SiO ₂	48.38	49.21	48.55	48.47	47.73	47.33
Al ₂ O ₃	16.99	17.18	17.01	16.71	17.41	17.26
Fe ₂ O ₃	9.30	9.18	9.18	9.15	10.52	10.59
MgO	7.27	6.57	7.23	7.46	5.02	5.29
CaO	7.57	6.86	7.34	7.59	7.58	7.87
Na ₂ O	4.15	4.63	4.26	4.11	5.00	4.82
K ₂ O	2.30	2.54	2.51	2.54	2.64	2.51
TiO ₂	1.89	1.80	1.86	1.91	2.24	2.29
P ₂ O ₅	0.66	0.73	0.78	0.73	0.89	0.88
MnO	0.15	0.15	0.15	0.14	0.17	0.17
Cr ₂ O ₃	0.028	0.018	0.032	0.033	0.013	0.015
AK	1.0	0.8	0.7	0.8	0.4	0.6
Normatif Mineral						
Korund	-	-	-	-	-	-
Ortoklas	13.59	15.01	14.80	15.10	15.60	14.83
Albit	26.14	28.39	25.99	24.83	23.60	22.90
Anortit	20.94	18.59	19.88	19.64	17.26	18.05
Nefelin	4.86	5.84	5.45	5.39	10.13	9.69
Diyopsit	9.83	8.55	9.14	10.57	11.73	12.29
Hipersten	-	-	-	-	-	-
Olivin	13.08	12.32	13.21	13.04	8.79	9.05
Magnetit	13.48	13.31	13.31	13.27	15.25	15.35
İlmenit	3.59	3.42	3.53	3.63	4.25	4.35
Apatit	1.53	1.69	1.81	1.69	2.06	2.04
Mg#	55.33	53.14	55.52	56.37	43.06	44.18



Şekil 2. Elazığ volkanitlerinin toplam alkali silis (TAS) diyagramı [60] sınıflaması. Alkali-subalkali çizgisi [65]'den alınmıştır.

Elazığ volkanitlerinin ana oksit ve bazı iz element içeriklerinin artan SiO_2 'e karşı dağılımları, referans alınan diğer örneklerle beraber değerlendirilmiştir (Şekil 3). Bu diyagramlarda mineral fazlarının fraksiyonel kristallenmesine işaret eden pozitif (Al_2O_3 , Na_2O , Zr) veya negatif (CaO , Fe_2O_3 , TiO_2 , Rb) yönselmeler ile kirlenme ve/veya farklı magma karışımlarını gösteren düzensiz dağılımlar (K_2O , MgO , P_2O_5 , Sr, Y, Th, Ba, Ni, Nb) bulunmaktadır. Elementler arasındaki bu değişimler, volkanik kayaların evrimi sırasında piroksen, hornblend, apatit ve Fe-Ti oksit mineral fazlarının fraksiyonlaşmasını yansıtır.

Elazığ volkanitlerinin oluşum süreçleri ve kaynak bileşenlerine yaklaşımda bulunabilmek için, oluşturulan Kondrit ve İlk Manto değerlerine normalize edilmiş çoklu element diyagramlarının (Şekil 4), kendi içerisinde birbirine benzer veya aynı yönseme gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 3. Elazığ volkanitlerine ait kayaların SiO_2 'ye karşı ana oksit ve bazı iz element değişim diyagramları

Tablo 2. Elazığ volkanitlerine ait örneklerin iz ve nadir toprak element (ppm) değerleri.

Örnek	Cip-Salkaya Bazanit		Harput Potasik Trakibazalt		Yeniköy Havaiit	
	S-2	S-8	S-14	S-15	S-18	S-20
Ba	439	479	501	485	510	460
Ni	122	107	33	49	139	137
Sc	19	17	15	16	18	18
Be	<1	1	<1	1	1	<1
Co	30.9	29.3	27.5	27.8	30.9	30.5
Cs	0.3	0.5	0.6	0.6	0.4	0.3
Ga	15.1	15.6	17.1	17.6	15.0	14.7
Hf	5.3	5.6	5.4	5.2	5.2	5.6
Nb	48	57	78	78	62	61
Rb	30	38	39	40	37	36
Sn	2	2	2	2	2	2
Sr	631	704	799	815	695	702
Ta	2.7	3.4	4.4	4.3	3.8	3.7
Th	5.1	5.7	6.3	6.1	5.5	5.3
U	1.2	1.8	1.8	1.6	1.4	1.5
V	159	143	176	178	151	150
W	0.6	0.8	1.0	0.9	0.5	0.8
Zr	257	293	282	279	277	266
Y	22.8	22.5	22.6	23.2	22.3	22.8
Mo	2.1	2.3	4.3	4.0	2.7	1.9
Cu	37.0	31.6	32.1	32.0	34.8	36.5
Pb	3.0	1.8	1.8	1.5	2.4	2.8
Zn	64	56	73	64	57	56
Ni	113	94	29	33	118	123
As	1.0	1.0	1.3	1.1	0.7	0.7
Cd	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sb	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Bi	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au	1.6	1.0	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Hg	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Tl	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
La	34.4	36.8	50.7	50.5	0.30	38.3
Ce	62.5	65.1	90.4	88.6	69.1	67.8
Pr	7.25	7.63	9.95	10.23	8.12	7.92
Nd	26.3	28.7	36.4	37.4	30.3	29.3
Sm	5.17	5.08	6.63	6.56	5.31	5.45
Eu	1.64	1.77	2.12	2.15	1.85	1.72
Gd	4.88	4.94	5.84	6.04	5.24	5.02
Tb	0.75	0.73	0.83	0.86	0.77	0.74
Dy	4.08	4.13	4.51	4.51	4.15	4.13
Ho	0.82	0.85	0.85	0.88	0.85	0.87
Er	2.24	2.27	2.35	2.34	2.40	2.32
Tm	0.33	0.33	0.34	0.31	0.32	0.33
Yb	2.15	2.15	2.02	1.98	2.14	2.12
Lu	0.32	0.32	0.30	0.30	0.32	0.33
La _N /Lu _N	11.16	11.94	17.54	17.47	12.88	12.05
Gd _N /Yb _N	1.84	1.86	2.34	2.47	1.98	1.92
La _N /Sm _N	4.16	4.52	4.78	4.81	4.67	4.39
La _N /Yb _N	10.87	11.63	17.05	17.33	12.60	12.27
Eu _N /Eu*	0.98	1.06	1.02	1.02	1.06	1.01
La/Nb	0.72	0.64	0.65	0.65	0.64	0.63
La/Ta	12.74	10.82	11.52	11.74	10.45	10.35

Normalize değerler [58]'den alınmıştır.

Kondrit değerlerine normalize edilen diyagramda, referans örneklerle beraber tüm örneklerin, hafif nadir toprak elementlerinin (HNTE; La, Ce, Pr, Nd, Sm), ağır nadir toprak element (ANTE; Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) değerlerine göre daha zenginleşmiş olduğu ($La_N/Lu_N=11.16-17.54$; $Gd_N/Yb_N=1.84-2.47$; $La_N/Sm_N=4.16-4.81$ ve $La_N/Yb_N=10.87-17.33$) görülmektedir (Tablo 2; Şekil 4). Volkanitlerin, daha uyumsuz olarak bilinen HNTE bakımından zenginleşmesine karşın daha uyumlu ANTE'ler bakımından doğrusal olarak giderek fakirleşmesi, magmanın kısmi ergimeden sonra fraksiyonlanması ile mümkündür. Ayrıca ANTE'lerin görece olarak daha yataya yakın desen oluşturmaları, kaynak kayacın granat içerebileceğini veya granatın kalıntı fazda korunduğunu, tüketilmemiş ya da az tüketilmiş olduğunu göstermektedir. Çalışma konusu volkanitlerde ki yüksek HNTE/ANTE oranı da bu volkanizmayı oluşturan magmanın spinel peridotit mineralojisinden çok granat peridotit fasiyesindeki kısmi ergimelerle oluşabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca tüm örneklerde Eu değerlerinin negatif anomali göstermemesi ($Eu_N/Eu^*=0.98-1.06$), kayalarda plajiyoklaslarda önemli bir fraksiyonlanma fazı olmadığını göstermektedir.

İlksel Manto değerlerine göre normalize edilmiş çoklu element değişim diyagramında da tüm örneklerin dağılımları birbirlerine benzemekte ve elementlerin ilksel mantoya göre zenginleştiği görülmektedir (Şekil 4).

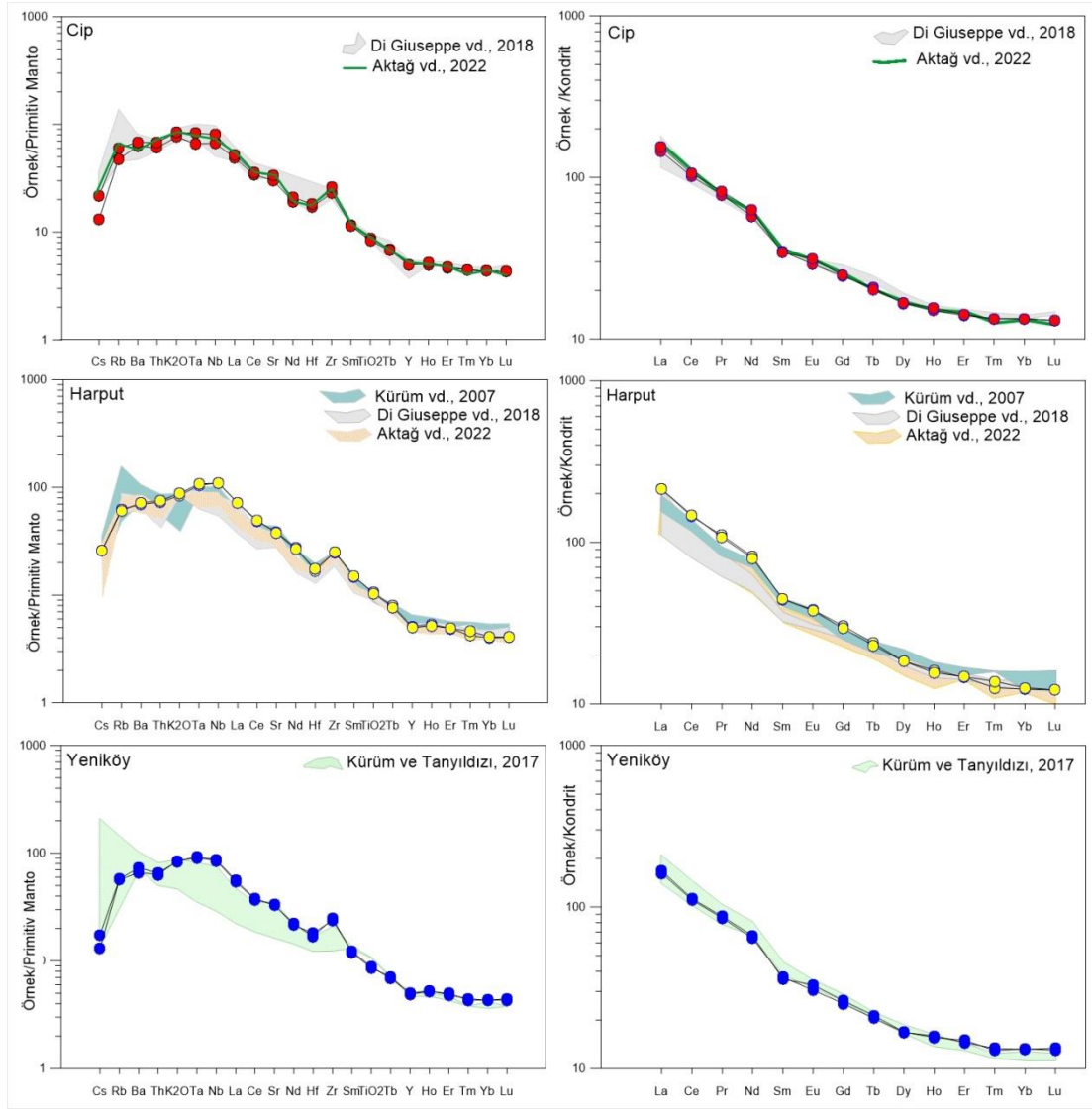
İzotop Jeokimyası

Çalışma bölgesindeki tüm lokasyonlardan alınan 5 örneğin (S2, S8, S15, S18, S20) $^{87}Sr/^{86}Sr$ ve $^{144}Nd/^{143}Nd$ izotop analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Güncel izotop oranlarını yansıtan bu verilerden öncel çalışmalardaki [30], [29] yaş verileri yaklaşık ortalaması olan 1,7 My [66] alınarak yaş düzeltilmesi yapılmış ve kayaların oluşum zamanındaki ilksel izotop oranları hesaplanmıştır.

Çalışma bölgesindeki volkanitlerin $^{87}Sr/^{86}Sr_{(i)}$ 0.7039227-0.7034983 ve $^{143}Nd/^{144}Nd_{(i)}$ değerleri 0.512829-0.512884 arasında olup, birbirine benzer dar bir aralıkta değişim göstermektedir. ϵNd ise 3.76-4.84 ile pozitif değerler arasında değişir. Örneklerin, manto razervuarlarını gösterir Sr - Nd izotop korelasyon diyagramında [67] (Şekil 5), mantoya temsil eden alanda ve PREMA'ya (Yaygın Manto Bileşimi, Prevelant Mantle) [68] yakın konumlandıkları görülmektedir. Sr-Nd izotop korelasyon diyagramındaki dağılım, Elazığ volkanitlerinin mantonun alt kesimlerinden gelen ergiyiklerin, mantonun daha üst kesimleriyle tepkimesinin bir sonucu olarak iz element zenginleşmesini ifade eder. Oluşan kayaların BIYE içeriklerine de yansıyan bu olay manto metasomatizması olarak tanımlanmaktadır [69]. Elazığ volkanitlerinin düşük $^{87}Sr/^{86}Sr_{(i)}$ ve pozitif ϵNd değerlerine sahip olması, bu kayaların tüketilmiş bir manto kaynağından ve homojen bir kaynaktan oluştuğunu göstermektedir.

Tartışma

Kaynak özellikleri-zenginleşme/kabuksal kirlenme süreçleri



Şekil 4. Elazığ volkanitlerinin ilksel manto ve kondrite göre normalize edilmiş element dağılım diyagramları (normalize değerler [70]'den alınmıştır).

Mantodan türeyen ergiyiklerin özelliklerinden manto kaynağının doğasının belirlenmesinde yararlanır. Manto ile normalleştirilmiş çoklu element diyagramındaki element davranışları, kaynağın temel özelliklerine ilişkin verilere işaret etmesi açısından önemlidir. Bu amaçla, farklı lokasyonlardaki Elazığ volkanitlerine ait verilerden hazırlanmış çoklu element diyagramlarının, element dağılımlarının birbirlerine benzer olması, volkanik kayaların benzer bir kaynaktan oluştuklarını göstermektedir (Şekil 3). Örneklerdeki benzer davranış Kondrite normalize edilen diyagramlarda da görülmektedir (Şekil 4). Ayrıca yine tüm örneklerde yüksek BİYE, YÇAE ve HNTE değerlerine karşın daha düşük ANTE zenginleşmeleri ortak özelliklerden birisidir. Tüm jeokimyasal veriler bu alkali magmaların farklı olmayan manto kaynağından türetildiğini işaret etmektedir (Şekil 3-7). Bu durum bazı iz element oranlarının manto kaynağını işaret etmesi ile de açıklanmaktadır. Örneğin La/Nb oranlarının genelde 1'den büyük olması magma oluşumu değerler sergilediğinden kaynak kirlenmesine işaret etmektedir.

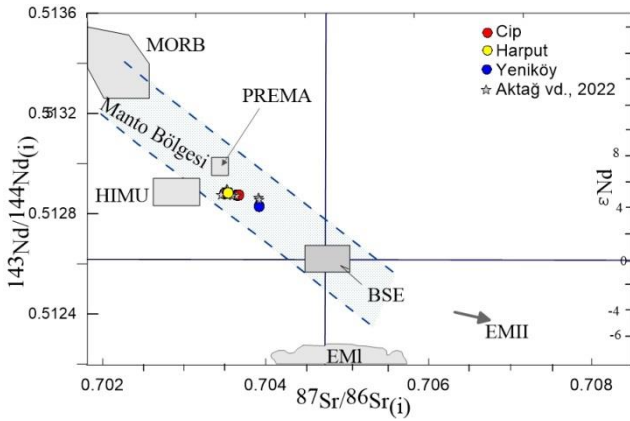
için litosferik manto kaynağını işaret ederken bu oranın yaklaşık 0.7 seviyesinde olması astenosferik manto kaynağını işaret eder [72]. Buna göre Elazığ volkanitlerinin La/Nb oranının 0.63-0.72 aralığında değişmesi (Tablo 2), bu volkanik kayaları oluşturan magmanın litosfere göre daha derinlerden gelen magma/astenosfer kaynaklı mantodan oluştuğuna işaret edebilir.

Manto kaynak alanının özellikleri ile kabuksal kirlenme veya yitim etkisinin izlenebildiği Th/Y - Nb/Y oranları arasındaki değişim ve buna bağlı oluşturulan diyagramda [73]-[74], çalışma konusu volkanik kayalar manto kaynak alanında bulunmaktadır (Şekil 6a). Diyagramda, tüm örnekleri birlikte düşündüğümüzde, kayalarda izlenen Th/Y artışı ile yitim zenginleşmesi ve bununla beraber, artan Nb/Y ile doğru orantılı Th/Y oranı, kabuksal bileşen ile kirlenme, dolayısıyla asimilasyon etkisini işaret etmektedir [75]. Örneklerin dağılımları manto kaynak bölgesi içinde ve Th/Nb=0.1 doğrusu üzerinde veya yakın

Tablo 3. Elazığ volkanitlerine ait kayaçların Rb-Sr ve Sm-Nd izotop analiz verileri.

Örnek no	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Rb	Sr	Rb/Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$	TD(M)
S2	0,703926	30,1	631,4	0,0476718	0,13801	0,7039227	0,51
S8	0,703648	38,0	704,0	0,0539773	0,1562642	0,7036442	0,44
S15	0,703545	39,7	814,6	0,0487356	0,1410895	0,7035416	0,43
S18	0,703502	36,6	695,4	0,0526316	0,1523684	0,7034983	0,43
S20	0,703672	36,1	701,5	0,0514612	0,14898	0,7036684	0,44
Örnek no	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Nd	Sm	Sm/Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$	ϵNd (T)
S2	0,51283	26,3	5,17	0,1965779	0,1189	0,512829	3,76
S8	0,512876	28,7	5,08	0,1770035	0,1070694	0,512875	4,66
S15	0,512885	37,4	6,56	0,1754011	0,1061001	0,512884	4,84
S18	0,512882	30,3	5,31	0,1752475	0,1060072	0,512881	4,78
S20	0,512877	29,3	5,45	0,1860068	0,1125155	0,512876	4,68

TD(M): (Model yaş hesaplaması [71]'den



Şekil 5. Elazığ volkanitlerinin $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ diyagramındaki dağılımları [67] (BSE: Toplam Yerküre, MORB: Okyanus Ortası Sırt Bazaltları, EMI- EMII: Zenginleşmiş Manto, HIMU: yüksek μ değerine ($\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ oranı) sahip manto, PREMA: Yaygın Manto bileşimi).

Çalışma konusu volkanik kayaçların İksel Mantoya normalize edilmiş çoklu element diyagramlarında Nb, Ta ve Ti elementlerinde negatif dağılım gözlenmemesi, bu magmatizmanın oluşumunda yitim etkisinin çok önemli olmadığını işaret etmektedir. Benzer olarak La/Nb oranının düşük olmasının astenosferik magmayla beraber kıta içi zenginleşmeyi, aksi durumunda ise yitim zenginleşmesinin işareti olarak kabul edildiği bilinmektedir [72], [76]. Buna göre çalışma konusu volkanitlerin La/Nb oranlarının düşük olması (0.63-0.72) astenosferik kaynakla beraber levha içi magmatizmanın da etkili olduğuna işaret etmektedir. Benzer durum, astenosferden türeyen magmaları işaret eden

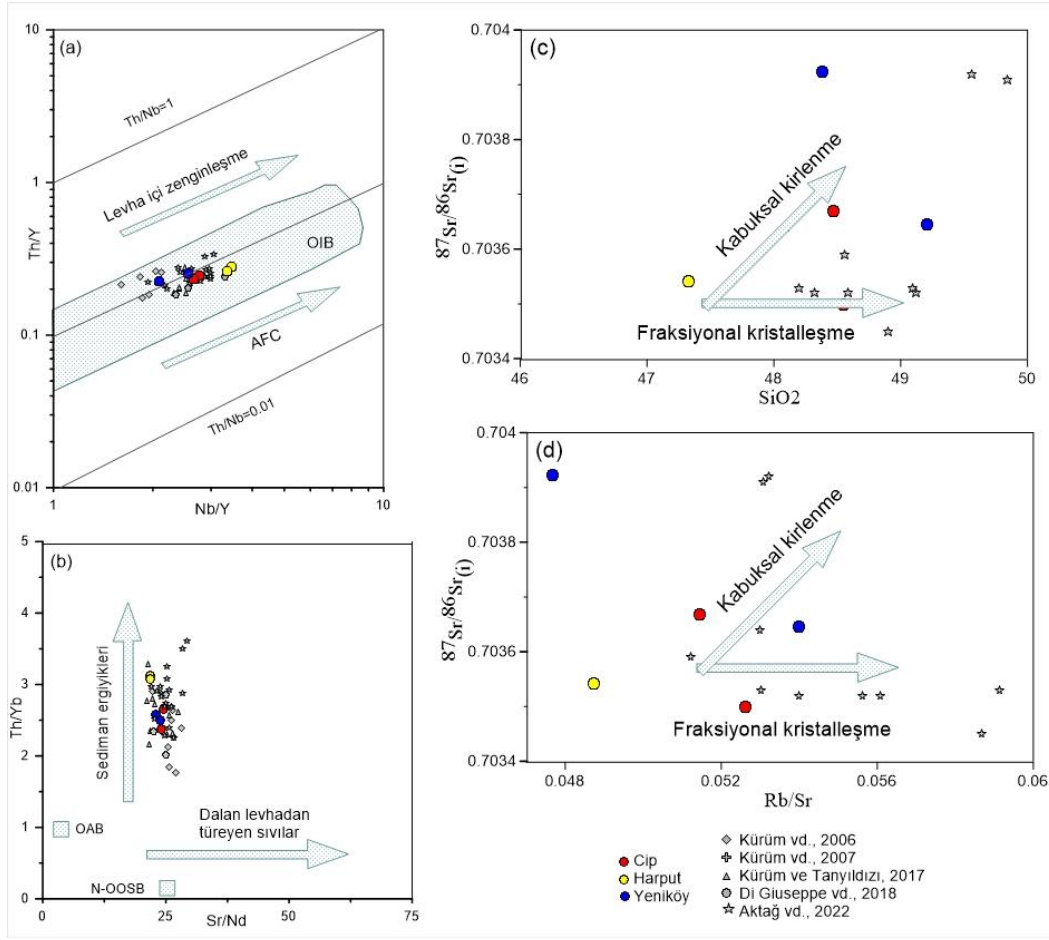
yaklaşık 10 civarında olması beklenen La/Ta oranının, Elazığ volkanitlerinde 10.35-12.74 aralığında değişmesi (Tablo 2) ile de desteklenmektedir [77].

Volkanitlerin kaynak zenginleşmesine katkı sağlayan ürünlerin belirlenmesinde önemli olan Sr/Nd- Th/Yb oranlarından oluşturulan diyagramda (Şekil 6b), örneklerin genellikle düşük Sr/Nd oranlarına karşın, yüksek Th/Yb oranına sahip olduğu görülür. Bu sonuçlar, çalışma konusu volkanitleri oluşturan ve astenosfer kaynaklı manto kaynağından türeyen ergiyiklerin, sediman ergiyikleriyle zenginleşmiş litosferik mantonun birlikte metasomatize edilmiş olabileceğini gösterir. Çalışma konusu kayaçların bulunduğu Doğu Anadolu Bölgesi gibi sıkışmalı tektonik rejimden genişlemeli tektonik rejime geçişlerde üretilen magmatizmanın petrojenezi üzerindeki kısıtlamaların belirsiz olduğu çünkü çoğu magmatik aktivitenin ya metasomatize olmuş bir fosil mantonun ve/veya daha önceki kalk-alkali kütlelerin kısmi erimesinden oluşmuş olabileceği belirtilmektedir [78]. Genel anlamda yüksek BİYE ve yüksek HNTE/ANTE oranlarının, tipik yay volkanizması ve aktif kıta kenarı magmatizmasını desteklediği [34], [79]-[80], [81]-[82] ve ayrıca BİYE ve HNTE zenginleşmelerinin yitim sürecinin etkisi, kabuksal kirlenme veya kaynak bölgesindeki düşük dereceli kısmi ergimelerle açıklanabileceği belirtilmektedir [34]. Buradan yola çıkarak Elazığ volkanitlerine ait örneklerin BİYE ve HNTE zenginleşmeleri ve yüksek HNTE/ANTE oranları ile tüm bu tanımlamalara uygunluk göstermektedirler.

Yitim tektoniğine bağlı olarak oluşan magmalar artan basınçla birlikte sıcaklığın yükselmesi, litostatik basıncın düşmesi ve ortama uçucu gazların ilavesi ile birlikte, kısmi ergimenin gerçekleşmesi gibi yitim zonlarında oluşan süreçlere bağlı olarak oluşmaktadır. Bu tür ortamlarda oluşacak magmalar dalan okyanus kabuğu, kıtasal litosfer

üzerinde bulunan kıta kabuğu ve manto kamasının kısmi olarak ergimesi sonucu zenginleşmektedir. Kıtasal kabuğun yaklaşık 45 km [25] ile oldukça önemli olduğu Doğu

Anadolu Bölgesi'nde Pleyistosen yaşlı Elazığ volkanitlerinin gelişiminde tüm bu süreçlerin oluşması beklenen sonuçlardır.



Şekil 6. Elazığ volkanitlerine ait örneklerin Sr izotop oranlarının $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - SiO_2 (a) ve Rb/Sr (b) ile olan değişim diyagramları ve örneklerin Sr/Nd - Th/Yb diyagramında dağılımları (c). OAB: Okyanus adası bazaltları ve N-OOSB: okyanus ortası sırtı bazaltları [70].

Fraksiyonel kristalleşme

Magmatik farklılaşma süreçlerinin en önemli etmenlerinden birisi olan fraksiyonel kristalleşme, magmanın genellikle Moho süreksizliği boyunca ya da daha sığ derinliklerde oluşan magma odalarında yeteri kadar birikmesi sonucunda meydana gelir. Magma odasında fraksiyonel kristalleşmenin başlamasıyla birlikte magmatik farklılaşma süreçleri de başlamış olur. Minerallerin kristalleşmeye başlaması ile artık/kalıntı ergiyik, fraksiyonlaşan minerallerin atomik yapısına giren elementlerce tükenmiş olacak ve böylece artık ergiyiklerin kimyasal bileşiminde bir değişiklik/farklılaşma oluşacaktır.

Çalışma konusu volkanik kayaların ana ve bazı iz elementlerin davranışları fraksiyonel kristalleşmeye işaret etmektedir. Örneğin SiO_2 ve MgO arasındaki dağılık yansımeler (Şekil 3), mafik fazların değişken dereceli fraksiyonel kristallenmesini ve olivin ile piroksenin kristallenerek ortamdaki uzaklaştırılmasını gösterir. Benzer şekilde artan silis ile Fe_2O_3 , TiO_2 ve CaO 'ın azalması, Ti

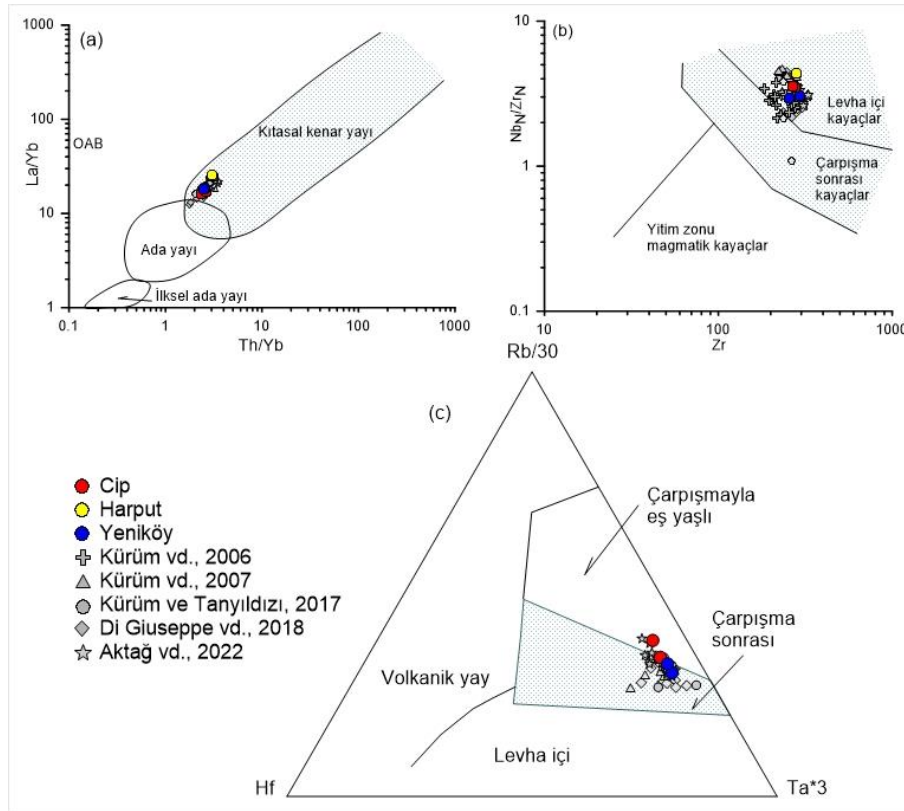
içeren oksitlerle beraber ferromagnezyen minerallerin fraksiyonel kristalleşmesi ile uyumludur. Silikanın artmasıyla P_2O_5 'in azalması, apatitin kristalleşmesinden kaynaklanabilir. Yine değişim diyagramlarında gözlenen element dağılımları (Şekil 3) fraksiyonel kristalleşme ile tek bir ana magma varlığını düşündürdüğü düzgün yösemelerden [83] farklı olarak, kabuksal kirlenmenin de etkili olduğunu göstermektedir [84]. Örneklerin $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 'ye karşı SiO_2 ve Rb/Sr diyagramları da bu sonuçları desteklemektedir (Şekil 6c,d). İlkel bir mantodan oluşan magmada Sr'a göre Rb miktarında azalma oluşurken [85], kabuktan türeyen malzeme, yüksek oranda SiO_2 miktarının yanında, yüksek Rb/Sr içeriğine sahiptir. Buna göre volkanitlerin SiO_2 ve Rb/Sr oranına karşın $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ izotop oranının artması fraksiyonel kristalleşmenin yanında volkanitlerin kabuksal kirlenme sürecinden de etkilendiğini göstermektedir. Kabuksal kirlenmenin çarpışma sonrası volkanitlerden olan Kangal K-alkali kayalarında da gözlenmesi [33] bölge volanitlerinde gözlenen bir özellik olarak kabul edilebilir.

Tektonik ortam

Doğu Anadolu Bölgesi'nin jeodinamik evriminin ve buna bağlı olarak oluşan volkanizmanın, Neotetis'in kapanması ve Arap-Anadolu levhasının çarpışmasını doğuran Avrasya, Afrika ve Arabistan gibi üç ana levhanın göreceli hareketi ile ilgili olduğu tartışmasız kabul edilmektedir [86]. Bu yakınsamanın sonucu olan Bitlis- Zagros Çarpışma Kuşağının erken Miyosen'de (~20 My) geliştiği [13] ve bunun sonucunda bölgedeki ana jeodinamik süreçlerin başladığı belirtilir [10], [14]-[17]. Örneğin, çalışma bölgesinin yakın çevresindeki Mazgirt volkanitlerinin (16.3 ve 15.1 My) Avrasya-Arabistan yakınsaması ile ilgili yay volkanizmasını temsil ettiği belirtilirken, Tunceli bazaltlarının (11.4-11.0 My) Doğu Anadolu'da çarpışma sonrası tektoniğin başlangıcından sonra, Karakoçan (4.1 My) ve Elazığ volkanitlerinin (1.9-

1.6 My) ise Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay sistemlerinin hareketinin başlamasından sonra yerleştiği belirtilir [29].

Bölgedeki magmatizmayı oluşturan jeotektonik olayların farklılığına bağlı olarak, yoğun olarak oluşan magmatizmanın da, orojenik özellikleri belirtecek şekilde kalkalkalinden şošonitiğe değişen bileşenlerde veya basit petrotektonik yapıları uymayan geçiş üyeleri [34]-[38] özelliğinde olduğu kabul edilmektedir. Bu amaçla oluşturulan Th/Yb-La/Yb [87] ve Zr-Nb_N/Zr_N diyagramında örneklerin kıtasal kenar ve çarpışma sonrası kayaçları işaret eden bölgede yoğunlaştıkları görülür (Şekil 7a,b). Örneklerin La-Y-Nb diyagramında da çarpışma sonrası, orojenik olmayan bölgede yoğunlaştıkları görülmektedir (Şekil 7c).



Şekil 7. Çalışılan volkanik kayaçların; (a) Th/Yb-La/ Yb [87], (b) Zr-Nb_N/Zr_N, (c) Hf-Rb/30-Ta*3 Sınıflama Diyagramları [88].

Sonuçlar

Elazığ volkanitlerinin petrolojik özelliklerinin belirlenmesini amaçlayan bu çalışmada, yapılan analizler ile bölgedeki öncel çalışmaların [30], [39], [62]-[64], verileri birlikte değerlendirilmiştir. Elazığ merkez çevresinde yayılım gösteren bu volkanitler (Cip, Harput ve Yeniköy çevresi) coğrafik olarak birbirinden ayrı olsa da litolojik olarak benzer özelliklidirler.

Kayaçların, kimyasal verilere göre belirlenen normatif mineral içerikleri yüksek oranda plajiyoklas, ortoklas, nefelin, diyopsit, olivin ve magnetit şeklinde

değişmektedir. Tüm örneklerde nefelin ve olivinin bulunması bu kayaçların alkali bazik bileşimli olduğunu göstermektedir. Diyagramlarda alkali seriyi işaret eden bu kayaçların, kimyasal bileşimlerine göre potasik trakibazalt, havaiit ve bazanit bileşimli olmaları normatif mineral içerikleriyle de uyumludur.

Volkanitlerin Kondrit değerlerine normalize edilerek hazırlanan çoklu element diyagramlarında, referans örneklerle beraber tüm lokasyonlardaki örneklerin birbirine benzer şekilde, HNTE'lerdeki zenginleşmeye karşın ANTE değerleri bakımından doğrusal olarak giderek fakirleşmesi,

magmanın kısmi ergimeden sonra fraksiyonlanmasını işaret etmekle beraber yüksek HNTE/ANTE oranı, magmanın yitim etkisindeki bir manto kaynağından da etkilenmiş olabileceğini göstermektedir. Fraksiyonel kristalizasyon ile magma karışım etkisi ana element oksitleri ile bazı iz elementlerin SiO₂ ile olan değişimleri gibi element oranları veya elementler arasındaki korelasyonlarda da gözlenmektedir.

Volkanitlerin İlk Manto değerlerine normalize diyagramlarında da çalışma örnekleriyle beraber diğer tüm referans örneklerin birbirine benzer yönseme gösterdikleri ve büyük iyon yarıçaplı elementlerdeki (Rb, Cs, Sr, Ba, K) zenginleşmelere karşın büyük alan yarıçaplı elementlerdeki tüketilmeler, volkanitlerin tüketilmiş manto kaynak bölgesiyle ilişkisini göstermektedir.

Örneklerin ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_(i) (0,7039231-0,7036688) ve ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd_(i) (0,512829-0,512884) izotop analiz verileri ve yüksek εNd (3,76-4,84) değerleri, bu kayaçların ana magma kaynağının üst manto olduğunu göstermektedir. Böylece bazı iz element oranları bakımından manto kökenli OIB benzeri bileşimler vermesi açıklanabilmektedir. Manto kökenli bu volkanizmanın tüm bölge volkanitlerinde olduğu gibi bölgenin kabuk yapısına bağlı olarak kabuksal kirlenmeyle beraber yitim etkisi de göstermektedir.

Sonuç olarak; Elazığ volkanitlerinde yapılan jeokimyasal ve izotop analiz verilerinden elde edilen sonuçlara göre, tüm bu volkanik kayaçların astenosferik manto kökenli ve çarpışma sonrası kalıntı yitim etkisindeki magmatizmaya bağlı olarak meydana gelen alkalin özellikli magmanın, fraksiyonlaşmasıyla beraber üst kıtasal kabuk kirlenmesinden etkilenmiş olduğu görülmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur"

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır"

Yazar katkıları

Makalede adı geçen yazarlar, makalenin planlanması ve hazırlanması sürecinde; arazi çalışması, örneklerin değerlendirilmesi ve hazırlanması, analizlerin yorumlanması ve çizimlerin yapılması vb. gibi her aşamada katkıda bulunmuşlardır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışma için "FÜBAP-MF.19.42" protokol numaralı proje ile destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (FÜBAP) teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] R. Hall, "Ophiolite emplacement and the evolution of the Taurus Suture Zone, Southeast Turkey", *Bulletin of Geological Society of American*, vol.87, pp.1078-1088, 1976.
- [2] M. Berberian, G. King, "Towards a Paleogeography and Tectonic Evolution of Iran",

- Canadian Journal of Earth Sciences*, vol.18, pp.210-265, 1981.
- [3] A.M.C. Şengör, Y. Yılmaz, "Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach", *Tectonophysics*, vol.75, pp.181-241, 1981.
- [4] M. Alavi, "Tektonics of the Zagros orogenic belt of Iran –New data and interpretations", *Tectonophysics*, vol. 229, pp. 211-238, doi: 10.1016/0040-1951(94)90030-2, 1994.
- [5] L. Jolivet, and C. Faccenna, "Mediterranean extension and the Africa –Eurasia collision", *Tectonics*, vol. 19, pp. 1095-1106, 2000.
- [6] P. Agard, J. Omrani, L. Jolivet, and F. Mauthereau, "Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation", *International Journal of Earth Sciences*, vol. 94, pp. 401-419, doi:10.1007/s00531-005-0481-4, 2005.
- [7] M. Allen and H. A. Armstrong, "Arabia-Eurasia collision and the forcing of mid- Cenozoic global cooling. Palaeogeography", *Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 265, pp. 52-58, 2008.
- [8] A.M.C. Şengör, N. Görür and F. Saroğlu, "Strikeslip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in Biddle", K.D., and Christie- Blick, N., eds., "Strike-Slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation", *Societr of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, vol. 17, pp. 227-264, 1985.
- [9] A.M.C. Şengör et al., "Easern Turkish high plateau as a amal Turcic –type orogen:Ç implications for post- collisional crust-forming processes in Turcic-type orogens", *Earth Science Reviews*, vol. 90, pp.1-48, 2008.
- [10] J.F. Dewey et al., "Shortening of continental lithosphere: the neotectonics of eastern Anatolia—a collision zone, in collision tectonics", *Society, Special Publications*, vol. 19, pp. 3–36, 1986.
- [11] Y. Yılmaz, "New evidence and model evolution of the southeast anatolian orogen", *Geological Society of America Bulletin*, vol. 105, pp. 251-271, 1993.
- [12] A.H.F. Robertson et al., "Tectonic evolution of the South Tethyan ocean: evidence from the Eastern Taurus mountains (Elazığ region, SE Turkey), in Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward", Eds. A.C. Ries, R.W.H. Butler, R.H. Graham, *Geological Society of London, Special Publications*, vol. 272, pp. 233-272, 2007.
- [13] A. Okay, M., Zattin, and W. Cavazza, "Apatite fissiontrack data fort he Miocene-Eurasia collision", *Geology*, vol. 38, pp. 35-38, 2010.
- [14] G. Aktaş and A.H.F. Robertson, "Late Cretaceous–Early Tertiary fore-arc tectonics and sedimentation: Maden Complex, SE Turkey", In: M.Y. Savaşçın, A.H., Eronat, (eds.) *Proceedings of the International Earth Sciences Congress on Aegean Regions*, pp. 271-276, 1990.

- [15] T. Taymaz, J. Jackson and D. McKenzie, "Active tectonics of the north and central Aegean Sea", *Geophysical Journal International*, vol. 106, pp. 433–490, 1991.
- [16] Y. Dilek and S. Pavlides, "Post-collisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean and Asia", *Geological Society of America, Special Papers*, pp. 409, 2006.
- [17] C. Faccenna et al., "Slab detachment beneath eastern Anatolia: a possible cause for the formation of the North Anatolian fault", *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 242, pp.85–97, 2006.
- [18] A.M.C. Şengör and W.S.F. Kidd, "Post-collisional tectonics of the Turkish-Iranian plateau and a comparison with Tibet", *Tectonophysics*, vol. 55, pp. 361-376, 1979.
- [19] T. M. Yürür and J. Chorowicz, "Recent volcanism tectonics and plate kinematics near the junction of the African, Arabian and Anatolian Plates in the Eastern Mediterranean", *J. Volcan. Geotherm. Res.*, vol. 85, pp. 1–15, 1998.
- [20] A. H. F. Robertson, "Mesozoic–Cenozoic tectonic-sedimentary evolution of a south Tethyan oceanic basin and its margins in southern Turkey, in Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area", Eds. E. Bozkurt, J.A. Winchester, J.D.A. Piper, *Geological Society, Special Publications*, vol. 173, pp. 97–138, London. 2000.
- [21] A. Robertson, S. J. Boulton et al., "Late Cretaceous–Miocene sedimentary development of the Arabian continental margin in SE Turkey (Adiyaman Region): implications for regional palaeogeography and the closure history of Southern Neotethys", *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 115, pp. 571–616, 2016.
- [22] M. Keskin, "Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from Eastern Anatolia", <http://www.MantlePlumes.org/Anatolia.html>, 2005.
- [23] Y.-C. Lin et al., "Diachronous initiation of postcollisional magmatism in the Arabia-Eurasia collision zone", *Lithos*, vol. 356-357, pp.105394, 2020.
- [24] E. Zor et al., "The crustal structure of the East Anatolian plateau (Turkey) from receiver functions", *Geophysical Research Letters*, vol. 30(24), 8044, doi:10.1029/2003GL018192, 2003.
- [25] E.A. Vanacore, T. Taymaz and E. Saygin, "Moho structure of the anatolian plate from receiver function analysis", *Geophys. J. Int.*, vol. 193, pp. 329-337. 2013.
- [26] A. Al-Lazki et al., "Tomographic Pn velocity and anisotropy structure beneath the Anatolian plateau (eastern Turkey) and the surrounding regions", *Geophysical Research Letters*, this section, 2003.
- [27] R. Gök et al., "Sn Attenuation in the Anatolian and Iranian Plateaus and Surrounding Regions", *Geophysical Research Letters*, this section, 2003.
- [28] D.A., Angus, D.C., Wilson, E., Sandvol, J.F., Ni, "Lithospheric structure of the Arabian and Eurasian collision zone in eastern Turkey from S-wave receiver functions", *Geophys. J. Int.*, vol. 166, pp. 1335–1346, 2006.
- [29] S. Agostini et al., "Neogene volcanism in Elazığ-Tunceli area (eastern Anatolia): geochronological and petrological constraints", *Italian Journal of Geosciences*, vol. 138, pp. 435-455, 2019.
- [30] P. Di Giuseppe et al., "Transition from compression to strike-slip tectonics revealed by Miocene-Pleistocene volcanism west of the Karliova Triple Junction (East Anatolia)", *Journal of Petrology*, vol. 58 (10), pp. 2055-2087, 2018.
- [31] A. Koçyiğit, A. Yılmaz, S. Adamia, S. "Kuloshvili, Neotectonics of East Anatolian plateau (Turkey) and lesser caucasus: implication for transition from thrusting to strike-slip faulting", *Geodinamica Acta*, vol.14, pp. 177-195, 2001.
- [32] İ. Kuşçu et al., "Magmatism in the southeastern Anatolian orogenic belt: transition from arc to postcollisional setting in an evolving orogen", In: M. Sosson, N. Kaymakçı, R.A. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenco, (Eds.), "Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform", *Geological Society Special Publications, London*, pp. 437-460, 2010.
- [33] P. Di Giuseppe et al., "From subduction to strike slip-related volcanism: insights from Sr, Nd, and Pb isotopes and geochronology of lavas from Sivas-Malatya region, Central Eastern Anatolia", *Int. J. Earth Sci.*, vol.110, pp. 849–874, 2021.
- [34] J.A. Pearce et al., "Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 44, pp. 189–229, 1990.
- [35] K. Notsu et al., "Geochemical features of collision-related volcanic rocks in central and eastern Anatolia, Turkey", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 64, pp. 171-192, 1995.
- [36] E. Buket and A. Temel, "Major-element, trace-element, and Sr-Nd isotopic geochemistry and genesis of Varto Muş volcanic rocks, Eastern Turkey", *Jour. of Volcanology and Geothermal Res.*, vol. 85, pp.405-422, 1998.
- [37] Y. Özdemir, Ö. Karaoğlu, A.Ü. Tolluoğlu, N. Güleç, "Volcanostratigraphy and petrogenesis of the Nemrut stratovolcano (East Anatolia Hight plateau): The most recent post-collisional volcanism in Turkey" *Chemical Geology*, vol.226, pp.189-211, 2006.
- [38] Y. Özdemir and N. Güleç, "Geological and Geochemical evolution of Süphan Stratovolcano Eastern Anatolia, Turkey: Evidence for the lithosphereasthenosphere interaction on post collisional volcanism on post collisional volcanism" *Journal of Petrology*, vol.55, pp. 37-62, 2014.

- [39] A. Aktağ, K. Sayit, B.J. Peters, T.Furman, J. Rickli, "Trace element and Sr-Nd-Hf-Pb isotopic constraints on the composition and evolution of eastern Anatolian sub-lithospheric mantle", *Lithos*, vol.430-431, pp. 106849, 2022.
- [40] Y. Yılmaz, Y. Güner, F. Şaroğlu, "Geology of the Quaternary volcanic centres of the East Anatolia", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 85, pp. 173-210, 1998.
- [41] P.A. Şen, A. Temel, A. Gourgaud, "Petrogenetic modeling of Quaternary post-collisional volcanism: a case study of central and eastern Anatolia", *Geological Magazine*, vol. 141, pp. 81-98, 2004.
- [42] M. Keskin, "Eastern Anatolia: a hot spot collision zone without a mantle plume", In: G.R. Foulger and D. Jurdy, (eds) "Plates, plumes and planetary processes", *Geological Society of America, Special papers*, vol. 430, pp. 693-722, 2007.
- [43] M. Lustrino and M. Wilson, "The Circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic Igneous Province", *Earth-Science Reviews*, vol. 81, pp. 1-65, 2007.
- [44] S. Agostini et al., "Recent studies on Central and Eastern Anatolia Volcanism", In: S. Agostini, P. Manetti, and M. Lustrino (eds), "The contribution of Italian Scientists to the Geology of the Turkey", *Acta Vulcanol.*, vol. 26-27, pp. 37-50, 2016.
- [45] M. Keskin, "Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: An alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey", *Geophysical Research Letters*, vol. 30(24), pp. 1-4, 2003.
- [46] M. Keskin, J. A. Pearce and J. G. Mitchell, "Volcanostratigraphy and geochemistry of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars plateau, North Eastern Turkey", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 85, pp. 355-404, 1998.
- [47] A. Kaygusuz, "K/Ar ages and geochemistry of the collision related volcanic rocks in the Ilca (Erzurum) area, eastern Turkey", *Neues Jahrbuch Für Mineralogie*, vol. 186(1), pp. 21-36, 2009.
- [48] V.A. Lebedev, E.V. Sharkov, M. Keskin, V. Oyan, "Geochronology of the Late Cenozoic volcanism in the area of Van Lake (Turkey): an example of the developmental Dynamics for magmatic processes", *Doklady Earth Sciences*, vol. 433, pp. 1031-1037, 2010.
- [49] S. Kürüm, M. Altunbey, "Şavak – Ayazpınar (Pertek / Tunceli) köyleri arasındaki magmatik kayaların petrografik ve jeokimyasal özellikler", *Yerbilimleri/Geosound*, vol. 39, pp. 85-108, 2001.
- [50] S. Kürüm et al., "40Ar/39Ar age and geochemistry of the post-collisional Miocene Yamadağ volcanics in the Arapkir area (Malatya Province), eastern Anatolia, Turkey", *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 33, 3-4, pp. 229-251, 2008.
- [51] A. Seyrek et al., "Late Cenozoic uplift of the Amanos Mountains and incision of the Middle Ceyhan river, southern Turkey: Ar-Ar dating of the Duzici basalt", *Geomorphology*, vol.97(3-4), pp. 321-355. 2008.
- [52] V. Trifonov et al., "The Lower Pleistocene in THE Euphrates Valley of Eastern Turkey and inhabitation of earliest hominine in the Caucasus region", *XIX INQUA Congress Quaternary Perspectives on Climate Changes, Natural Hazards and Civilization*, Poster Presentation, Nagoya, Japan, 2015.
- [53] A. Kaya, "Keban (Elazığ) civarındaki metamorfizelerin yapısal analizine tektonik evrimi", Doktora Tezi. F.Ü. Fen Bil. Enst., 2001.
- [54] B. Akgül, "Piran köyü (Keban) çevresindeki magmatik kayaların petrografik ve petrolojik özellikleri", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 125s. (yayımlanmamış) 1993.
- [55] E. Aksoy, "Elazığ batı ve güneyinin genel jeolojik özellikleri", *Tübitak Doğa Türk Yerbilimleri Dergisi*, vol.2, pp.113-123, 1993.
- [56] S. Köksal, "The Upper Cretaceous intrusive rocks with extensive crustal contribution in Hacımahmutuşağı Area (Aksaray/Turkey)", *Geologica Carpathica*, vol. 70, pp. 261-276, 2019.
- [57] A. Okay, O. Tüysüz, "Tethyan sutures of northern Turkey", *Geological Society of London. Special Publications*, vol.156(1), pp. 475-515, 1999.
- [58] MTA, "1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası", *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Ankara. 2002.
- [59] S. Kürüm, S. Aydemir, İ. Yıldırım, "Cip, Harput, Yeniköy Çevresindeki Elazığ Volkanitlerinin Saha, Petrografik ve Mineral Kimyası Özellikleri, Elazığ", *Fırat Ün. Mühendislik Bilimleri Derg.*, (İncelemede).
- [60] W.F. McDonough and S.-S. Sun, "Composition of the Earth", *Chemical Geology*, vol.120, pp.223-253. 1995.
- [61] M.J. Le Bas, R. W. Lemaitre, A. Streckeisen, and B. Zanettin, "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram", *Journal of Petrology*, vol. 27, pp. 745-750, 1986.
- [62] S. Kürüm, B. Akgül, E. Erdem, "Examples of Neogene volcanism in eastern Turkey: Comparative petrographic, geochemical and petrologic features of Malatya-Elazığ-Tunceli volcanics", *Journal of Geological Society of India*, vol.68, pp. 129-136, 2006.
- [63] S. Kürüm, E. Özbulut, M. Ural, "Polijenetik bir volkanizma ve petrografik-jeokimyasal özellikleri: Harput (Elazığ) Karataş tepe volkanizması", *Yerbilimleri/Geosound*, vol. 50-51, pp. 47-64, 2007.
- [64] S. Kürüm, Ö. Tanyıldızı, "Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Upper Cretaceous (calc-alkaline) and Miocene (alkaline) volcanic rocks: Elazığ, Eastern Taurides, Turkey", *Journal*

- of African Earth Sciences, vol. 134, pp. 332-344, 2017.
- [65] T.N. Irvine and W.R.A. Baragar, "A guide to the chemical classification of common volcanic rocks", *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 8, pp. 523-548, 1971.
- [66] G. Faure and T.M. Mensing, "Isotopes: Principles and Applications", 3rd ed. John Wiley and Sons, USA, pp.897, 2005.
- [67] A. Zindler and S. Hart, "Chemical Geodynamics", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol.14, pp. 493-571, 1986.
- [68] H. Rollinson, "Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation", New York: John Wiley & Sons, pp.352, 1993.
- [69] N. Güleç, "Magmatik kayaçların izotop jeokimyası", D. Boztuğ, N. Otlu, (ed.), "Magmatik petrojenez", Tübitak Lisansüstü Yaz Okulu, Haziran, Akçakoca-Düzce, pp.343-381, 2001.
- [70] S.S. Sun, W. F. McDonough, "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in Magmatism in the Ocean Basins", A.D. Saunders, M.J. Norry, (eds.), "Geological Society of London", *Special Publications*, vol.42, pp.313-347, 1989.
- [71] T.C. Liew, A.W. Hofmann, "Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian Fold Belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr isotopic study", *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol.98, pp.129-138, 1988.
- [72] D.J. De Paolo and E.E. Daley, "Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension", *Chemical Geology*, vol.169, pp.157-185, 2000.
- [73] J.A. Pearce, "Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries", In: R.S. Thorps, (ed.), *Andesites*. Wiley, Chichester, pp.525-548, 1982.
- [74] J.A. Pearce, D.W. Peate, "Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas", *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol.23, pp.251-285, 1995.
- [75] N. Güleç, "Crust-mantle interaction in western Turkey: implications from Sr and Nd isotope geochemistry of Tertiary and Quaternary volcanics", *Geol. Mag.*, vol.128(5), pp.417-435, 1991.
- [76] Y. Huang, C. Hawkesworth, I. Smith, P. Calsteren, P. Black, "Geochemistry of late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel, New Zealand: implications for mantle enrichment processes", *Chemical Geology*, vol.164, pp.219-238, 2000.
- [77] R.N. Thompson, M.A. Morrison, "Asthenospheric and lower lithospheric mantle contributionsto continental extensional magmatism: an example from the British Tertiary Province", *Chemical Geology*, vol. 68, pp.1-15, 1988.
- [78] H. Azizi, N. Daneshvar, A. Mohammadi et al., "Early Miocene post-collision andesite in the Takab area, northwest Iran", *Journal of Petrology*, pp.1-19, 2021.
- [79] J.G. Fitton, D. James, P.D. Kempton, D.S. Ormerod, W.P. Leeman, "The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the Western United States", *Journal of Petrology, Special Issue*, pp.331-349, 1988.
- [80] M. Wilson, "Igneous Petrogenesis", Oxford University Press., pp.466, 1989.
- [81] M.T. McCulloch, J.A. Gamble, "Geochemical and geodynamic constraints on subduction zone magmatism", *Earth and Planetary Science Letters*, vol.102, pp.358-374, 1991.
- [82] R. Kerrich, D.A. Wyman, "The trace element systematics of igneous rocks in mineral exploration: an overview, Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks", D.A. Wyman, (ed.), "Applications for Massive Sulfide Exploration", Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12, 1996.
- [83] A. Peccerillo, L. Dallai, M.L. Frezzotti, P.D. Kempton, "Sr-Nd-Pb-O isotopic evidence for decreasing crustal contamination with ongoing magma evolution at Alicudi volcano (Aeolian arc, Italy): implications for style of magma-crust interaction and for mantle source compositions", *Lithos*, vol.78, pp.217-233, 2004.
- [84] S.P. Verma, "Geochemistry of evolved magmas and their relationship to subduction-unrelated mafic volcanism at the volcanic front of the central Mexican Volcanic Belt", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 93, pp.151-171, 1999.
- [85] G. Faure, "Principles of isotope geology", John Wiley and Sons, Canada, pp.589, 1986.
- [86] Y. Dilek, E. Sandvol, "Seismic structure, crustal architecture and tectonicof the Anatolian-African Plate Boundary and the Cenozoic Orogenic Belts in the Eastern evolution Mediterranean Region", *Geological Society of London Special Publications*, vol.327, pp.127-160, 2009.
- [87] K.C. Condie, "Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic Tavşan adalarındaki (KB Anadolu) Tersiyer Volkanizmasının özellikleri", *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, vol.117, pp.55-86, 1989.
- [88] N.B.W. Harris, J.A. Pearce, A.G. Tindle, "Geochemical characteristics of collision-zone magmatism", In M.P. Coward, A.C. Reis, (eds.), "CollisionTectonics", *Spec. Publ. Geol. Soc.*, vol.19, pp.67-81, 1986.



Research Article

Preparation and Performance Comparison of Autoclaved Aerated Concrete by Using Ceramic and Glass Wastes Instead of Silica

Nilgün KIZILKAYA¹, Didem EREN SARICI^{2*}

¹Malatya Turgut Ozal University, Mining and Mining Extraction Department, nilgun.kizilkaya@ozal.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4931-5807

²Inönü University, Mining Engineering Department, didem.sarici@inonu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2639-5226

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 January 2024
Received in revised form 26
February 2024
Accepted 04 March 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Glass waste, ceramic waste,
autoclaved aerated concrete,
lightweight concrete,

ABSTRACT

This study aimed to produce autoclaved aerated concrete (AAC) by using glass and ceramic waste in 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% proportions as a substitute material for quartzite, and samples were produced under low pressure and heat (2.3 bar and 135 °C). The microstructural properties were investigated by employing scanning electron microscopy (SEM) analysis. Unit weight, porosity, water absorption, ultrasonic wave velocity, compressive strength, and thermal conductivity parameters were experimentally investigated and compared to a control sample produced without waste. Test results showed that waste addition leads to decreasing porosity, water absorption, and increasing unit weight. Additionally, uniaxial compressive strength, thermal conductivity, and ultrasonic wave velocity values were increased by adding waste. The test results showed that glass and ceramic waste can be used as a quartzite sand replacement in the production of AAC and the optimum replacement proportions for the waste materials was 10%.

Doi: 10.24012/dumf.1422548

* Corresponding author

Introduction

Today, the preservation and effective use of raw material resources have become increasingly important [1]. Every year, thousands of tons of waste are collected separately from urban areas all over the World for the recovery of resources [2]. The use of waste materials from recycling has some advantages, such as low cost and energy consumption, preserving natural resources, and sustainability [3]. Glass, ceramic, and municipal solid waste are serious environmental problems because of their non-biodegradable nature [4]. Although glass waste can be recycled repeatedly – the process does not affect quality – large volumes of glass are ending up in the landfill. Ceramics are products made of clay, feldspar, and quartz. Ceramic processes include mixing, molding, drying, and firing. Ceramics are hard, and brittle and can be used glazed or unglazed after firing. Their compressive strength is high while tensile strength is low and highly durable, and ceramic wastes are chemically and physically harsh to the environment [5]. The Association of Halian Manufacturers of Machinery and Equipment in the ceramic industry (ACIMAC) has acknowledged that the different kinds of ceramic tile production worldwide was around 13.7 billion m² in

2018 [6]. A huge amount of ceramic waste arises from both manufacturing and application [7] There have been a lot of studies evaluating ceramic waste in concrete aggregate and the cement production process. There are some studies in the published literature about the use of waste glass powder as a filler and aggregate material for concrete and asphalt. Additionally, reusing ceramic waste in concrete and other construction materials can lead to energy conservation and cost-effective construction.

Studies on the production of new building materials with high energy efficiency are increasing. Autoclaved aerated concrete (AAC) is a lightweight and highly porous material with good thermal insulation, low density, excellent sound insulation, and fire resistance. For these reasons, it has been widely used in building materials [8]. AAC is obtained by adding the aluminum powder to a mixture of sand, cement, lime, gypsum, and water. The material, which gains a porous structure by swelling, is cut into millimeter dimensions and cured in an autoclave under temperatures over 180 °C and high-pressure conditions. Aluminum reacts with calcium hydroxide or alkalis, which creates hydrogen gas and forms bubbles [5,9] Hence, it makes the mixture expand to about twice its volume, resulting in a highly porous structure. AAC has good thermal insulation

due to this porous structure [10-13]. The production process of AAC started with the patents obtained in the early 1900s. Among them, YTONG was established in 1924, and today with this license, AAC production is carried out in many countries in Asia and Europe. According to 2018 data from the Turkish Statistical Institute, there are 14 AAC production facilities in Turkey [14-15].

AAC manufacturers use basic raw materials like portland cement, lime, gypsum, silica, and aluminum powder. AAC production is also included in the evaluation of wastes formed as a result of industrial activities. Therefore the possibilities of using agricultural and industrial wastes in AAC production have been investigated. In the published literature, there are some studies on the determination of the usability of industrial wastes in AAC production. Özenç and Sariözen [16] investigated the compressive strength and shrinkage caused by adding perlite instead of quartz in AAC production. Walzac et al. [17] produced AAC consisting of lime, gypsum, and fly ash without cement. Evgenia [18] produced AAC using fly ash and bitumen and determined that the moisture content decreased with the amount of waste. Araujo and Tenerio [19] evaluated the properties of AAC made with waste aluminum and stated that the use of waste aluminum was appropriate. Huang et al. [20] used copper ore waste and blast furnace slag instead of lime in aerated concrete and stated that it was suitable. Holt and Raivia [21] investigated the usability of fly ash residue in AAC production and stated that it was suitable in terms of physico-mechanical properties. Günaydn et al. [22] produced AAC by using marble dust waste and fly ash in their study and examined unit volume weight, ultrasonic wave velocity, compressive strength, and thermal conductivity properties. They determined that fly ash and marble dust waste additive was most appropriate. Rozycka and Pichor [23] investigated the changes in density, compressive strength, and thermal conductivity values by using perlite waste instead of quartz in AAC and stated that perlite waste additive had a positive effect on the formation of tobermorite mineral. Wu et al. [24] used mechanically activated nickel slag in the production of AAC. The effect of the calcium:silicon (C:S) ratio on the microscopic and macroscopic performance of nickel slag-AAC was investigated. They found that increasing the ratio of calcium to silicon (C:S) caused an increase in flexural and compressive strength, but a decrease in dry density. Matsui et al. [25] investigated the effects of the addition of silicon and aluminum on the formation of tobermorite. They showed that the addition of aluminum accelerates the formation of tobermorite and can be used in the production of AAC in raw materials containing lower amounts of silicon. Kunchariyakun et al. [26] observed the formation of calcium-silicate-hydrate (CSH) phases instead of tobermorite by using rice husk in the production of AAC. Haooi and Min [27] used different sizes of waste glass instead of cement in the production of AAC.

Research Significance

Previous research was innovative in replacing the base materials. These innovations were either to improve the AAC properties and performance or reduce the manufacturing cost while maintaining its properties within acceptable ranges [28]. An increase in this research trend is important for the protection of natural resources and the environment. Therefore effective use of glass and ceramic waste is an urgent problem for resource conservation and environmental protection. Also, the use of these waste materials in AAC production delivers not only economic significance, but ecological and social benefits as well. This study aimed to promote the use of ceramic and glass waste for AAC production in place of silica autoclaved at low pressure and additionally to determine the effects on the physical and mechanical properties. Determination of material properties enables the determination of suitable utilization areas by revealing properties such as performance, durability, applicability and reliability. For example, low porosity affects applicability, water absorption and homogeneity. Water absorption value affects the change in aesthetic properties and resistance to freezing and thawing cycles in long-term use on external facades. Low density indicates the lightness of the material and indicates that it is suitable for use in interior partitions and floors with low load-bearing capacity. Compressive strength also determines the use of aerated concrete in building sections with different load-bearing properties. Low thermal conductivity allows maintaining indoor temperature and saving energy. Consequently, this study contributes a methodology to develop new uses for ceramic and glass waste.

Experimental Setup

In this present study, experiments and analyses were carried out in three phases. First, characterization tests of raw materials were performed. X-Ray fluorescence (XRF) and X-Ray diffraction (XRD) analysis were performed to determine the chemical and mineralogical properties of the raw materials. XRF analysis was performed with a Rigaku ZSX Primus II XRF instrument in the Natural Stone Analysis Laboratory of Afyon Kocatepe University, XRD analysis was performed with a RigakuRad-B-D Max II series diffractometer in İnönü University Scientific and Technological Research Center (IBTAM) and Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis was performed in the same center with an LEO Evo-40xVp series device. Particle size distribution of the raw materials was determined with a Malvern Mastersizer × 2000 particle analyzer in the İnönü University Mining Engineering Department. In the second step, autoclaved aerated concrete (AAC) samples were prepared. In the third step, physical and mechanical tests (unit weight, porosity, water absorption, ultrasonic wave velocity, uniaxial compressive strength, and thermal conductivity) were measured for the AAC samples.

Materials

Raw materials

Autoclaved aerated concretes were prepared by using ordinary portland type cement (CEM 42.5 R), hydrated limestone, quartzite, aluminum powder, gypsum, and water. For reduced particle size, crushing and grinding were applied, and then the materials were grouped into a particle size of 150 µm. Aluminum powder was added into the mix with an expanding agent at 99% purity. Gypsum

and lime were commercially available. Quartzite was supplied from the Elazığ Hazarbababa region of Turkey, and commercial cement was supplied by CIMSA.

In this study, flat window glass was preferred for the uniformity of its physical and chemical properties. The waste was prepared by crushing, grinding, and sieving to achieve a 150 µm particle size. The XRF analysis results of wastes were given in Table 1.

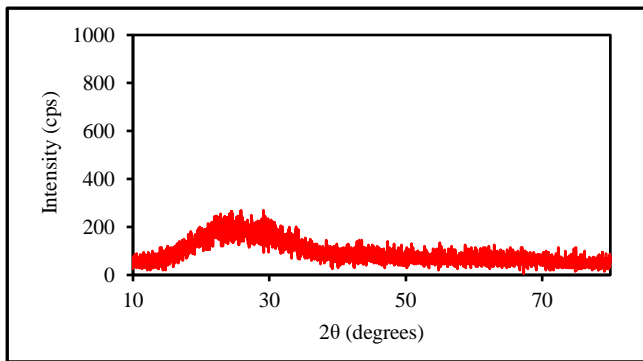
Table 1. XRF analysis results of waste materials

Oxide	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	L.O.I
Quartz	91,20	4,79	0,67	0,18	0,27	0,20	1,71	0,17	0,58
Gypsum	0,63	0,103	0,128	44,21	0,83	0,14	-	46,99	6,49
Lime	0,704	0,249	0,304	69,817	1,13	-	0,124	1,319	26,29
Glass waste	68,492	0,996	0,309	10,371	3,744	13,495	0,9	0,27	1,35
Ceramic waste	54,901	24,90	1,051	13,645	0,367	0,361	0,648	0,952	3,119

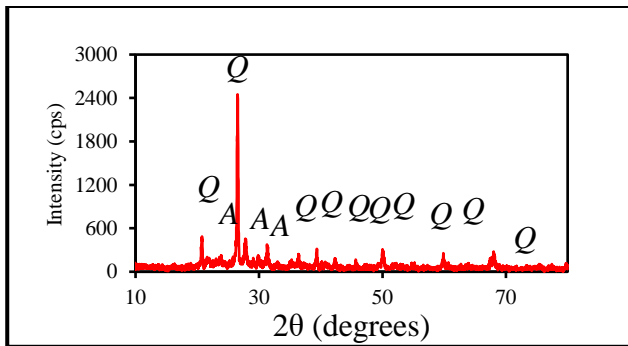
Waste Ceramic

The second waste material was selected from unglazed ceramic products. These wastes were obtained from the It can be observed that SiO₂, CaO, MgO, and K₂O were the main component of glass waste. Ceramic waste has SiO₂, and Al₂O₃, as its main components.

traditional handcrafts application center at İnönü University. XRD diffractograms were given in Figure 1 (a-b), and SEM images were given in Figure 2 (a-b)

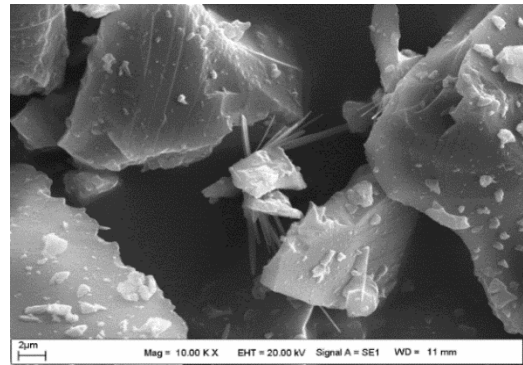


a

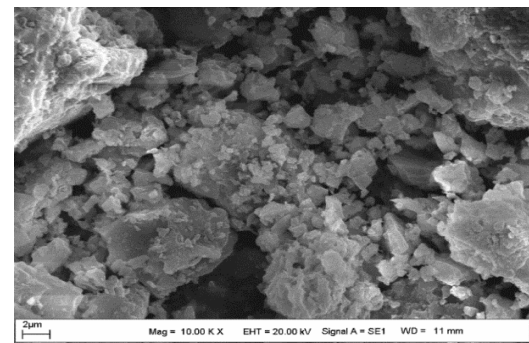


b

Figure 1. X-Ray Diffractogram of waste materials
a: Glass waste, b: Ceramic waste (A: Anorthite, Q: Quartz, C: Calcite).



a



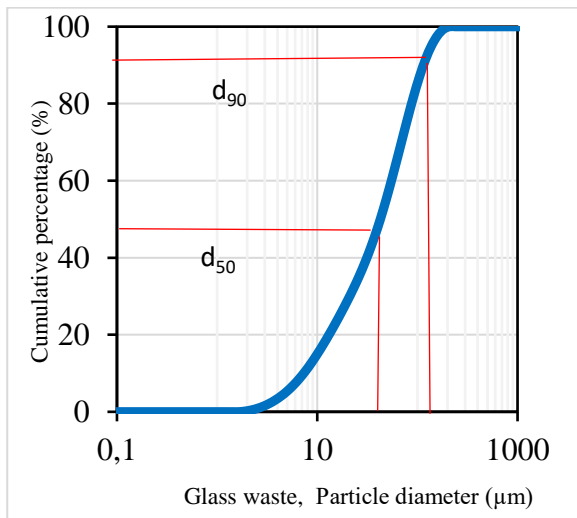
b

Figure 2. SEM images of waste materials a: Glass waste, b: Ceramic waste.

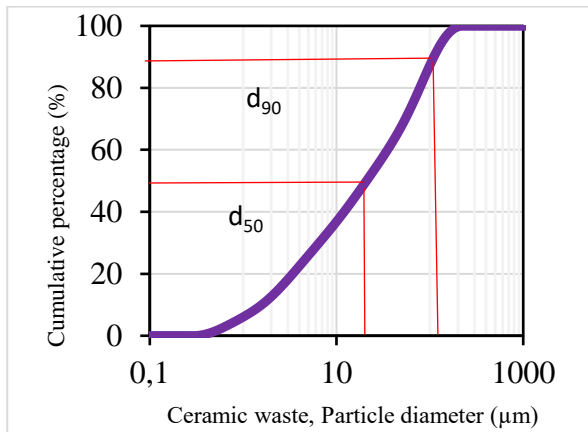
Figure 1. (a-b) demonstrated that quartz is the main component of glass and ceramic wastes. Additionally, calcite is the other component of ceramic waste.

When the SEM images of the waste materials were examined, it was observed that the glass waste had an angular and amorphous structure, while the ceramic waste had a more spherical structure (Fig. 2.a-b).

As can be observed in Figure 3 a to b, both materials were very fine, with ceramic waste d_{50} values (50% passing size) and d_{90} values of about 24 μm and 126.4 μm respectively. The glass waste d_{50} value was 48.9 μm , and the d_{90} value was 131.7 μm . It was acknowledged that the glass waste grains were larger than the ceramic waste grains.



a



b

Figure 3. The cumulative sieve curve of waste materials, a: glass waste, b: ceramic waste

The unit weight of waste materials was determined according to the TS EN 1097-7 standards [29]. The unit weight and specific surface area values were given in Table 2.

Table 2. Unit weight and specific surface area of waste materials.

	Unit weight (g/cm^3)	Specific surface area (cm^2/g)
Glass waste	2,72	1120
Ceramic waste	2,94	3980

When Table 2 is examined, it is seen that ceramic waste is heavier and has more surface area than glass waste.

Preparation of AAC

3.2.1. Materials Dosage

The AAC samples were prepared in different proportions (10, 20, 30, 40, and 50 % by weight) of glass and ceramic waste instead of quartz sand. These combinations were identified as reference, CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 and SA1, SA2, SA3, SA4, SA5, respectively.

In the first stage of the study, the waste-free control sample was produced. The mixing ratios for 1 m^3 AAC samples are given in Table 3.

Table 3. Aerated concrete mixing ratios (1 m³)

Series	Waste ratio %	Quartzite (kg)	Waste (kg)	Cement (kg)	Gypsum (kg)	Lime (kg)	Al powder (kg)	Water/Solid
Control	0	200	0	100	20	40	0,4	0,70
Sample (A)								
CA1-SA1	10	180	20	100	20	40	0,4	0,70
CA2-SA2	20	160	40	100	20	40	0,4	0,70
CA3-SA3	30	140	60	100	20	40	0,4	0,70
CA4-SA4	40	120	80	100	20	40	0,4	0,70
CA5-SA5	50	100	100	100	20	40	0,4	0,70

The solid components of quartz, cement, and gypsum were weighed and mixed with a standard mixer at low speed for 4 minutes, followed by a 2-minute period at medium speed until a homogenous mixture was obtained. Then aluminum powder, lime, and water were added and mixed for 1 minute, after which the mixtures were molded in 100 × 150 × 300 mm molds. The molded materials were kept for 24 hours at 75 °C. Afterwards, before demolding, the expanded parts of the samples were cut off. After removing the samples from the molds, all test specimens were configured to dimensions of 100 × 100 × 100 mm and were

cured in an autoclave at 2.3 bar pressure and 135 °C and 20 hours. These working conditions were determined by comparing the results obtained as a result of preliminary tests. The production steps are given in Figure 4.

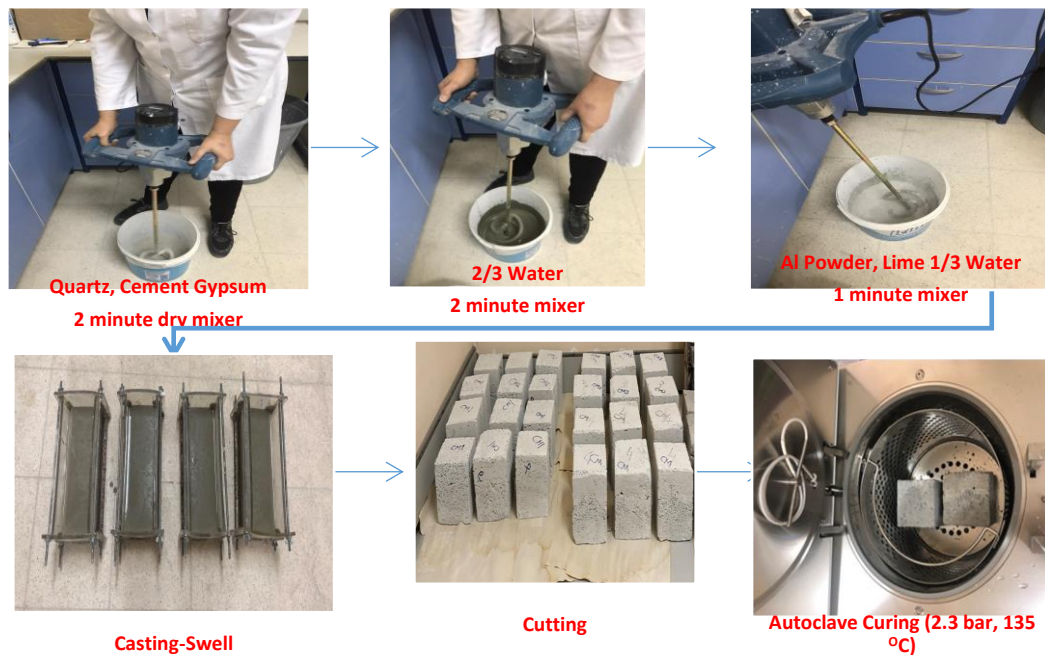


Figure 4. AAC production steps. included: a unit weight test, TS EN 772-13 and TS EN 771-4; a porosity test TS EN 772-4; a water absorption test TS

Test Methods

After autoclaving and curing at 2.3 bar and 135 °C, these specimens were weighed and then moved into an oven and dried at 105 °C for 24 hours. For each AAC mixture prepared, cubic samples were cast to determine water absorption, porosity, water content, ultrasonic wave velocity, and uniaxial compressive strength. Finally, XRD and SEM analyses were carried out on the AAC samples. Laboratory tests were performed according to Technical Specification European Standards (TS EN standards) at the İnönü University Mining Engineering Department. These tests

included: a unit weight test, TS EN 772-13 and TS EN 771-4; a porosity test TS EN 772-4; a water absorption test TS EN 771-4:2011+A1; a uniaxial compressive strength test TS EN 772-1 at an 0.25 MPa/sn pace rate and an ultrasonic wave velocity test TS EN 12504-4. The ultrasonic wave velocity was determined using a Proceq Pundit ultrasonic tester, a uniaxial compressive strength (UCS) test was carried out with a UTEST compressive strength device and a thermal conductivity test was performed with a Lasercomp HFM Fox-314 heat flowmeter at Suleyman Demirel University Natural and Industrial Construction Materials Research

Central (DEYMAN) according to EN 12664 and EN 12667 standards. For these tests, cubic samples of dimensions $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ were prepared [30-36].

Results and Discussion

Results of XRD analysis

To determine the phase changes in the AAC samples XRD analysis was performed. The XRD analysis results of CA and SA samples were given in Figures 5 and 6.

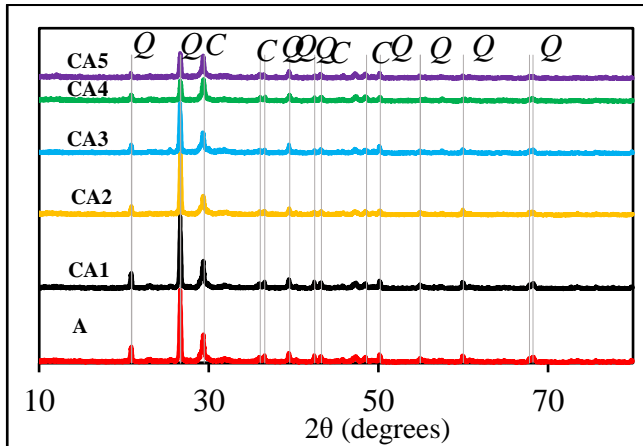


Figure 5. X-Ray diffractograms of AAC with glass waste (Q: Quartz, C: Calcite).

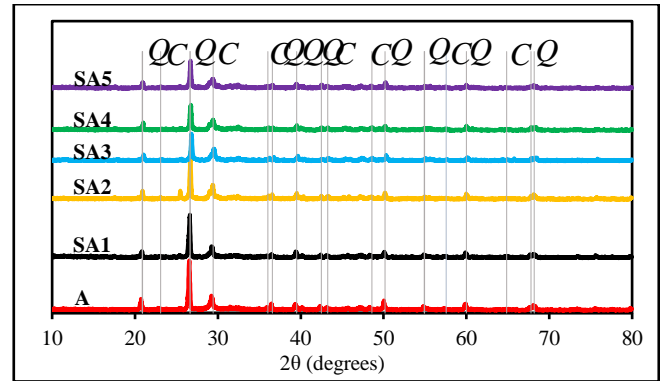


Figure 6. X-Ray diffractograms of AAC with ceramic waste (Q: Quartz, C: Calc)

Figures 5 and 6 show that the main phases in AAC products are quartz and calcite minerals. The strength of the quartz peak is decreased when the proportion of waste is increased in the AAC. This can be explained by the decreasing proportion of silicon dioxide (SiO_2) present. The replacement of glass and ceramic waste with quartz leads to a decreasing proportion of SiO_2 in the AAC.

SEM Studies

The morphology of hydration products and microstructure of AAC samples were investigated by SEM analysis. The material structure of AAC was characterized by its solid microporous matrix and macropores. The macropores, which were generated by hydrogen, and the micropore distributions were very sensitive to the products formed by hydrothermal reaction [5].

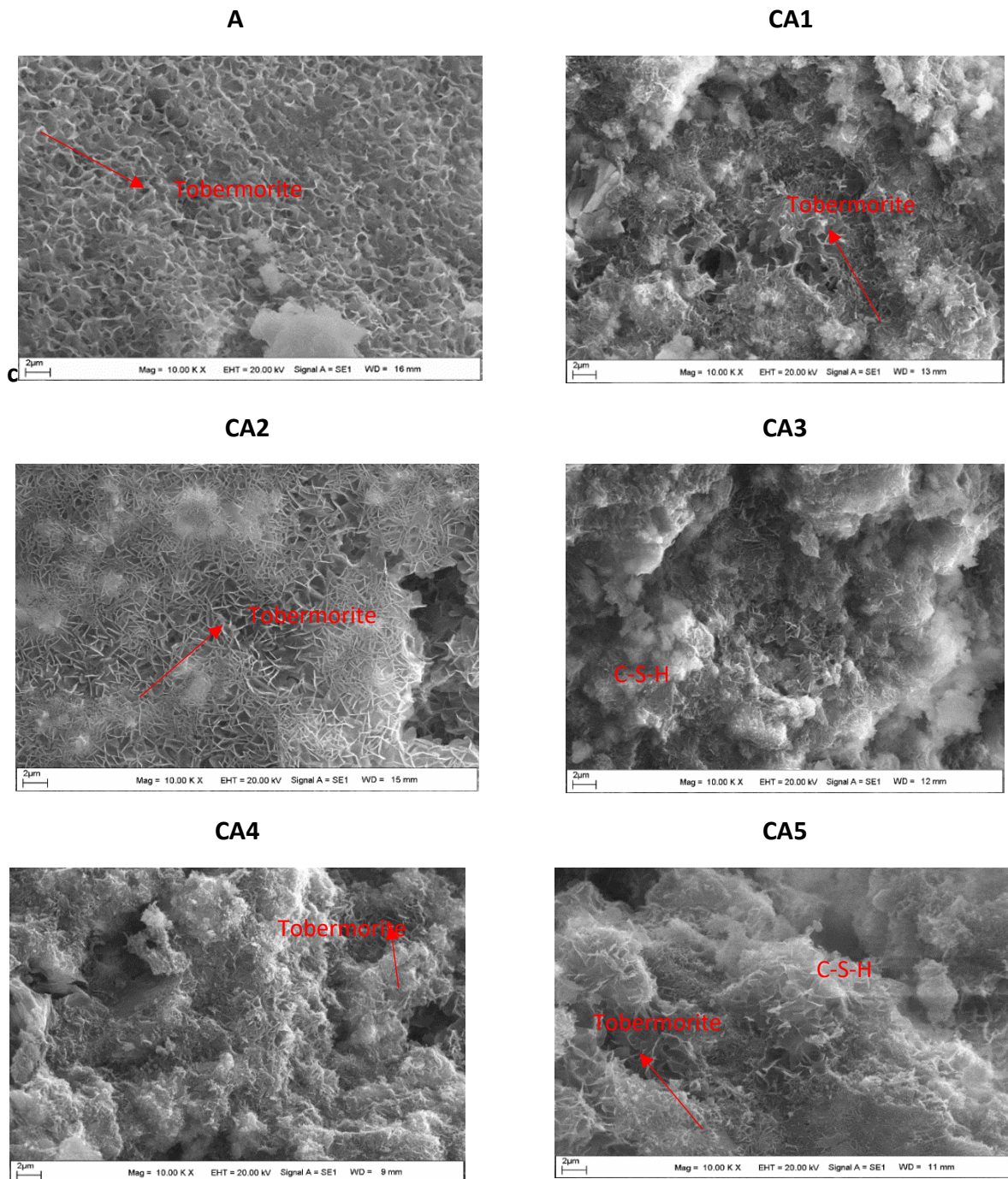


Figure 7. SEM images with glass waste AAC

The SEM images shown in Fig. 7 a to f and Fig 8 a to f show that tobermorite and calcium-silicate-hydrates (CSH) gels were the main hydrates of the glass and ceramic waste AAC samples. Tobermorite crystals were in a more regular form in the CA1 and CA2 samples. The micrographs of the CA1 and CA2 samples showed good agreement with the mechanical and physical test results given in section 4.3. The thin plates of tobermorite crystals observed confirmed the strength increase in the CA1 and CA2 series. The microstructure became less porous than the reference sample. These crystals clustered together and connected to

the CSH forms. An increasing amount of waste led to a decrease in the formation of tobermorite crystals and an increase in the formation of CSH. Furthermore, the shape of the tobermorite varied with the glass-waste ratio in the AAC samples. For the CA1, CA2, and SA5 samples (whose glass waste ratios were 10% and 20%, and where the ceramic waste ratio was 50%, respectively), Figure 7 (F-b, 7c-9, and Figure 8-f) showed a narrow slatted tobermorite shape, whereas in other samples the tobermorite appeared as an irregular form that would likely

explain the low compressive strength of the AAC specimen compared to the reference sample. Increasing the amount of waste led to increased unreacted particles. In the published literature, it has been reported that an interconnected and porous microstructure resulted in high compressive strength, good thermal isolation, and heat protection performance in AAC [9].

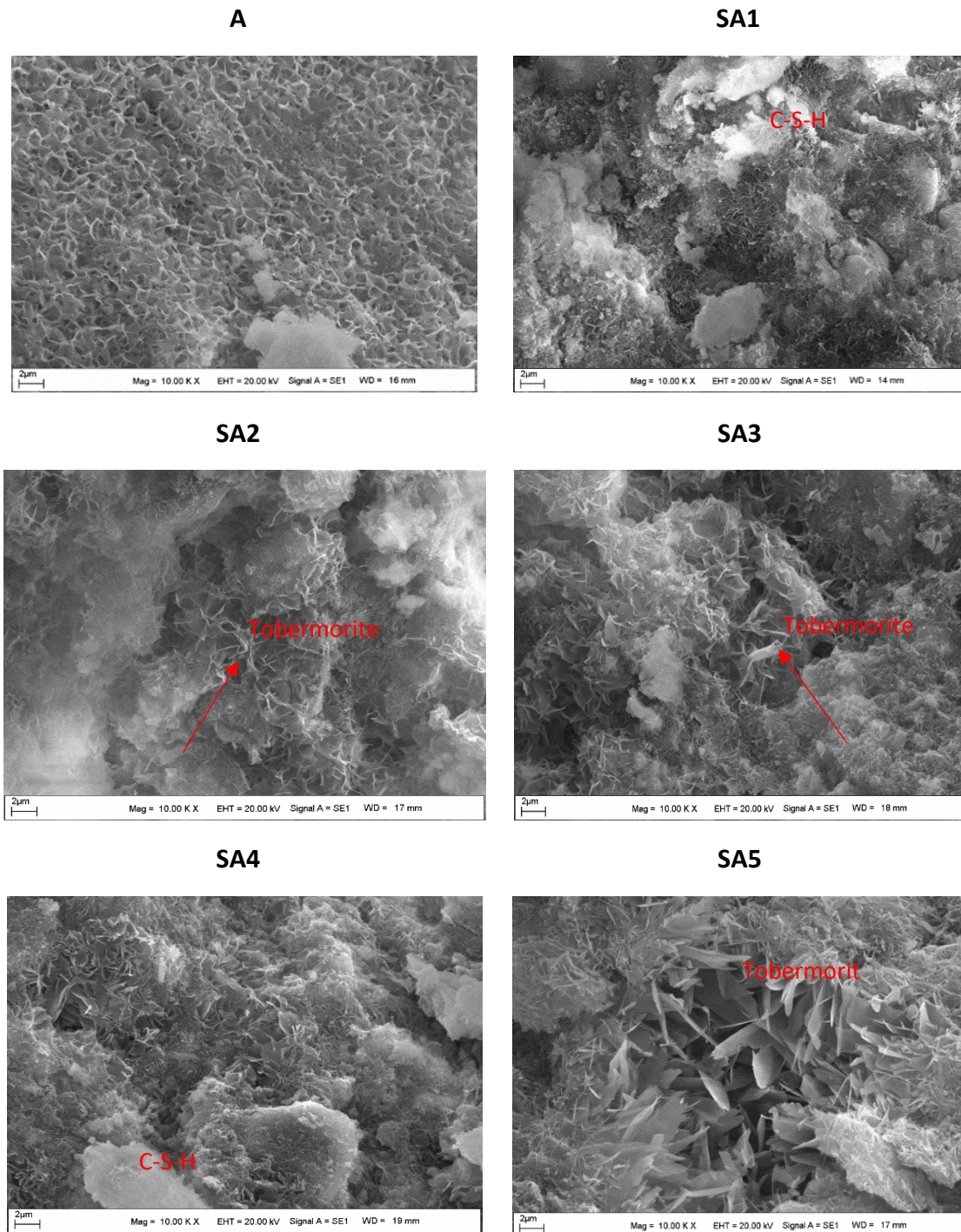


Figure 8. SEM images with ceramic waste AAC

The physico-mechanical properties of AAC samples (unit weight, porosity, water absorption, uniaxial compressive strength, V_p , thermal conductivity)

were given in Table 4-9 and graphically represented in Figure 9-14.

The Physico - Mechanical Properties of AAC

Table 4. The unit weight values of AAC samples and changes according to the reference sample.

Sample	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
Average Unit weight (kg/m^3)	538,98±23,14	570,77±7,94	527,74±9,67	535,29±13,81	533,22±12,42	534,24±2,41
Changes (%)		5,89	-2,085	-0,685	-1,068	-0,879
Sample	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
Average Unit weight (kg/m^3)	538,98±23,14	570,59±11,16	552,58±16,43	601,3±19,54	630,78±14,02	620,14±37,59
Changes (%)		5,864	2,522	11,566	17,031	15,05

Table 5. The porosity values of AAC samples and changes according to the reference sample.

Sample	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
Average Porosity (%)	48,24±9,09	38,22±0,61	39,41±1,35	38,03±7,34	40,37±1,07	40,76±0,25
Changes (%)		-20,77	-18,31	-21,16	-16,32	-15,50
Sample	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
Average Porosity (%)	48,24±9,09	40,57±0,9	41,46±1,02	35,72±0,18	35,01±0,83	38,45±0,33
Changes (%)		-15,89	-14,05	-25,94	-27,41	-20,29

Table 6. Water absorption values of AAC samples and changes according to the reference sample.

Sample	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
Average Water absorption (%)	79,96±4,04	67,01±0,77	74,19±1,73	72,63±14,09	76,66±4,86	76,13±0,08
Changes (%)		-16,19	-7,21	-9,16	-4,12	-4,79

Sample	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
Average Water absorption (%)	79,96±4,04	71,13±1,43	73,94±4,01	57,21±1,11	55,84±2,57	64,63±1,03
Changes (%)		-11,04	-7,52	-28,44	-30,04	-19,16

Table 7. Uniaxial compressive strength values and changes according to the reference sample.

Sample	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
Average Uniaxial compressive strength (MPa)	1,25±0,16	1,99±0,16	1,97±0,03	1,97±0,05	1,52±0,26	1,32±0,15
Changes (%)		59,2	57,6	57,6	21,6	5,6

Sample	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
Average Uniaxial compressive strength (MPa)	1,25±0,16	1,76±0,04	1,72±0,2	1,6±0,08	1,57±0,18	1,48±0,16
Changes (%)		40,8	37,6	28	25,6	18,4

Table 8. Vp values of AAC samples and changes according to the reference sample

Sample	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
Average Vp (m/s)	1274,2±175,1	1375,27±132,4	1282,05±164,5	1481,04±68,4	1430,94±62,4	1304,66±126,1
Change (%)		7,93	0,61	16,7	12,3	2,39

Sample	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
Average Vp (m/s)	1274,2±175,13	1290,81±116,8	1358,85±119,5	1491,46±159,9	1429,9±101	1575,93±144,8
Change (%)		1,3	6,64	17,05	12,21	23,67

Table 9. Thermal conductivity values of AAC samples and changes according to the reference sample.

Sample	A	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
Average Thermal conductivity (W/mK)	0,1085±0,0007	0,1440±0,018	0,1230±0,001	0,1175±0,006	0,1195±0,007	0,1135±0,013
Change (%)		33,33	13,88	8,79	10,64	5,09

Sample	A	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
Average Thermal conductivity (W/mK)	0,1085±0,0007	0,1295±0,019	0,1037±0,007	0,1345±0,01	0,1445±0,016	0,1475±0,003
Change (%)		19,91	-3,98	24,53	33,79	36,57

Unit Weight

The unit weight is an important property of AAC. The oven-dry unit weight values of 5 AAC samples and changes based on reference sample (A) were given in Table 4 and graphically represented in Figure 9.

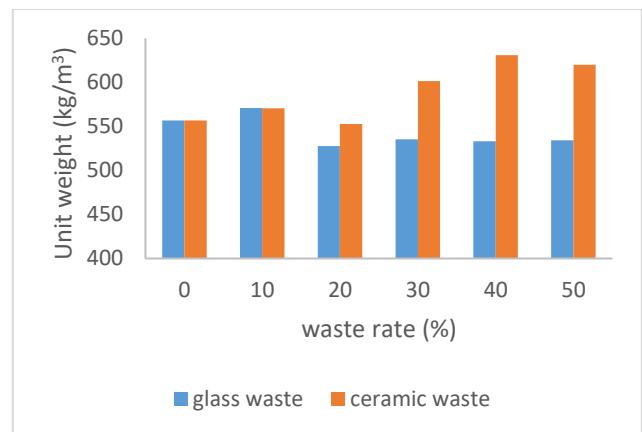


Figure 9. Unit weight of AAC samples.

Examining Table 4 and Fig. 9, it is seen that increasing the amount of glass waste from 10% to 20% led to an increasing unit weight. For other glass weight proportions (30%, 40%, and 50%), the unit weights remained stable. The addition of ceramic waste led to an increase in the unit weight of AAC. In the glass waste series, the unit weight increased by only 10% with the addition of 55.89% waste and decreased at other proportions. The unit weight change values in the CA2, CA3, CA4, and CA5 series were 2.085, -0.685, -1.068, and -0.879. In the SA1, SA2, SA3, SA4, and SA5 series the unit weight change values were 5.864, 2.522, 11.566, 17.032, and 15.05, respectively. When the unit weight results were evaluated it was seen that it would be appropriate to use a 20% or higher proportion of glass waste.

The specific gravity of constituents materials affected the AAC properties such as unit weight, compressive strength, and thermal conductivity [37]. When Table 2 is examined it is seen that glass waste density (2.72 g/cm^3) is close to quartzite density (2.7 g/cm^3); however, ceramic waste density (2.94 g/cm^3) is higher than quartzite. As the waste ratio increases, it is thought that the reason for the increase in the unit weight of the SA series is due to this. This result could be attributed to the porous structure and comparatively lower specific gravity of the glass waste [5]. The physical properties of AAC, such as compressive strength, thermal performance, and drying shrinkage, depending on the unit weight of the AAC itself. AAC unit weight values are usually between 300 to 1800 kg/m^3 [28]. The unit weight values of the AAC samples were similar to these values.

Porosity

The porosity of AAC samples and changes based on reference sample (A) were given in Table 5 and graphically represented in Figure 10.

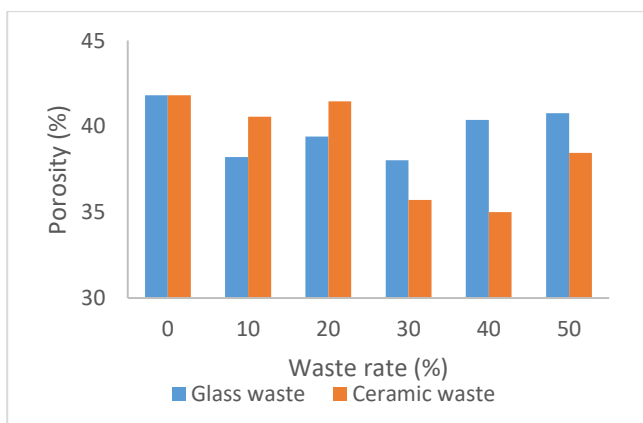


Figure 10. The porosity of AAC samples.

It can be seen that by increasing the glass waste from 0% to 50%, the porosity of the AAC samples gradually decreased. When the ceramic waste increased from 0% to 50%, the porosity values of the AAC samples decreased

from 40.57% to 38.45%. To better compare the porosity of AAC samples with different proportions of waste, changes relative to the control samples were calculated. The changes in values are given in Table 6 and graphically represented in Figure 10.

When Table 5 and Figure 10 are examined it is seen that the addition of waste materials caused decreasing porosity. In particular, the addition of 30% and 40% ceramic waste caused a 25.94% and 27.41% reduction in porosity, respectively. Ceramic waste is highly absorbent. Due to the high porosity and clay content of the ceramic waste, sufficient air bubbles could not be formed since it reduced the water via absorption during the reaction, therefore the unit volume weight was high. As a result, porosity and water absorption rates decreased [38].

Water absorption

The water absorption values of AAC samples were given in Table 6 and graphically represented in Figure 11.

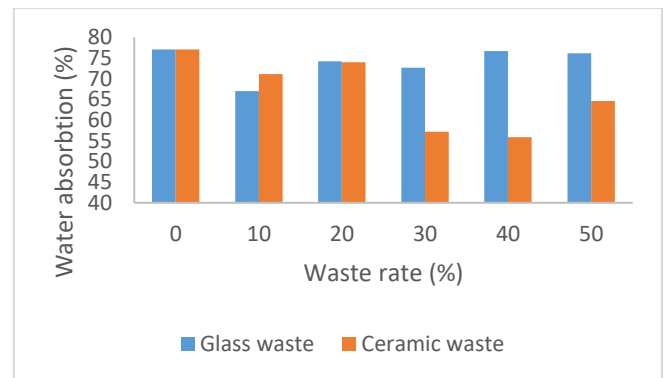


Figure 11. Water absorption values of AAC samples.

When Table 6 and Figure 11 are examined, it is seen that the addition of both types of waste materials caused a reduction in water absorption. AAC is known to have high water absorption due to its high porosity and large drainage channels. There are two types of pores, those connected to the outside and closed pores that are not connected. Driven by capillary force, the open pores have a water absorption effect [39]. The water absorption has two parts in the capillary hole (pore diameter $< 1 \mu\text{m}$) and in the large ventilation part [28]. The lowest water absorption value was obtained in the SA4 sample with the lowest porosity value. The glass powder is polar (hydrophilic); therefore, as the glass waste ratio increased, the water absorption rates of the samples also increased. In particular, the addition of 30% and 40% ceramic waste caused a dramatic reduction in the water absorption value to 28.44% and 30.04%, respectively. This is because of the porosity reduction in the AAC samples.

Uniaxial Compressive strength

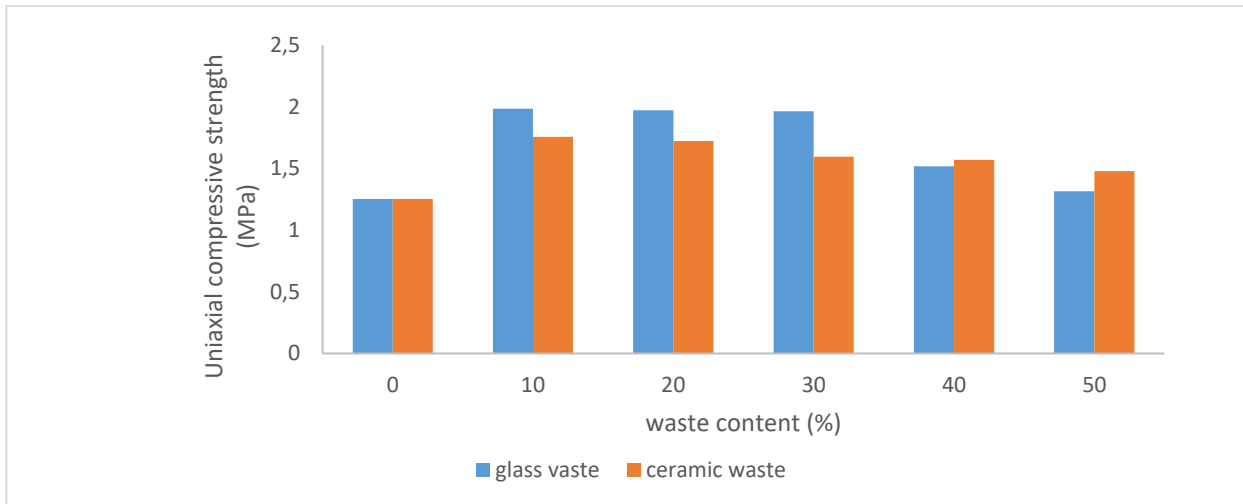


Figure 12. Uniaxial compressive strength of AAC samples.

Examining Table 7 and Figure 12, it is seen that the addition of the waste materials led to increasing UCS values in all of the AAC samples. Examining Fig.12, although relatively higher strength values were measured for the samples with glass waste the strength decreased regularly with increased amounts of waste material. Additionally, the strength values decreased regularly with increased amounts of replacement ceramic waste. It is thought that the silica in the glass waste is an amorphous structure and has better pozzolanic properties so that its compressive strength is high.

Previous studies have reported that the use of waste glass powder can improve the mechanical properties of concrete. The fine silica powder reacts with the alkalis in cement to form more calcium-silicate-hydroxide (CSH) [40]. Additionally, ceramic waste can be used as an alternative to quartz due to its high alumina and silica content. The high amounts of alumina and silica react with calcium to produce the main skeletal structure, the CSH phase, and the CSH gel [41]. As can be seen from the SEM images, the AAC structure gained a more durable structure than the regular tobermorite formations seen in samples CA1 and CA2. As the waste ratio increased, the strength decreased as the regular tobermorite formation decreased. Generally, the compressive strength increased linearly with density. Autoclaving increased the compressive strength significantly, as high temperature and pressure result in a stable form of tobermorite. Porosity and pore size distribution do affect the concrete strength [10]. Compressive strength will decrease with decreasing density and increase in porosity [42]. Lowering density by the formation of large macropores is found to cause a significant drop in strength [43]. The porosity and unit weight values of the samples were compatible with the uniaxial compressive strength values. As stated by Chen et al., 2023 there are positive correlation with the number of pores and a negative correlation with the average pore size and pore shape. The pore shape factor has the most

significant impact on dry density and number of pores is the most significant factor affecting the compressive strength [44]. The use of siliceous solid waste as an alternative to natural sand for the preparation of AAC is practical and economical. High levels of sand substitution have a negative effect on the strength development of AAC, and the optimal substitution should be limited 30 % [45].

Ultrasonic wave velocity

The ultrasonic wave velocity of samples with glass and ceramic waste addition was given in Table 8 and graphically represented in Figure 13.

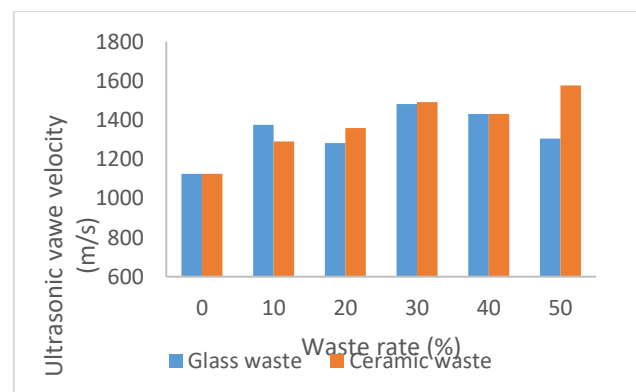


Figure 13. Vp of AAC samples.

Ultrasonic techniques are frequently used for the determination and analysis of the pore structure and internal defects such as voids, cracks, etc. When Table 8 and Figure 13 are examined it is seen that P-wave velocity (Vp) values for all of the samples increased with increased glass and ceramic waste. This means that adding waste

materials led to an increase in the porous structure of the samples.

Thermal conductivity

were given in Table 9 and graphically represented in Figure 14.

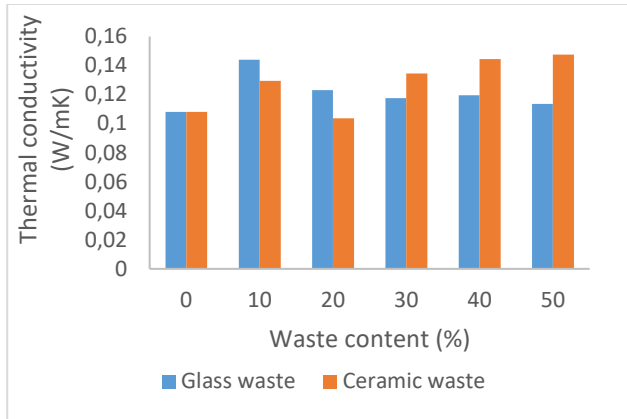


Figure 14. Thermal conductivity of AAC samples.

The thermal performance value (k) was in the range from 0.1 to 0.7 W/(Mk) for dry density values from 400 to 1700 kg/m³, which is about 2 to 20 times less than conventional concrete where it is in the range from 1.6 to 2.0 W/(mk) [28]. When Table 9 is examined it is seen that the thermal conductivity values of samples are in accordance with these values, and in Table 10, thermal conductivity increased with the addition of waste materials, except for SA2. The biggest change was in the SA4 and SA5 samples. Higher porosity is related to more air voids, which effectively prevent heat transmission [37]. There are good correlations between the thermal conductivity and porosity of AAC samples. Samples with increasing amounts of waste led to decreasing thermal conductivity.

Changes in Physico-mechanical and Thermal Properties

The changes in the physico-mechanical and thermal properties compared to the reference sample are represented graphically in Figures 15 and 16, respectively. When Figure 15 is examined it is seen that the unit weight, porosity and water absorption properties of AAC samples with glass waste decreased, while UCS and thermal conductivity increased. Glass waste has a positive effect on UCS, one of the most important physical properties, especially for amounts from 10 to 30%. This positive effect decreased by 40% and 50% of added glass waste. The thermal conductivity of AAC is another important physical property. In terms of energy conservation, building materials should have low thermal permeability.

When Figures 15 and 16 are examined it is shown that glass and ceramic waste additives caused thermal conductivity increases except for the addition of 10% ceramic waste.

AAC has good thermal isolation due to its cell structure. Thermal insulation properties of specimens were determined by thermal conductivity test. The thermal conductivities of samples

When the amount of added glass waste and ceramic waste increased, thermal conductivity decreased. The porosity and water absorption showed a reduction in all of the samples, while unit weight decreased slightly in samples with added glass waste but increased in samples with added ceramic waste.

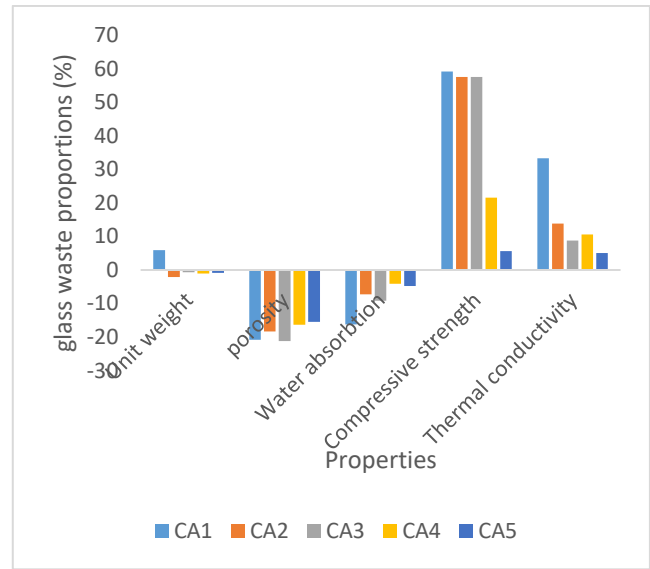


Figure 15. Percentage change of glass waste according to properties



Figure 16. Percentage change of ceramic waste according to properties

Conclusions

This study examined the feasibility of using glass and ceramic wastes as an alternative source of silica to produce autoclaved aerated concrete (AAC). The material compositions, physico-mechanical, chemical, and thermal properties of AAC were investigated and compared with a waste-free reference sample. The following conclusions were drawn:

Using ceramic and glass wastes led to decreasing porosity and increasing water absorption. In particular, ceramic waste addition can lead to porosity reductions from 25 to 27% compared to the reference sample. The porosity reduction led to a water absorption decrease. While glass waste addition led to decreasing unit weight, ceramic waste addition caused an increase.

The samples produced with glass and ceramic wastes showed better mechanical strength than the reference sample. In particular, adding 10% and 20% waste led to increasing uniaxial compressive strength (UCS); 59.2% and 57% for glass waste, and 40.8% and 37.6% for ceramic waste, respectively. Microscopic test results (SEM analysis) demonstrated that the main hydration products of AAC samples were tobermorite and CSH gels. Since tobermorite formation developed better in these series of samples, higher strength values were obtained. Using wastes led to increasing V_p and thermal conductivity. When the average compressive strength values were examined and compared to commercial AAC, it can be said that it was necessary to increase the curing temperature and pressure to increase the strength.

It can be said that wastes with high silica content such as glass dust can be used in AAC production. Because, when compared to the control (A) sample, higher compressive strength values were obtained in all series samples with glass waste additives. Since the amount of silica is higher than other wastes, it is thought that the skeleton structure of AAC is more robust.

According to physical and mechanical test results, the optimum replacement ratio of glass and ceramic waste in the AAC mixture was 10 %.

Several aspects can be further studied. To improve mechanical properties that are important for AAC production, experiments can be carried out by autoclaving under pressure and temperature can be increased. Glass and ceramic waste effects can be investigated on the durability of AAC properties.

Acknowledgments

This study was funded by İnönü University Research Funding, project no. FDK-2018-1133.

Data availability statement

All data that support the findings of this study are available from the corresponding author (DES) upon reasonable request.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Funding

The study was supported by İnönü University Scientific Research Project Coordination Unit under the project number FDK-2018-1133. This support is gratefully acknowledged. The experiments were conducted in the Mining Engineering Laboratory of İnönü University.

References

- [1] Heriyanto, F. Pahlevani, V.Sahajwalla, "From waste glass to building materials-An innovative sustainable solution for waste glass", *J. of Cleaner Product.* Vol.8 no.191pp.192-206,2018
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>
- [2] M. Uysal, B.C. Gündoğdu, M. Sümer, "The effect of the amount of binder materials on the drying shrinkage of autoclaved aerated concrete", *Erciyes Univ J of the Insti of Scien and Techno.*; vol.28, no.4, pp.303-308. 2012.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/erciyesfen/issue/25564/269674>
- [3] M. Samadi, G.F Huseien., H. Mohammadhosseini., et all. "Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars", *J. of CleN. Production.*266:121825, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121825>
- [4] A. Mohejerani, J. Vajna, T.H.H. Cheung, et all. "Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials", *Constr. and Build. Mater.*;vol.156, pp.443-467. 2017,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>
- [5] H. Kurama, İ.B.Topcu, C. Karakurt, "Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash", *J. of Mat. Process. Tech.*vol.29, no. 2, pp.767-7732009. 2008
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.044>
- [6] <https://www.acimac.it/ac-en/association> (accessed 13 January 2022).
- [7] S. Subaşı, H. Öztürk, M. Emiroğlu. "Utilization of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete", *Constr. and Build. Mater.*vol.149 pp.567-574, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180>
- [8] Q. Cai, B. Ma, J. Jiang, J. Wang, et all. "Utilization of waste red gypsum in autoclaved aerated concrete preparation", *Constr. And Build. Mater.* Vol.291:23376. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123376>
- [9] B. Ma, L. Cai, X. Li, et all. "Utilization of iron tailing as a substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products", *J. Of Clean. Prod.* Vol.127, no.162-1712016.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.172>
- [10] N. Narayanan, K. Ramamurthy. "Structure and properties of aerated concrete", *Cem. and Conc. Comp.* Vol. 22no. 5, pp. 321-329. 2000,
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0)
- [11] M. Savaş, İ. Demir, S. Güzelküçük, et all. "Thermal and compressive strength properties of sepiolite substituted autoclaved aerated concrete", *J. of Polytechnic.* Vol.17no.1, pp. 43-47. 2014,
<https://doi.org/10.2339/2014.17 S>
- [12] Y. Chen, J. Chang, Y. Lai, et all. "A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete:

- Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions”, *Constr. and Build. Mater.* Vol. 53, pp. 622-629. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116>
- [13] C. Karakurt, H. Kurama, B. Topcu. “Utilization of natural zeolite in aerated concrete products”, *Cem. And Conc. Comp.* vol.32, no.1-8, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.002>
- [14] M.S. Güner, *Materials Science - Building Materials and Concrete Technology*, Aktif Publisher, 2012, İstanbul, 98pp
- [15] M. Kalpana, S.Mohint, “Study on autoclaved aerated concrete review”, *Mater. Today: Proceed.* Vol.22, pp.894-896. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.099>
- [16] İ. Özgenç, B.Sarisözen, “Can perlite be used in aerated concrete production in Turkey”, *3rd Industrial Raw Materials Symposium*, Oct 14-15, 81-86. 1999.
- [17] P. Walczak, P. Szymański, A. Rózycka. “Autoclaved aerated concrete based on fly ash in density 350 kg/m³ as an environmentally friendly material for energy-efficient constructions”, *Procedia Engineering.* Vol.122, pp.39-46. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.005>
- [18] T.Evgeniya, “Develop an efficient method for improving the hydrophysical properties of aerated concrete using industrial waste”, *Procedia Engineering.*, vol.153, pp.761-765. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.239>
- [19] E.G. Araujo, J.A.S Tenerio. “Cellular concrete with the addition of aluminum recycled foil powders”, *Materials Science Forum.*;198-204. 2005, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.498-499.198>
- [20] X. Huang, W. Ni, W. Cui, et all. “Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast”, *Constr. and Build. Mater.*; vol.27, pp.1-5. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.034>
- [21] E. Holt, P. Raivio. “Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete”, *Cem. and Con. Research.*; vol. 3, pp. 796-802. 2005, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.005>
- [22] O. Günaydın, K. Güçlüer, O. Ünal. “Investigation of usability of Adıyaman waste marble powders in aerated autoclaved concrete production”, *Electronic Journal of Constr. Technologies.*;vol.12, no.1, pp.21-29, 2016
- [23] A. Rózycka, W.Pichór. “Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete”, *Constr. and Build. Mater.*; vol. 120, pp. 65-71, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.019>
- [24] Q. Wu J. Guang, S. Li, et all. “Development of autoclaved aerated concrete from mechanically activated magnesium rich nickel slag”, *J. Mater. Civ. Eng.*;vol. 30: no. 7 pp.1-8. 2018, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002330)
- [25] K. Matsui, J. Kikuma, M. Tsunashima, et all. “In situ time-resolved X-Ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: influence of silica source reactivity and Al addition”, *Cem. and Con. Research.*; vol.41, pp. 510-519. 2011, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.022>
- [26] K. Kunchariyakun, S. Asavapisit, K. Sombatsompop. “Effect of fine al containing waste in autoclaved-aerated concrete incorporating rice-husk ash”, *J. Mater. Civ. Eng.*;vol.27, no.8, pp.1-7. 2015, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001149](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001149)
- [27] L.S Haooi, P.J. Min. “Potential of substituting waste glass in aerated light”, *Procedia Engineering.*;171:633-639. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.398>
- [28] R.A. Rahman., A. Fazlizan, N. Asim, et all. “Utilization of waste material for aerated autoclaved concrete production: A preliminary review”, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*; vol.463, 012035. 2019, doi:10.1088/1755-1315/463/1/012035
- [29] TS EN 1097-7:2009. Tests for mechanical and physical properties of aggregates-Part 7: Determination of the particle density of filler- Pyknometer method. TSE, Ankara.
- [30] TS EN 772-13:2002. Methods of test for masonry units-Part 13: Determination of net and gross dry density of masonry units (except for natural stone). TSE, Ankara.
- [31] TS EN 771-4:2011. Specification for masonry units-Part 4: Autoclaved aerated concrete masonry units. TSE, Ankara.
- [32] TS EN 772-4:2002. Methods of test for masonry units-Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units. TSE, Ankara.
- [33] TS EN 772-1+A1:2015. Methods of test for masonry units-Part 1: Determination of compressive strength. TSE, Ankara.
- [34] TS EN 12504-4:2012. Testing concrete in structures-Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. TSE, Ankara.
- [35] TS EN 12664:2009. Thermal performance of building materials and products-Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods-Dry and moist products of medium and low thermal resistance. TSE, Ankara.
- [36] TS EN 12667:2003. Thermal performance of building materials and products-Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods- products of high and medium thermal resistance. TSE, Ankara.
- [37] X. Qu, X. Zhao. “Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review”, *Const. And Building Materials.*; vol.135, pp.505-516. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208>

- [38] B. Zegardlo, M. Szelag, P. Ogrodnik. "Concrete resistant to spalling made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes-The effect of moisture and porosity on destructive processes occurring in fire conditions", *Constr. and Build. Mater.*;vol.173 pp. 58-68. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.030>
- [39] J. Lu, K. Wang and M.U. Qu, "Experimental determination on the capillary water absorption coefficient of porous building materials: A comparison between the intermitted and continuous absorption test", *Journal of building Eng.*; vol. 28:101091. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101091>
- [40] F. Pahlevani, V. Sahajwalla. "From waste glass to building materials-An innovative sustainable solutions for waste glass". *J. of Cleaner Produc.*;vol.191, pp.192-206. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>
- [41] L. Gautam, J.K. Jain, P. Kalla, S. Choudhary, "A review on the utilization of ceramic waste in sustainable construction products". *Materials Today: Proceedings*;vol.43, pp. 1184-1891. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.829>
- [42] H.Yazıcı, E. Deniz and B. Baradan, " The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete" *Constr. Build. Mater.*; vol. 42, pp. 53-63, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.003>
- [43] M.Y.J. Liu, U.J.Alengaram, M.Santhanam, et all. "Microstructural investigations of palm oil fuel ash and fly ash based binders in lightweight aggregate foamed geopolymer concrete", *Constr. Build. Mater.*;vol. 120, pp. 112-122,2016, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.076>
- [44] X. Chen, H. Zhang, T. Gong, et all. "Regulation of pore structure of Brick-concrete recycled sand powder autoclaved aerated concrete and its relationship with key properties", *Constr. Build. Mater.*;vol. 392, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131849>.
- [45] C.Weï, X. Liu, Z. Zhang, P.Wu, "Utilization of solid wastes for aerated concrete preparation. Mechanical properties and microstructural analysis", *J. of Building Eng.*; Vol. 28, 2024, 108235. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108235>.



Deep Learning Approaches for Autonomous Crack Detection in Concrete Wall, Brick Deck and Pavement

Fethi ŞERMET^{1*}, İshak PAÇAL²

¹Iğdir University, Civil Engineering Department, fethi.sermet@igdir.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-8221-689X

²Iğdir University, Computer Engineering Department, ishak.pacal@igdir.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-6670-2169

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 March 2024
Received in revised form 20 April 2024
Accepted 29 April 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Crack detection, structural cracks, deep learning, image processing, CNN

ABSTRACT

Detecting cracks is vital for inspecting and maintaining concrete structures, enabling early intervention and preventing potential damage. The advent of computer vision and image processing in civil engineering has ushered in deep learning-based semi-automatic/automatic techniques, replacing traditional visual inspections. These methods, driven by autonomous diagnosis, have applications across various sectors, fostering rapid progress in civil engineering. In this study, we present an approach that combines vision transformers and convolutional neural networks (CNN) for autonomously diagnosing cracks in bridges, roads, and walls. Performance enhancement was achieved through transfer learning, data augmentation, and optimized hyperparameters, utilizing popular CNN and vision transformers (ViT) architectures. The proposed method was tested on the SDNET2018 dataset, comprising over 56,000 images. Experimental results demonstrated the approach's effectiveness, achieving high accuracy in detecting road cracks at 96.41%, wall cracks at 92.76%, and bridge cracks at 92.81%. These findings highlight the promising potential of deep learning in this field.

Doi: 10.24012/dumf.1450640

* Sorumlu Yazar

Introduction

Cracks are a common issue observed on various man-made structures such as pavements, bridges, nuclear power plant walls, and tunnel ceilings. Cracking occurs when a structural element separates into distinct pieces, representing a mechanism to relieve stress when concrete is subjected to forces beyond its tensile capacity [1]. It's a symptom of deterioration processes that weaken concrete or subject it to excessive stresses, causing it to lose its integrity [2]. When cracking happens, the tensile stresses perpendicular to the crack are eliminated [3]. Due to concrete's heterogeneous material structure and brittle behavior, it's widely accepted that cracks will eventually appear during the structure's lifespan. Building codes explicitly acknowledge this, ensuring that structures can endure loads over their intended service life despite crack formation. Concrete cracks can lead to severe consequences, such as reduced strength and stiffness, diminished aesthetics, shorter durability, and compromised waterproofing [4]. The loss of stiffness due to cracks results in additional deformations and displacements in structural elements.

Timely detection and repair of cracks are crucial for maintaining infrastructure health and preventing further

damage. Developing a fast, reliable, and cost-effective algorithm to identify surface defects is a top priority for robust infrastructure management systems [5, 6, 7]. The rising demand for computer-aided intelligent infrastructure monitoring/inspection systems, such as pavement surface inspection [8], underground pipeline inspection [9], bridge crack monitoring [10], and railway track assessment [11], has led to a growing interest in automatic crack detection in recent years. Deep learning algorithms, a subset of artificial intelligence, have been prominently featured in this trend and have demonstrated successful applications across various fields.

In recent years, deep learning has seen widespread applications in various fields such as industry, healthcare, natural language processing, and autonomous vehicles, especially within engineering disciplines [12, 13, 14, 15]. In this context, numerous studies have explored the use of deep learning techniques in crack detection. Loverdos and Sarhosis [16], curated a comprehensive dataset consisting of images of stacked brick walls with diverse colors, textures, and sizes. They discovered that employing image-based techniques and machine learning for brick segmentation produced superior results com

pared to conventional image processing methods. In a study conducted by Ali R. et al. [17] focusing on crack detection in structures, applications of CNN outperformed traditional image processing techniques and other machine learning methods in crack classification and segmentation. Xu Z. et al. [18] introduced a locally developed transformer network (LETNet) method capable of effectively detecting road surface cracks, achieving high accuracy in crack detection. They highlighted LETNet's exceptional performance in identifying various surface cracks under diverse road and weather conditions. Additionally, Chaiyasarn, K. et al. [19] reported remarkable results in crack predictions using CNN, achieving high accuracy (99.88%), precision (82.2%), recall (90.2%), and F1 score (86.01%).

Yu, Y. et al. [20], an approach utilizing advanced pre-trained CNN was proposed to predict cracks on concrete structures, leveraging a dataset comprising 41,780 images. While the method proved to be effective and robust in detecting concrete cracks, the authors acknowledged its limitation in characterizing the size and type of small cracks. On a parallel note, Ma, D. et al. [21] introduced a technique for asphalt road crack detection based on a CNN with multiple feature layers. The model extracted multi-scale features to enhance accuracy in road crack recognition. Following hyperparameter tuning, the model achieved an impressive accuracy of 98.217% and a crack detection rate of 96.6 frames per second (FPS). Müller, A. et al. [22], a machine learning-based approach was developed to automatically detect the onset of fractures using a dataset of over 30,000 images derived from material characterization experiments. The researchers mentioned that their classifier model could identify both the initiation and propagation of cracks. While their study concentrated on analyzing ductile fracture images, they noted that the methodology they proposed could readily be adapted for brittle fracture problems as well. Moreover, Fang et al. [23] introduced a fatigue crack growth prediction method that employed machine learning model correction to mitigate errors arising from uncertain factors in crack growth. Hamidia, M. [24], an extensive database comprising 264 surface crack models corresponding to 61 non-ductile reinforced concrete moment frame (RCMF) was created. These specimens were tested under various shear displacement rates. The researcher proposed a machine learning-based procedure to automate the characterization of the damage state of non-ductile reinforced concrete moment frames. This characterization was based on visual indices of crack patterns observed on concrete surfaces. Interestingly, the study revealed that predictions relying on models utilizing compressive strength information did not significantly enhance accuracy. This suggests that the surface crack models of RCMF provide adequate information to estimate the maximum shear displacement ratio experienced by moment frames during seismic vibrations. In essence, the research indicated that the crack pattern model could be effectively utilized to predict the maximum shear displacement ratio sustained by damaged non-ductile RCMF during seismic events.

Aravind N. et al. [25] concentrated on crack detection by employing image processing and fault pattern recognition techniques in conjunction with appropriate machine learning algorithms. They specifically targeted cracks in reinforced concrete beams subjected to bending loads and utilized six different classifiers for detection. The study highlighted that the support vector machine (SVM) classifier provided the most accurate results in predicting cracks. Han X. et al. [26] introduced a hybrid technique incorporating CNN and digital image processing to detect cracks in photographs. They proposed that by implementing transfer learning, the required volume of data and costs could be minimized without compromising accuracy. Meanwhile, Laxman, K. C. et al. [27] devised a comprehensive framework utilizing deep learning models for crack detection on concrete surfaces. Additionally, they focused on estimating crack depth using images captured from portable devices. Zhang et al. [28] introduced a crack detection model using Binary Level Sets (BLS), which effectively identifies crack images while being lightweight. Similarly, Martinez-Ríos et al. [29] proposed utilizing Generalized Morse Wavelets (GMWs) in Continuous Wavelet Transform (CWT) to detect transverse cracks on sidewalks, employing spectrograms to fine-tune pre-trained CNN like GoogLeNet, SqueezeNet, and ResNet18. Among these, SqueezeNet demonstrated the highest average validation sensitivity. Meanwhile, Xu et al. [30] developed a real-time method for crack detection, segmentation, and parameter measurement, ensuring both accuracy and efficiency. Additionally, Yuan et al. [31] focused on machine learning models to predict self-healing concrete's ultimate crack width, successfully correlating input parameters like raw materials and pre-healing crack width with post-healing crack width, demonstrating accurate predictions of crack healing capacity. Iraniparast et al. [32] employed Deep Convolutional Neural Networks (DCNN) and transfer learning techniques to detect cracks in images of concrete structures. They incorporated multi-resolution image analysis through wavelet transformation for crack segmentation. Their DCNN classifier models demonstrated strong performance, with F1-scores ranging from 94.5% to 99.6%. Similarly, Katsigiannis et al. [33] introduced a deep learning method for crack detection in brick wall facades, using transfer learning with limited annotated data. They created a dataset of 700 brick wall facade images, using 500 for training, 100 for validation, and 100 for testing. Their approach proved highly effective, achieving accuracy and F1 scores of up to 100% during end-to-end training of the neural network.

When evaluating the studies in the literature, it is evident that deep learning methods are widely utilized for crack detection across various types of structures. These studies encompass a wide spectrum of buildings, ranging from brick walls to concrete structures, employing techniques such as CNN, transfer learning, and other machine learning methods. Particularly, experiments conducted on diverse datasets consistently demonstrate that deep learning-based approaches yield superior results compared to traditional image processing techniques. These studies underscore the effectiveness of deep learning in

crack detection, emphasizing its significant potential in the fields of civil engineering and structural maintenance in the future.

This study primarily focuses on crack detection using deep learning techniques. With the advancement of Artificial Intelligence (AI), deep learning has achieved significant success and is regarded as the most promising approach for crack detection. The main contributions of this study emphasize how crucial it is to detect cracks during the maintenance of concrete structures. Early crack detection is critical for ensuring the longevity and safety of these structures, allowing proactive measures to prevent potential damage. Additionally, this study demonstrates that the use of deep learning-based techniques instead of traditional visual inspection methods represents a significant transformation in the field of civil engineering. These techniques can be applied in various fields due to their autonomous diagnostic capability and will contribute to rapid advancements in civil engineering as well. Furthermore, this article presents the effectiveness of a crack detection approach developed using deep learning methods such as vision transformers and CNN. This method achieves high accuracy rates in autonomously diagnosing cracks in different types of structures, including bridges, roads, and walls. The dataset and experimental studies demonstrate the scalability of this approach and showcase the transformative impact of deep learning in civil engineering practice. Therefore, this study represents a significant advancement in the field of crack detection.

Material and Methods

Deep Learning

Deep learning is a type of machine learning that involves neural networks with at least three layers. These networks attempt to mimic the functioning of the human brain and have the ability to learn from large amounts of data. Additional hidden layers can enhance the accuracy of prediction. Deep learning technology empowers various artificial intelligence applications, such as digital assistants, fraud detection systems, and autonomous vehicles. Machine learning and deep learning models come in different types of learning, including supervised, unsupervised, and reinforcement learning [34,35]. Supervised learning works with labeled data, unsupervised learning detects patterns in unlabeled data and classifies them based on distinctive features, while reinforcement learning is used to improve a model's actions based on feedback.

Training deep learning models may take longer compared to other machine learning methods, but testing trials can be quicker. However, in cases where data is limited or better interpretability is required, traditional machine learning methods might be preferred and advantageous [36]. Deep learning is more effective in situations involving large datasets, complex problems, or feature extraction requirements. It finds applications in various fields, including civil engineering, and has become an effective tool for solving complex engineering problems.

These applications include predicting structural responses, structural reliability and health monitoring, structural damage detection, estimating material properties, and providing decision support for intelligent transportation systems.

Convolutional Neural Networks (CNNs)

CNNs are a deep learning architecture widely used, especially in computer vision tasks. They were first proposed in the "Neocognitron" paper, based on Hubel and Wiesel's model of the visual system, and later optimized using backpropagation by Yann Lecun and colleagues [37]. CNN consist of three main types of layers: convolutional layers, which extract features using a sliding kernel; non-linear layers, applying activation functions to model non-linear relationships; and pooling layers, altering small regions of feature maps with statistical information. CNN layers have locally connected nodes and weight-sharing mechanisms through sliding kernels, significantly reducing parameters. Popular CNN architectures include VGGNet, ResNet, GoogLeNet, MobileNet, and DenseNet [38, 39].

Vision Transformers (ViT)

The Transformer is a deep learning model that uses self-attention mechanisms to evaluate the importance of each part of the input data. This model has gained significant attention, particularly in the field of natural language processing, replacing traditional models. ViT was introduced in 2021 for image recognition tasks. It treats images as sequences of patches, which are then transformed into vectors and processed by a standard Transformer encoder. ViT is pretrained on large datasets and can be fine-tuned for specific image classification tasks. This model has potential applications in various fields such as image recognition, object detection, and visual reasoning. However, the effectiveness of image processing models depends on factors such as the chosen optimization method, network depth, and specific hyperparameters of the dataset. Particularly, it has been observed that ViT has a more challenging optimization process compared to CNN. The Transformer generates a sequence of output tokens using the self-attention mechanism and maps these outputs to feature maps [40]. This approach allows the model to focus on crucial pixel-level information, reducing the number of tokens that need to be analyzed and significantly cutting down costs.

Dataset

The importance of the dataset in achieving the desired success of deep learning architectures is unquestionable. While classical machine learning approaches focus on manual feature extraction and small datasets, the key difference between the two approaches is that deep learning architectures require large-scale datasets and automatic feature extraction. In this study, the dataset created by Dorafshan et al. [41] was used. The SDNET2018 dataset, as seen in Figure 1, contains over 56,000 annotated images of cracked and non-cracked concrete surfaces, bridge decks, walls, and pavements.

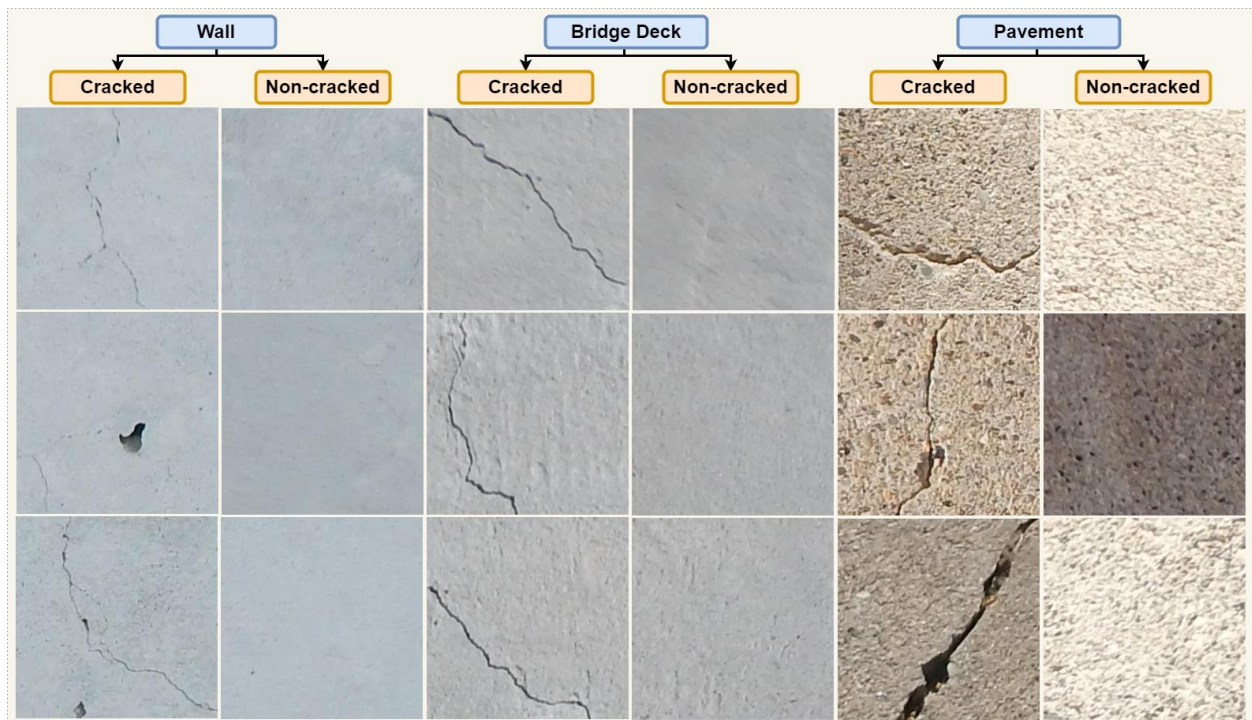


Figure 1. Some sample images from SDNET2018 dataset

Table 1. SDNET 2018 image dataset description and statistics.

	Number of images in the training set		Number of images in the validation set		Number of images in the test set		Total
	Cracked	Non-cracked	Cracked	Non-cracked	Cracked	Non-cracked	
Wall	2695	10001	578	2143	578	2143	18138
Bridge Deck	1417	8115	304	1740	304	1740	13620
Pavement	1824	15208	392	3259	392	3259	24334

This dataset is designed for training, validation, and comparison of autonomous crack detection algorithms working with image processing, deep CNN architectures, and other techniques. As the popularity of such techniques in structural health monitoring increases, there is a need for a dataset containing various annotated images that were not previously available to continually improve crack detection algorithms.

The SDNET2018 dataset [41] has been enriched with images containing different types of cracks ranging from 0.06 mm in width to 25 mm. For instance, there are 3851 images of cracked walls, with 14287 images of non-cracked walls. Similarly, for bridge decks, there are 2025 cracked images and 11595 non-cracked images. As for pavement surfaces, there are 2608 cracked images and 21726 non-cracked images. The dataset has allocated 15% of cracked and non-cracked images for validation, 15% for testing, and 70% for training purposes. Statistical information about the SDNET2018 dataset is presented in Table 1.

Proposed Method and Process

In this section, the usage and validation of deep learning models in crack detection are explained. Deep learning models have shown effective results in various fields, along with their successes in crack detection in the literature. In this study, popular CNN-based algorithms such as ResNet [42], VGG [43], and MobileNet architectures [44] are used for crack detection. Additionally, recently emerging image transformer models in deep learning, such as MobileViT [45] and Multi-Scale Vision Transformers (MViT2) [46], are employed for crack detection. The effective training of deep learning models significantly impacts their generalization capabilities on test data. If effective training does not occur, deep learning models can yield unsuccessful results on test data, which can be interpreted as a result of overfitting or being trained in an uncontrolled manner. The proposed approach's architecture is illustrated in Figure 2.

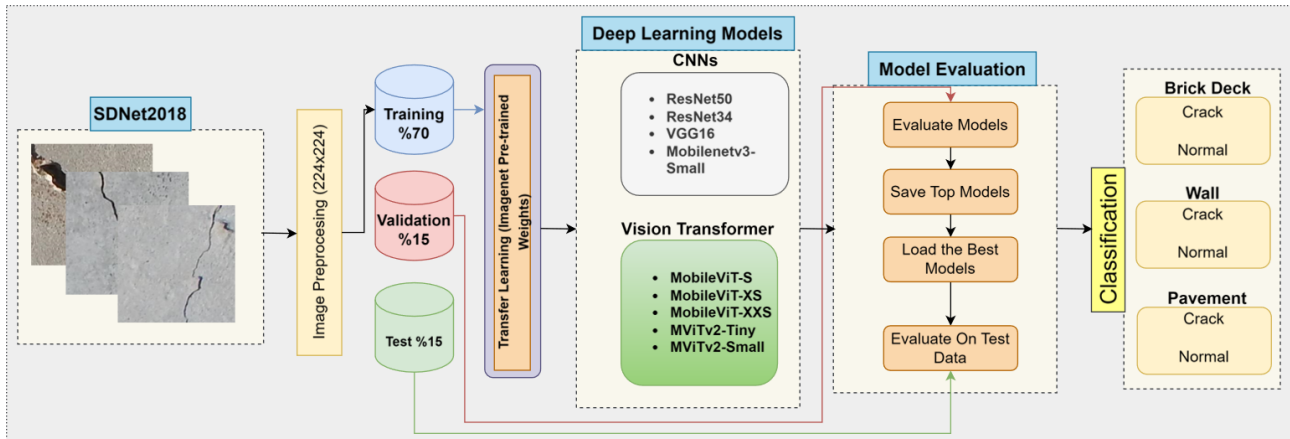


Figure 2. Stages of the proposed crack detection approach

Throughout the training process, deep learning models' accuracy and speed can be significantly enhanced through various techniques and parameters. Among the most effective methods are transfer learning and data augmentation. Furthermore, factors such as input image size, batch size, number of epochs, optimizer, learning rate, weight decay, decay rate, and warm-up augmentation play crucial roles in influencing the model's performance. In this study, essential data augmentation techniques such as scaling, smoothing, flipping, color jittering, and rotation were consistently applied across all models. Transfer learning was facilitated by utilizing weights from the ImageNet dataset, proving to be a valuable method for accelerating convergence and improving accuracy. The models were trained with optimized values for different parameters. For instance, the image resolution was set to 224x224, and other key parameters were configured as follows: step size: 0.000001, base step size: 0.1, momentum: 0.9, optimizer: *sgd*, weight decay: 2.0e-05, warm-up periods: 5, and warm-up learning rate: 1.0e-05.

Results and Discussion

Experimental Design

Typically, deep learning algorithms are trained using GPU (Graphics Processing Unit)-based graphics cards. These cards allow for faster processing of large datasets due to their parallel computing capabilities. Particularly, graphics cards using NVIDIA's CUDA architecture are widely preferred for training deep learning algorithms. The hardware components used in this study include the following: Linux-based Ubuntu 22.04 operating system, NVIDIA RTX 2080TI (11 GB GDDR6 and 4352 CUDA cores) graphics card, Intel Core i9 9900X (10 cores, 3.50 GHz, 19.25 MB Intel® Smart Cache) processor, and 32 GB DDR4 RAM. PyTorch was used as the deep learning library, and Python was the preferred programming language.

Evaluation Metrics

Evaluation metrics serve as tools to assess models from various perspectives. In the realm of object classification, fundamental metrics such as accuracy, precision, recall, and F1 score are commonly employed. These metrics are universally used in evaluating deep learning models in the existing body of literature. Their calculation hinges on knowing the values of true positive, true negative, false positive, and false negative, which typically constitute a confusion matrix. True positive signifies parts genuinely belonging to the positive class and accurately predicted. Conversely, true negative represents instances where parts rightfully belong to the negative class and are precisely predicted. False positive arises when parts truly belong to the positive class but are incorrectly predicted, while false negative denotes situations where the model inaccurately predicts the class.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{True positive} + \text{True negative}}{\text{Total number of predictions}}$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{True positive}}{\text{True positive} + \text{False positive}}$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{True positive}}{\text{True positive} + \text{False negative}}$$

$$\text{F1 - score} = \frac{2 * \text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

These formulas provide the mathematical foundation for evaluating the performance of object classification algorithms or architectures.

Experimental Results

In this section, the statistical results and evaluations of the achievements of each deep learning model used in this study on the SDNET2018 dataset are discussed. The SDNET2018 dataset comprises three main classes: bridge

decks, walls, and pavements. Each class contains both cracked and uncracked images. Therefore, the evaluations are presented in three tables, providing a more detailed comparison.

Experimental Results of Bridge Deck Classification

This section presents the experimental results for bridge decks (Table 2). It demonstrates the performance of the most popular deep learning architectures, namely CNN architectures, and the increasingly popular image transformer models in recent years. This study compares the results for both architectures, providing a comparison between CNN and image transformers. It evaluates the models' ability to generalize and perform on the test data in crack detection.

Table 2. Experimental results of the bridge deck

Model Name	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
ResNet50	0.9227	0.8924	0.7809	0.8329
ResNet34	0.9178	0.9036	0.7508	0.8201
VGG16	0.9183	0.8949	0.7593	0.8215
MobileViT-S	0.9144	0.8595	0.7760	0.8156
MobileViT-XS	0.9217	0.8974	0.7721	0.8300
MobileViT-XXS	0.9203	0.8956	0.7672	0.8264
MobileNetv3-Small	0.9080	0.8776	0.7274	0.7955
MViTv2_Tiny	0.9281	0.9328	0.7732	0.8455
MViTv2_Small	0.9256	0.9160	0.7744	0.8393

Table 2 presents the experimental results for nine deep learning models related to bridge decks. Upon examining Table 2, it can be stated that all models exhibit high performance with an accuracy of over 90%. Only a few models surpass the 92% accuracy threshold, indicating their superior performance compared to other models. A detailed analysis of Table 2 showcases the performance of different deep learning models in the classification task. In light of the observed metrics, the MViTv2_Tiny model has the highest accuracy (0.9281) and precision (0.9328) scores, indicating its overall high ability for correct predictions and accurate positive predictions. However, this model has a lower sensitivity (0.7732) score compared to some other models, meaning the rate of true positives being predicted is slightly lower. On the other hand, the MobileNetv3-Small model stands out with lower accuracy (0.9080) and precision (0.8776) scores but might require more improvement in terms of sensitivity (0.7274). The confusion matrices for these models are shown in Figure 3 and Figure 4.

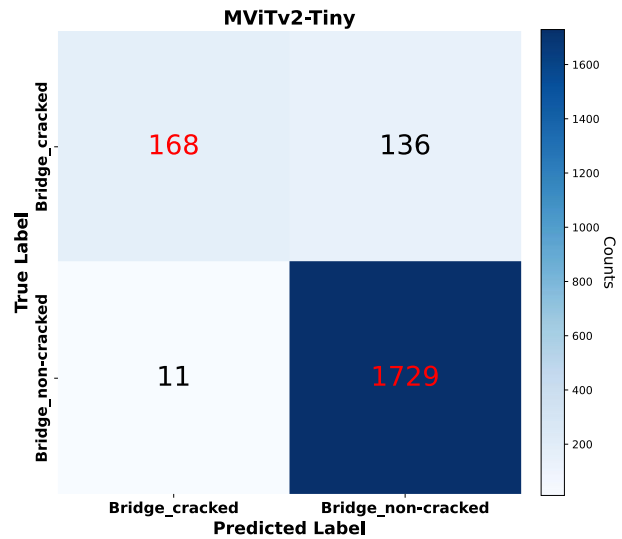


Figure 3. Confusion matrix of mvit2-tiny

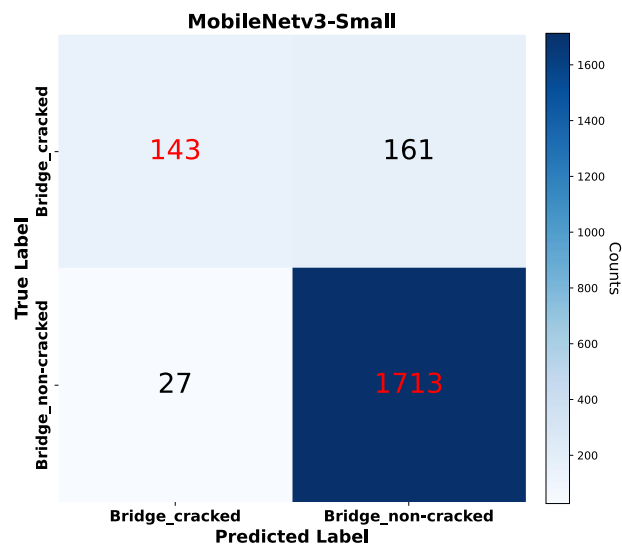


Figure 4. Confusion matrix for Mobilenetv3-small

Experimental Results of Wall Crack Classification

This section includes the experimental results related to wall crack detection in the wall class of the SDNNet2018 dataset (Table 3). Similar to the bridge decks, the performance of both CNN and vision transformer models in crack detection has been addressed. Additionally, a detailed comparison of the performance and metrics of both deep learning architectures and their respective models has been conducted to provide a more comprehensive analysis of crack detection.

Table 3. Experimental results of the wall element

Model Name	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
ResNet50	0.8905	0.8955	0.7637	0.8244
ResNet34	0.9151	0.8847	0.8539	0.8690
VGG16	0.9199	0.8922	0.8613	0.8765
MobileViT-S	0.9208	0.9113	0.8665	0.8883
MobileViT-XS	0.9239	0.9031	0.862	0.8821
MobileViT-XXS	0.9236	0.8935	0.8731	0.8832
MobileNetv3-Small	0.8956	0.8559	0.82	0.8376
MViTv2_Tiny	0.9276	0.9035	0.8744	0.8887
MViTv2_Small	0.9236	0.8922	0.875	0.8835

Table 3 presents the experimental results for 9 deep learning models related to the wall class. Upon examining Table 3, it can be stated that all models except ResNet50 and MobileNetv3-Small achieved high accuracy, surpassing 90%. Only a few models demonstrated accuracy above 92%, indicating their superior performance compared to others. When considering all metrics and making a comprehensive evaluation, the highest performance was observed in the MViTv2 architecture, particularly in the models MViTv2-Tiny and MViTv2-Small, with MViTv2-Tiny achieving the highest overall accuracy. On the other hand, the lowest performance was attributed to the ResNet50 model. The confusion matrices for these models are shown in Figure 5 and Figure 6.

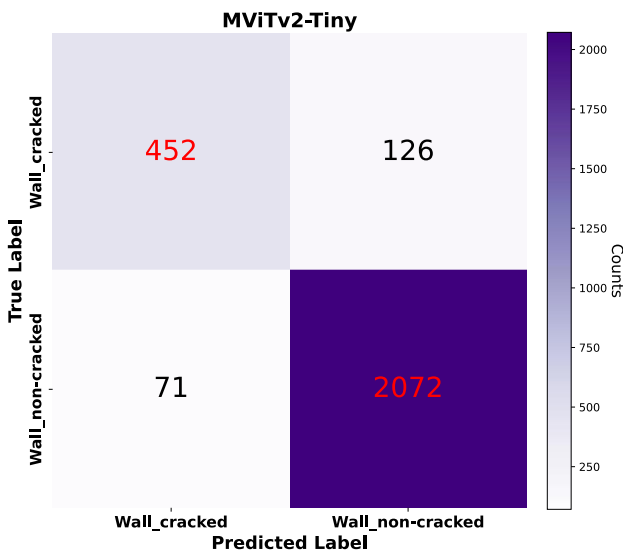


Figure 5. Confusion matrix for MViTv2-Tiny

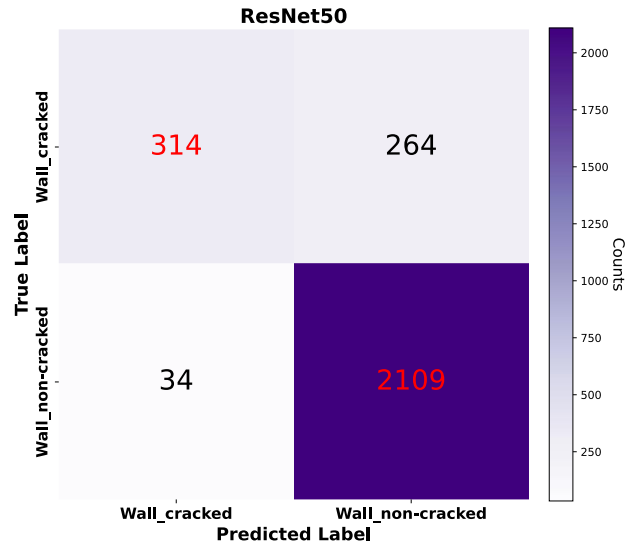


Figure 6. Confusion matrix for ResNet50

A detailed analysis of the table reveals that the MViTv2-Tiny model stands out with high accuracy (0.9276) and precision (0.9035), indicating its excellent classification ability. However, other models also exhibited strong performance. The VGG16 and MobileViT-S models are notable for their high precision and recall values, reflecting their success in minimizing false positive and false negative results. Figure 5. Confusion matrices of MViTv2-Tiny

Experimental Results of Pavement Classification

This section covers the experimental results related to the road surface (Table 4). It demonstrates the performance of deep learning architectures, including popular CNN architectures and models based on image transformation, which have become popular in recent years. This study compares and evaluates the generalization capabilities and performances of both deep learning architectures on the test data, focusing on crack detection.

Table 4. Experimental results of pavement

Model Name	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
ResNet50	0.9584	0.9272	0.8443	0.8838
ResNet34	0.9551	0.8989	0.857	0.8775
VGG16	0.9554	0.9235	0.8302	0.8744
MobileViT-S	0.9606	0.9416	0.8433	0.8897
MobileViT-XS	0.9619	0.9221	0.871	0.8958
MobileViT-XXS	0.9622	0.9360	0.8576	0.8951
MobileNetv3-Small	0.9543	0.9074	0.8409	0.8729
MViTv2-Tiny	0.9641	0.9392	0.8654	0.9008
MViTv2-Small	0.9636	0.9459	0.8562	0.8988

Table 4 presents the experimental results for the road surface with 9 deep learning models. When examining Table 4, it can be stated that all models achieve accuracy

above 95%, indicating high performance. Upon considering all metrics and making a general evaluation, the highest performance is achieved by the MViT2 architecture, particularly the MViT2-Tiny and MViT2-Small models. Among these, the MViT2-Tiny model stands out with the highest performance. On detailed inspection of Table 4, the MViT2-Tiny model demonstrates the highest accuracy rate (96.41%), emphasizing its overall high performance. It also exhibits successful performance in terms of precision (93.92%) and F1 score (90.08%), highlighting its ability to make accurate positive predictions. On the other hand, ResNet50 and ResNet34 models have high accuracy rates (95.84% and 95.51%, respectively), but their precision (92.72% and 89.89%) and F1 scores (88.38% and 87.75%) are slightly lower compared to MViT2-Tiny. These models seem to yield robust results in a large dataset. The MobileViT series models (MobileViT-S, MobileViT-XS, MobileViT-XXS) also have high accuracy rates, but their precision and F1 scores are more uneven when compared to some other models. Especially noteworthy are the precision of MobileViT-S (94.16%) and MobileViT-XXS (93.60%). The confusion matrices for these models are shown in Figure 7 and Figure 8.

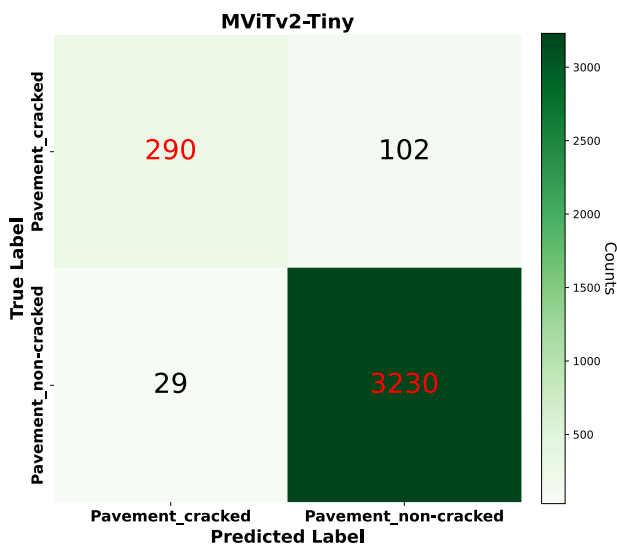


Figure 7. Confusion matrix for MViT2-Tiny

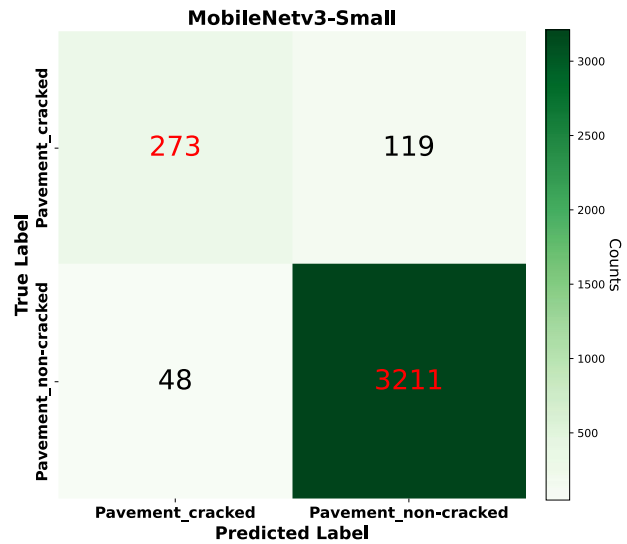


Figure 8. Confusion matrix for MobileNetv3-Small

Conclusions

Detecting cracks in structures is challenging due to lighting conditions, complex backgrounds, lighting effects, and low contrast between crack and non-crack areas. Deep learning has addressed these challenges by automatically extracting features from images and detecting cracks. This study introduces an innovative approach for autonomous crack diagnosis in various structures such as bridges, roads, and walls, using vision transformers and CNN. To enhance crack detection performance, the study combines deep CNN and ViT architectures by employing transfer learning, data augmentation, and hyperparameter optimization. Impressive results were obtained by applying this approach to the extensive SDNET2018 dataset, consisting of more than 56,000 images. In trial runs, this approach achieved remarkable accuracy rates, such as 96.41% in pavement crack detection, 92.76% in wall crack detection, and 92.81% in bridge crack detection. These findings demonstrate the promise of deep learning in crack detection and its transformative impact on civil engineering applications.

Consequently, deep learning techniques have the potential to be applied in structural analysis and detection tasks like identifying concrete cracks. However, their effectiveness relies on several factors, including the availability of accurate data, suitable algorithms, and appropriate application conditions.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared

Authors' Contributions

Şermet F: Study conception and design, interpretation of data, drafting of manuscript.

Pacal İ: Study conception and design, visualization, analysis, and interpretation of data, drafting of manuscript

References

- [1] Kovler, K., & Chernov, V. (2009). Types of damage in concrete structures. In N. Delatte, *Failure, distress and repair of concrete structures* (pp. 32-56). Boca Raton: Woodhead Publishing Limited.
- [2] Larosche, C. J. (2009). Types and causes of cracking in concrete structures. In N. Delatte, *Failure, distress and repair of concrete structures* (pp. 57-83). Boca Raton: Woodhead Publishing Limited.
- [3] Ghali, A., Favre, R., & Elbadry, M. (2002). *Concrete Structures- Stresses and Deformation. Spon Press.*
- [4] ACI Committee 201. (2001). Guide to Durable Concrete. In ACI Manual of Concrete Practice Part 1 -Materials and General Properties of Concrete (pp. 20 1.2R1-20 1.2R41). *Farmington Hills: American Concrete Institute.*
- [5] Daghighi, A. (2020). Full-Scale Field Implementation of Internally Cured Concrete Pavement Data Analysis for Iowa Pavement Systems. *Creative Components*. 638. [https:// lib. dr. iasta te. edu/ creat iveco mponen ts/ 638](https://lib.dr.iastate.edu/creative-components/638).
- [6] Hosseini, S., & Smadi, O. (2020). How prediction accuracy can affect the decision-making process in pavement management system. *Infrastructures*. [https:// doi. org/ 10. 31224/ osf. io/ t28ue](https://doi.org/10.31224/osf.io/t28ue).
- [7] Abukhalil, Y. B. (2019). Cross asset resource allocation framework for pavement and bridges in Iowa. *Graduate Theses and Dissertations*. 16951. [https:// lib. dr. iasta te. edu/ etd/ 16951](https://lib.dr.iastate.edu/etd/16951).
- [8] N. F. Hawks, and T. P. Teng. (2014). Distress identification manual for the long-term pavement performance project. *National academy of sciences*.
- [9] R. Amhaz, S. Chambon, J. Idier, and V. Baltazart. (2016). Automatic crack detection on two-dimensional pavement images: an algorithm based on minimal path selection," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 10, pp. 2718-2729.
- [10] I. Abdel, O. Abudayyeh, and M. E. Kelly. (2003). Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges," *J. Computer Civil Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 255-263.
- [11] P. Lad, and M. Pawar. (2016). Evaluation of railway track crack detection system," in Proc., *IEEE ROMA*, pp. 1-6.
- [12] E. Aslan ve Y. Özüpak, "Classification of Blood Cells with Convolutional Neural Network Model", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 13, sy. 1, ss. 314–326, 2024, doi: 10.17798/bitlisfen.1401294.
- [13] Lubbad, M. A., Kurtulus, I. L., Karaboga, D., Kilic, K., Basturk, A., Akay, B., ... & Pacal, I. (2024). A Comparative Analysis of Deep Learning-Based Approaches for Classifying Dental Implants Decision Support System. *Journal of Imaging Informatics in Medicine*, 1-22.
- [14] Kunduracioglu, I., & Pacal, I. (2024). Advancements in deep learning for accurate classification of grape leaves and diagnosis of grape diseases. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 1-20.
- [15] Pacal, I. (2024). A novel Swin transformer approach utilizing residual multi-layer perceptron for diagnosing brain tumors in MRI images. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 1-19.
- [16] Loverdos, D., & Sarhosis, V. (2022). Automatic image-based brick segmentation and crack detection of masonry walls using machine learning. *Automation in Construction* 140, 104389.
- [17] Ali, R., Chuah, J-H., Abu Talip, M-S., Mokhtar, N., Shoaib, M-A. (2022). Structural crack detection using deep convolutional neural networks. *Automation in Construction* 133, 103989.
- [18] Xu, Z., Guan, H., Kang, J, Xiangda, L., Ma, L., Yu, Y., Chen, Y., Li, J. (2022). Pavement crack detection from CCD images with a locally enhanced transformer network. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 110,102825.
- [19] Chaiyasarn, K., Buatik, A., Mohamad, H., Zhou, M., Kongsilp, S., Poovarodom, N. (2022). Integrated pixel-level CNN-FCN crack detection via photogrammetric 3D texture mapping of concrete structures. *Automation in Construction*, 140, 104388 Available.
- [20] Yu, Y., Samali, B., Rashidi, M., Mohammadi, M., Nguyen, T.N., Zhang, G. (2022). Vision-based concrete crack detection using a hybrid framework considering noise effect. *Journal of Building Engineering*, 61, 105246.
- [21] Duo Ma, Hongyuan Fang, Niannian Wang, Bingham Xue, Jiaxiu Dong & Fu Wang (2022). A real-time crack detection algorithm for pavement based on CNN with multiple feature layers. *Road Materials*

- and *Pavement Design*, 23:9, 2115-2131, DOI: 10.1080/14680629.2021.1925578.
- [22] Müller, A., Karathanasopoulos, N., Roth, C.C., Mohr, D. (2021). Machine Learning Classifiers for Surface Crack Detection in Fracture Experiments. *International Journal of Mechanical Sciences* 209, 106698.
- [23] Fang, X., Liu, G., Wang, H., Xie, Y., Tian, X., Leng, D., Mu, W., Ma, P., Li, G. (2022). Fatigue crack growth prediction method based on machine learning model correction. *Ocean Engineering* 266, 112996.
- [24] Hamidia, M., Mansourdehghan, S., Asjodi, A-H., Dolatshahi, K-M. (2022). Machine learning-based seismic damage assessment of non-ductile RC beam-column joints using visual damage indices of surface crack patterns. *Structures* 45, 2038–2050.
- [25] Aravind, N., Nagajothi, S., Elavenil, S. (2021). Machine learning model for predicting the crack detection and pattern recognition of geopolymer concrete beams. *Construction and Building Materials* 297, 123785.
- [26] Han, X., Zhao, Z., Chen, L., Hu, X., Tian, Y., Zhai, C., Wang, L., Huang, X. (2022). Structural damage-causing concrete cracking detection based on a deep-learning method. *Construction and Building Materials* 337, 127562.
- [27] Laxman, K. C., Tabassum, N., Ai, L., Cole, C., Ziehl, P. (2023). Automated crack detection and crack depth prediction for reinforced concrete structures using deep learning. *Construction and Building Materials* 370, 130709.
- [28] Zhang, J., Cai, Y-Y., Yang, D., Yuan, Y., He, W-Y., Wang, Y-J. (2023). MobileNetV3-BLS: A broad learning approach for automatic concrete surface crack detection. *Construction and Building Materials* 392, 131941.
- [29] Martinez-Rios, E.A., Bustamante-Bello, R., Navarro-Tuch, S.A. (2023). Generalized Morse Wavelets parameter selection and transfer learning for pavement transverse cracking detection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 123, 106355.
- [30] Xu, G., Yue, Q., Liu, X. (2023). Deep learning algorithm for real-time automatic crack detection, segmentation, qualification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 126, 107085.
- [31] Yuan, X., Cao, Q., Amin, M-N., Ahmad, A., Ahmad, W., Althoey, F., Deifalla, A-F. (2023). Predicting the crack width of the engineered cementitious materials via standard machine learning algorithms. *Journal of Materials Research and Technology*, 24: 6187 – 6200.
- [32] Iraniparast, M., Ranjbar, S., Rahai, M., Nejad, F-M. (2023). Surface concrete cracks detection and segmentation using transfer learning and multi-resolution image processing. *Structures* 54, 386–398.
- [33] Katsigiannis, S., Seyedzadeh, S., Agapiou, A., Ramzan, N. (2023). Deep learning for crack detection on masonry façades using limited data and transfer learning. *Journal of Building Engineering* 76, 107105.
- [34] Pacal, I. (2024). Enhancing crop productivity and sustainability through disease identification in maize leaves: Exploiting a large dataset with an advanced vision transformer model. *Expert Systems with Applications*, 238, 122099.
- [35] E. Aslan, M.A. Arserim, A Uçar. (2023). Development of Push-Recovery control system for humanoid robots using deep reinforcement learning. *Ain Shams Engineering Journal*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102167>.
- [36] Lubbad, M., Karaboga, D., Basturk, A., Akay, B. A. H. R. İ. Y. E., Nalbantoglu, U., & Pacal, I. (2024). Machine learning applications in detection and diagnosis of urology cancers: a systematic literature review. *Neural Computing and Applications*, 1-25.
- [37] Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P. (1998). Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. *Proc. IEEE*, 86, 2278–2324.
- [38] Kurtulus, I. L., Lubbad, M., Yilmaz, O. M. D., Kilic, K., Karaboga, D., Basturk, A., ... & Pacal, I. (2024). A robust deep learning model for the classification of dental implant brands. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, 101818.
- [39] Karaman, A., Pacal, I., Basturk, A., Akay, B., Nalbantoglu, U., Coskun, S., ... & Karaboga, D. (2023). Robust real-time polyp detection system design based on YOLO algorithms by optimizing activation functions and hyper-parameters with artificial bee colony (ABC). *Expert systems with applications*, 221, 119741.
- [40] Pacal, I. (2024). MaxCerVixT: A Novel Lightweight Vision Transformer-Based Approach for Precise Cervical Cancer Detection. *Knowledge-Based Systems*: 111482.
- [41] Dorafshan, S., Thomas, R.J., Maguire, M. (2018). SDNET2018: An Annotated Image Data Set for non-contact concrete crack detection using deep convolutional neural networks. *Data in Brief*, 21, 1664–1668.

- [42] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
- [43] Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*.
- [44] Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L. C., Chen, B., Tan, M., ... & Adam, H. (2019). Searching for mobilenetv3. *In Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision* (pp. 1314-1324).
- [45] Mehta, S., & Rastegari, M. (2021). Mobilevit: light-weight, general-purpose, and mobile-friendly vision transformer. *arXiv preprint arXiv:2110.02178*.
- [46] Li, Y., Wu, C. Y., Fan, H., Mangalam, K., Xiong, B., Malik, J., & Feichtenhofer, C. (2022). Mvitv2: Improved multiscale vision transformers for classification and detection. *In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4804-4814).



Diyarbakır Meryem Ana Kilisesi'nin Yapım Teknikleri

*Construction Techniques of Diyarbakır Virgin Mary Church*Sultan SAYLIK^{1*}, Neslihan DALKILIÇ²¹ Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, sultansaylk@gmail.com
ORCID: 0009-0005-7647-3773² Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Diyarbakır, nesdalkilic@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3920-9904

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 17 Mart 2024
Revizyon 18 Nisan 2024
Kabul 18 Nisan 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Diyarbakır, Meryem Ana Kilisesi,
Yapım tekniği, Malzeme.

ÖZ

Diyarbakır Meryem Ana Kilisesi, 6. yüzyılda inşa edilmiştir. Yapıldığı dönem tetrakonch plan tipinde olan kilise, zamanla uğradığı değişimler sonucunda bugünkü durumuna ulaşmıştır. Bugün, sadece kilisenin ilk yapıldığı dönemde mevcut olan apsis bölümü ve bazı dış duvar parçaları ayakta kalmıştır. Yapının ilk yapıldığı dönemde apsis olduğu düşünülen bölüm, daha sonra yapılan değişikliklerle narteks, naos ve apsis bölümlerinden oluşan bir kiliseye dönüştürülmüştür. Meryem Ana Kilisesi'nde farklı dönemlere bağlı olarak farklı malzemeler ve yapım teknikleri uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan incelemeler, yapının günümüze ulaşan mevcut durumu üzerinden analiz edilerek sunulmuştur. Tüm yapım detayları fotoğraflar ve çizimlerle detaylandırılarak anlatılmıştır. Kilisenin yapım teknikleri; döşeme, duvarlar, ayak ve sütunlar, kubbe, kemerler, kapı ve pencereler ile çan kulesi başlıkları altında incelenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 March 2024
Received in revised form 18 April 2024
Accepted 18 April 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Diyarbakır, Virgin Mary Church,
Construction technique, Material.

ABSTRACT

Diyarbakır Virgin Mary Church was built in the 6th century. The church, which had a tetraconch plan type when it was built, has reached its present state as a result of the changes it has undergone over time. Today, only the apse section and some exterior wall fragments that were present when the church was first built have survived. The section which was thought to be the apse in the first period of the building was transformed into a church consisting of narthex, naos and apse sections with the changes made later. Different materials and construction techniques were applied in the Church of Virgin Mary depending on different periods. The investigations carried out within the scope of this study are analysed and presented through the current state of the building. All construction details are explained in detail with photographs and drawings. The construction techniques of the church are analysed under the headings of flooring, walls, piers and columns, dome, arches, doors and windows and bell tower.

Doi: 10.24012/dumf.1454529

* Sorumlu Yazar

Giriş

Meryem Ana Kilisesi, Diyarbakır Suriçi'nde, Lalebey Mahallesi'nde yer alır. Suriçi bölgesinin güneybatısında konumlandırılmıştır (Şekil 1). Guyer (1933), Kleinbauer (1973) ve Keser-Kayaalp (2013), Diyarbakır Meryem Ana Kilisesi ile ilgili yaptıkları araştırmalarda kilisenin 3. yy. ile 7. yy. tarihleri arasındaki dönem olarak tanımlanan Erken Bizans döneminde yapılmış olabileceğini belirtmiş, mevcut kalıntılar bu düşünceyi güçlendirmiştir [1-3].



Şekil 1. Meryem Ana Kilisesi'nin konumu Google Earth'deki hava fotoğraflarından alınmıştır, 2022 [4]

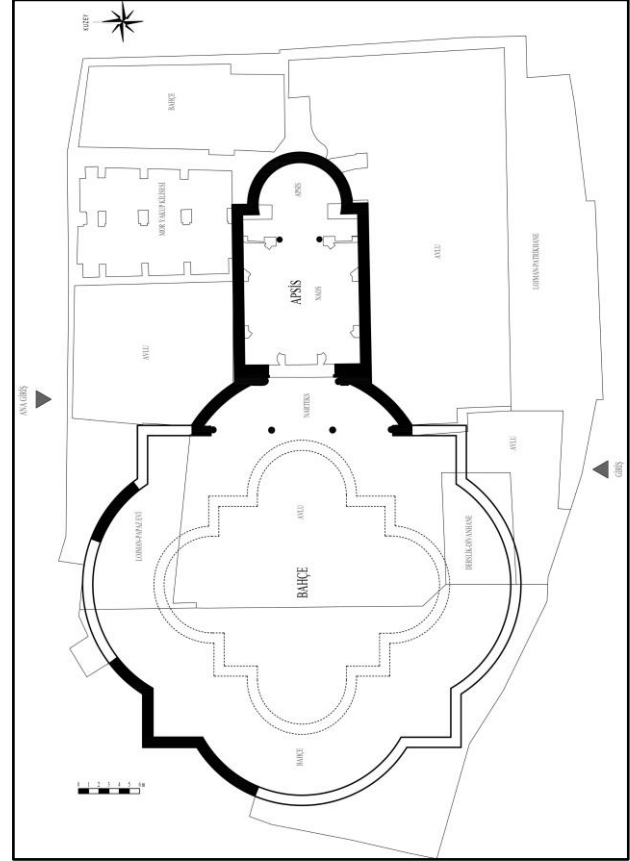
Getrude Bell, yapının ilk yapıldığı dönemlerde dış sınırlarının dairesel bir hat olduğunu, kilisenin batısında dairesel açık bir alan bulunduğunu ve mezarların bu alanda yer aldığını belirtmiştir [5]. Bell'in 1909 yılında arşivlediği kilise fotoğrafları bu verilerin bir kısmını doğrulamaktadır. Strzygowski, bulunan kalıntıların Meryem Ana Kilisesi'ni büyük bir kilise olarak tanımladığını [6], Guyer (1933) ise kilise planının dikdörtgen nef ile trikonchun birleşiminden oluştuğunu belirtmiştir [1]. Kleinbauer (1973), Guyer'in savunduğu bilgileri desteklemiş, Meryem Ana Kilisesi'nin koridorlu tetrakonch plan düzeninde olduğunu söyleyerek günümüze ulaşan akantus yapraklı sütun başlıklarının 6. yüzyıl stili olduğunu ifade etmiştir [2].

Keser-Kayaalp (2013), kilisenin mevcut durumunda apsis bölümünde bulunan akantus yapraklı sütun başları ile kemer kalıntılarının ve naos bölümündeki mermer dikmelerin (mullion) 6. yüzyılda yapılan stilde olduğunu belirtmiş; yapının ilk yapıldığı dönemlerde tetrakonch plan düzeninde, anıtsal bir mezar kilise olarak kullanılmış olmasını yüksek bir ihtimal olarak gördüğünü söylemiştir [3].

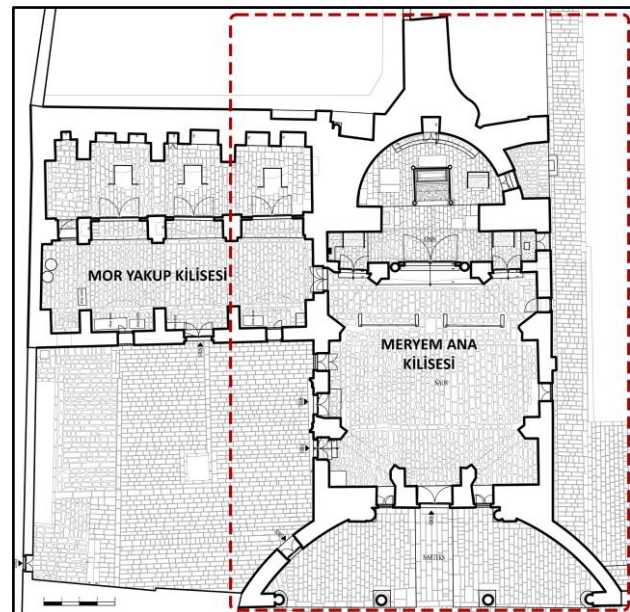
Bu çalışma kapsamında, kilisenin yakın çevresinde yapılan incelemeler sonucunda, tetrakonch plan tipini destekleyen bir duvar kalıntısı daha tespit edilmiş, restitüsyon çizimi güncellenmiştir (Şekil 2).

Meryem Ana Kilisesi, çeşitli dönemlerde değişimlere uğramış, onarımlar geçirmiştir. Erken Bizans döneminde

tetrakonch plan tipinde olan kilise, geçirdiği yıkımlar, yangınlar ve değişimler sonucu bugünkü mevcut durumuna dönüşmüştür. Bugün, kilisenin sadece 6. yüzyıl tetrakonch plan tipinde bulunan apsis bölümü ve bazı dış duvar parçaları ayakta kalmıştır. Yapının ilk yapıldığı dönemdeki apsis bölümü olduğu düşünülen kısım; narteks, naos ve apsis bölümlerinden oluşan bir kiliseye dönüştürülmüştür. Kiliseye içten bağlantılı Mor Yakup Kilisesi daha sonradan ek olarak yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Meryem Ana Kilisesi'nin restitüsyon planı



Şekil 3. Meryem Ana Kilisesi ve kiliseyle bağlantılı olan Mor Yakup Kilisesi'nin planı, 2022

Mango, Bizans yapı tekniğini iki gruba ayırmıştır. İlki; Anadolu'nun büyük bir kısmı ile sınır bölgelerinde, Suriye-Filistin'de, Ermenistan'da ve Gürcistan'da kullanılan kesme taş ile yapılmış duvar tekniğidir. Diğeri ise; Anadolu'nun batı bölümlerinde, Konstantinopolis'te, İtalya'da ve Balkanlar'da kullanılmış olan tuğla ve moloz taş ile yapılmış olan duvar tekniğidir. En yaygın teknik olarak kullanılan tuğla-moloz taş örgü sistemi, Bizans yapılarının hemen hemen hepsinde 14. yüzyıla kadar yer almıştır. Sonraki dönemlerde tuğla bulunmadığından moloz taş kullanılmıştır. Kemer, tonoz ve kubbeler tuğlayla yapılmıştır. Harç olarak da kireç, kum ve kırık tuğladan oluşan karışım kullanılmıştır. Erken Bizans dönemi kiliselerinde mermer yoğun olarak bulunmaktadır. Sütun, silme ve baştabanlarda özellikle tercih edilen mermerin aynı zamanda kapı üst atkısı ile dikmelerinde, vaiz kürsülerinde, pencere dikmelerinde (mullion), zemin döşemesinde, duvar kaplamalarında da kullanıldığı bilinmektedir. Bu dönem yapılarının görkemi, kullanılan mermerin yoğunluğuna bağlı olarak belirlenmiştir [7].

Meryem Ana Kilisesi, dönemsel olarak değişikliklere uğramış; farklı dönemlere bağlı olarak farklı malzemeler ve yapım teknikleri uygulanmıştır. Yapılan değişikliklerin ne zaman yapıldığı konusunda bilinen net bir bilgi yoktur. Bu çalışma kapsamında yapılan incelemeler, yapının günümüze ulaşan mevcut durumu üzerinden analiz edilerek sunulmuştur. Tüm yapım detayları fotoğraflar ve çizimlerle anlatılmıştır.

Kilisede Uygulanan Yapım Teknikleri

Kilisenin ana yapım malzemesi, bazalt başta olmak üzere kireç taşı, mermer, tuğla ve kireç esaslı harç malzemesinden oluşmaktadır. Kilisenin duvarlarında genel olarak bazalt malzeme kullanılmıştır. Bazalt duvarlarda tuğla hatıllar yapılmıştır. Tuğla aynı zamanda bazı kemerlerin örgüsünde de kullanılmıştır. Yapıda farklı alanlarda kullanılan diğer bir malzeme kireç taşıdır. Yapıdaki bazı yazıtlar ve mullion taşı mermerdendir. Kilisede kullanılan malzemeler, yapım teknikleri anlatılırken detaylı sunulmuştur.

Kilisenin yapım teknikleri; döşeme, duvarlar, ayak ve sütunlar, kubbe, kemerler, kapı ve pencereler ile çan kulesi başlıkları altında incelenmiştir. Yapının temelleri ile ilgili bugüne kadar kapsamlı bir araştırma yapılmamıştır. İleride yapılacak bilimsel araştırma kazılarında bu bilgilere ulaşmak mümkün olacaktır.

Döşeme

Yapının tüm döşemeleri yakın zamanda yenilenmiştir. Zeminde genelde ince yonu bazalt taş kullanılmıştır. Yatay olarak yerleştirilmiş olan taşları dikey kesen taş dizileri bulunmaktadır. Taşların uzunlukları genellikle 20 cm ile 120 cm boyutları arasında değişmektedir.

Duvarlar

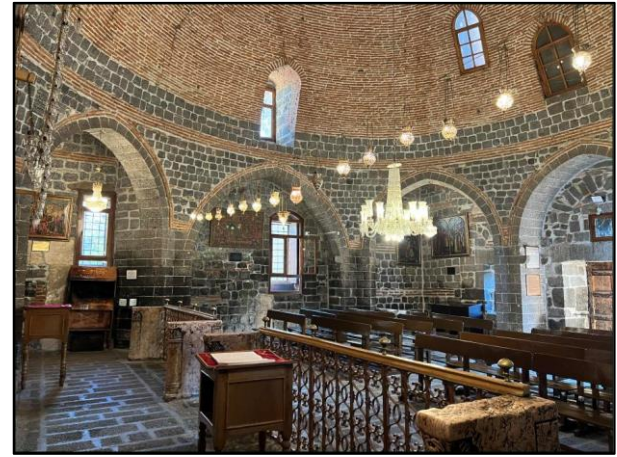
Kilisenin batı bölümü olan bugünkü narteks duvarı, mevcut kiliseden daha yüksektir. Yapının eski

dönemlerinden kalma bir kalıntısı olduğu düşünülen bu duvarın ana yapıdan daha yüksek olması, kilisenin önceki dönemlerde daha yüksek bir üst örtüsünün bulunduğunu göstermesi açısından önemlidir (Şekil 4).



Şekil 4. Kilisenin narteksi ve giriş bölümü, 2022.

Naos bölümü merkezi plan tipindedir ve uzunluğu 11.80 m ve genişliği 11.64 m ölçüleri ile kare formuna yakındır. Naos bölümü duvarlarında malzeme olarak kaba yonu bazalt, ince yonu bazalt ve tuğla kullanılmıştır (Şekil 5).



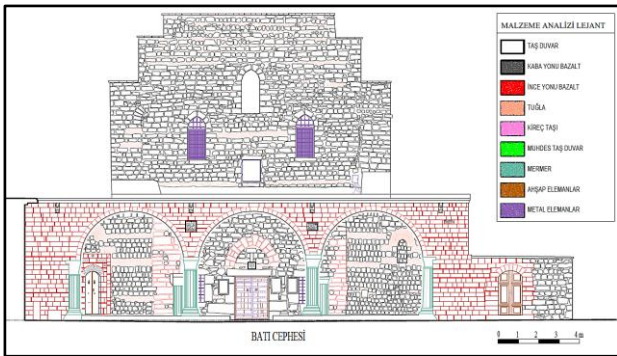
Şekil 5. Kilisenin naos bölümü, 2022.

Apsis duvarlarında bazalt, mermer, kireç taşı ve tuğla malzeme kullanılmıştır. Apsisin dış duvarları oval hat çizen bir yapıdayken, ek duvarlar ve payandalarla desteklenmiştir (Şekil 3). Apsis bölümünün her iki yanında bulunan duvarlarında, yarım kubbe kemerleri destekleyen, özgün yapıya ait olduğu düşünülen, kireç taşıdan yapılmış akantus yapraklı 2 adet sütun başlığı ve bir bölümü yok olmuş, süslemeli kemer izleri bulunmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Apsis bölümünde bulunan sütun başlığı ve kemer kalıntıları, 2022.

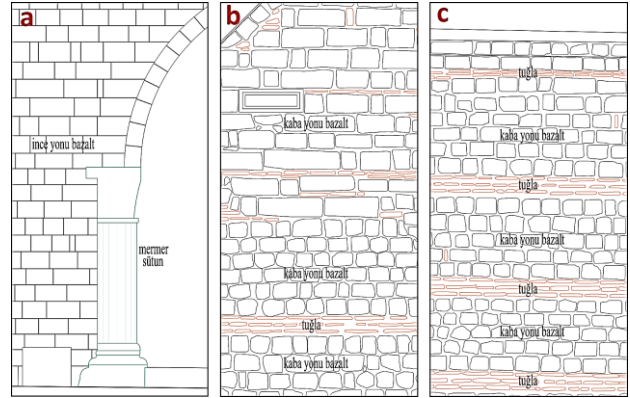
Kilisenin batı cephesinde, naos bölümüne açılan ana kapının bulunduğu duvarda, iki mermer sütun üzerine oturmuş, bazalttan oluşan bir beşik kemer vardır. Naosa açılan ana giriş kapısının her iki yanında birer pencere bulunmaktadır. Bu duvarda bulunan her iki pencerenin de üzerinde beşik kemer, ana kapı üzerinde ise sivri kemer mevcuttur. Cephede bulunan kapı ve pencere çerçeveleri ile lentoları, uzun ve gözeneksiz bazalttan yapılmıştır. Cephede, iki sıra tuğla örgüsünün oluşturduğu beşik kemerin altında, kapatılmış pencere izi bulunmaktadır. Bu kemer sırası ve pencere izi, cephenin diğer tarafında da vardır. Bu cephede, narteksin üst örtüsünü taşıyan sütun ve kemerlerin arasında bulunan duvarlarda ince yonu bazalt kullanılmıştır (Şekil 4 ve 7, 8-a).



Şekil 7. Meryem Ana Kilisesi'nin batı cephesinin malzeme analizi paftası, 2022.

Kilisenin güney cephesinde malzeme olarak; kaba yonu bazalt, ince yonu bazalt, tuğla ve kireç taşı kullanılmıştır. Cephenin alt bölümünde kaba yonu bazalt kullanılırken, yukarıya doğru çıkıldıkça daha düz formlarda bazalt taş kullanıldığı görülmektedir. Taş örgülerinde, belli yerlerde daha uzun taşlar (102 cm'ye kadar) bulunmaktadır. Güney cephede, diğer tüm cephelerde de kullanılmış olan 3 sıralı tuğla hatıllar yapılmıştır (Şekil 8-b). Duvar örgü sisteminde genel olarak aşağıda küçük kaba yonu bazalt dizisi sonra tuğla hatıl, hatılın üst tarafında yine küçük boyutlarda kaba yonu bazalt

dizisinden sonra uzun bazalt taşların kullanıldığı görülmektedir. Tuğla sıraları cepheye hareketlilik katmasının yanı sıra duvarda hatıl görevi de görmektedir (Şekil 8-b, 8-c, 9).



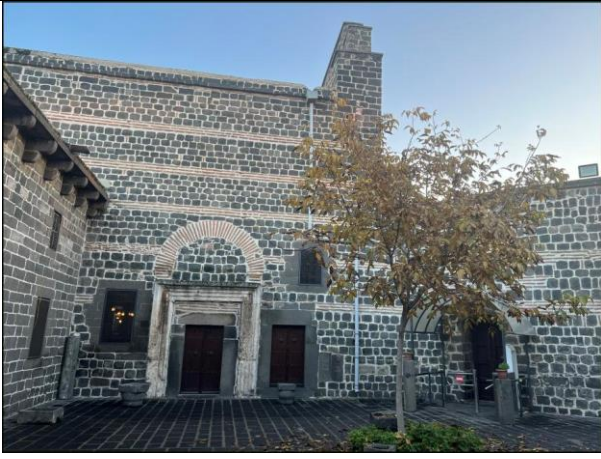
Şekil 8. Kilisenin batı (a), güney (b) ve kuzey (c) cephesi duvarlarında bulunan duvar örgüleri

Kilisenin güney cephesinde tuğla malzemeden oluşan beşik kemer bulunmaktadır. Bu kemerin altında, ince yonu bazaltla örülmüş olan duvarda, 95-178 cm ölçülerinde dikdörtgen bir pencere vardır. Bu alanda bulunan kemer ve pencerenin düzenindeki farklılıklar, farklı dönemlerde yapıldıklarını gösterebilir. Yine bu bölümde, kemerin başlangıç ve bitiş hizalarında, cephede dikey olarak bulunan, iki sıra kireç taşı yer alır. Bu kireç taşlarından soldaki kemer hizasına kadar çıkarken, sağdaki ince yonu bazalt örgüsüyle kesilmiştir. Cephede bulunan malzeme boyutları ve farklılıkları, değişen duvar kalınlıkları ve eklenen payandalar cephede farklı dönemlerde müdahale yapıldığını göstermektedir.



Şekil 9. Kilisenin güney cephesi, 2022.

Kilisenin kuzey cephesinde Erken Bizans dönemi örgü sistemiyle benzerlik gösteren bazalt dizilimleri arasında tuğla hatılların kullanıldığı düzen görülmektedir. Cephede naosa açılan kapının üzerinde tuğla dizilimlerinin oluşturduğu beşik kemer bulunmaktadır (Şekil 10). Bu kemerin üzerinde bir sıra kaba yonu bazalt sırası üzerinde 3 sıra tuğla hatıl kullanılmıştır. Hatılların üzerinde 5 sıra kaba yonu bazalt dizilimi görülürken üzerinde tekrar 3 sıra tuğla hatıl dizilimi oluşturulmuştur. Bu dizilim belli bir düzende dama kadar devam etmektedir (Şekil 8-c).



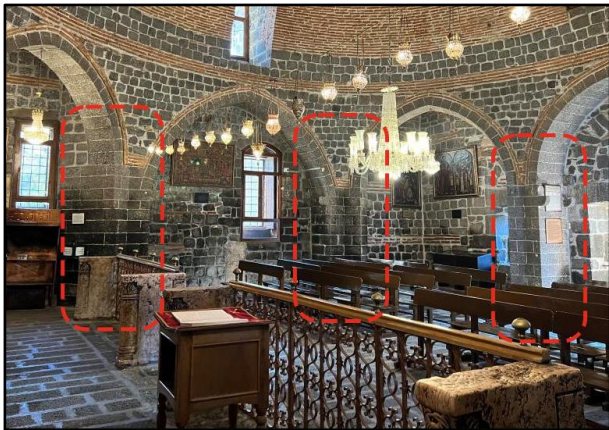
Şekil 10. Kilisenin kuzey cephesi, 2022.

Kilisenin doğu cephesinin alt bölümlerindeki duvar örgülerinde kaba yonu bazalt kullanılırken, üst taraflara doğru daha düzenli işlenmiş kaba yonu bazalt örgü de kullanılmıştır. Bu örgüler arasında tuğla hatıllar vardır. Cephede payandalar bulunmaktadır. Bu payandalar kaba yonu bazaltla örülmüştür. Cephede yer yer kireç taşı da kullanılmıştır. Payandaların üstü çimento esaslı şapla kaplanmıştır.

Duvarlardaki farklı boyutlarda ve çeşitte malzeme kullanımı, yapının dönemsel olarak geçirdiği değişikliklerin de bir göstergesidir.

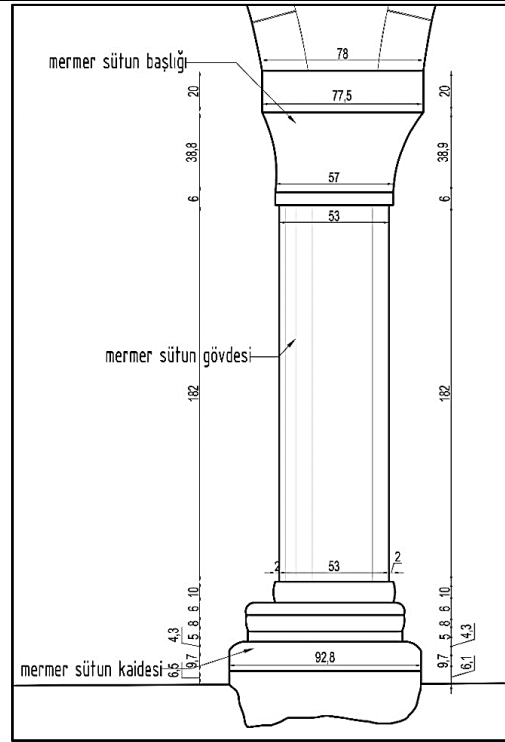
Ayak ve Sütunlar

Ayaklar, sütun işlevi gören, düşey taşıyıcı yapı elemanıdır. Serbest ya da duvara bitişik olarak yapılır. Çoğunlukla dörtgen ya da çokgen kesitli olur [8]. Naos bölümünde 8 adet ayak bulunmaktadır. Ayaklardan 6 tanesi dış duvara bitişik inşa edilmiştir. İki ayak ise apsis ile naosu ayıran duvara bitişiktir (Şekil 11).



Şekil 11. Naos bölümünde bulunan ayaklar, 2022

Kilisenin girişinde yer alan ve ana giriş kapısının da bulunduğu narteks bölümü 4 adet dairesel mermer sütundan (Şekil 12) ve bu sütunların desteklediği, bazalttan yapılan 3 adet beşik kemerden oluşmaktadır (Şekil 4)



Şekil 12. Narteks bölümündeki sütunlardan biri

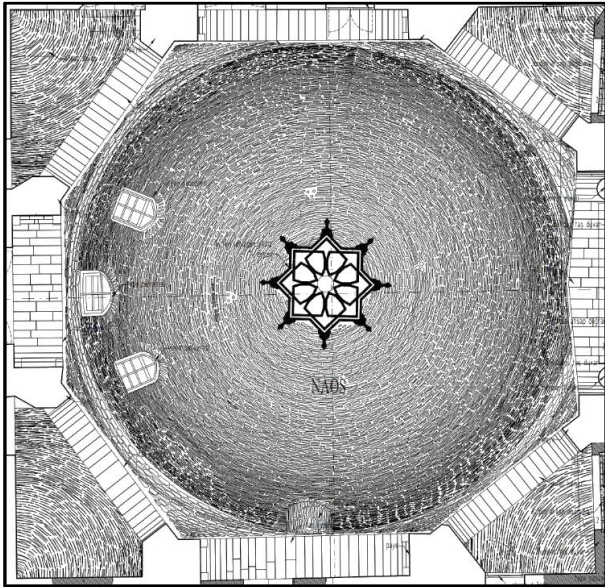
Kilisenin naos bölümünde apsis geçişte bir ayırıcı gibi kullanılan mermer yapı elemanları ve metal korkuluklar (templon) bulunmaktadır. Bu bölümde kullanılan mermer yapı elemanları 6. yüzyılda pencere aralarında kullanılan mermer dikmelerdir (mullion) (Şekil 13).



Şekil 13. Naos bölümündeki mermer mullionlar, 2022

Kubbe

Naos bölümü kubbe ile örtülüdür. Kubbenin çapı 10.23 metredir. Kubbe tuğla malzemenen yapılmıştır. Tuğla; boyutlarının küçüklüğü, hafif, kolay taşınır olması, kubbe örgüsünün yapımında kolaylık sağlaması ve sağlamlığından dolayı tercih edilmiştir. Tuğla malzemenen yapılmış olan kubbenin oturduğu kubbe kasnağını, aralıkları eşit olmayan 8 adet, bazalttan yapılmış ayak taşımaktadır. Ayaklar ve kubbe, yapıya sonradan eklenmiştir. Kubbenin en üst noktasında yıldız şeklinde bir ayna mevcuttur (Şekil 14).

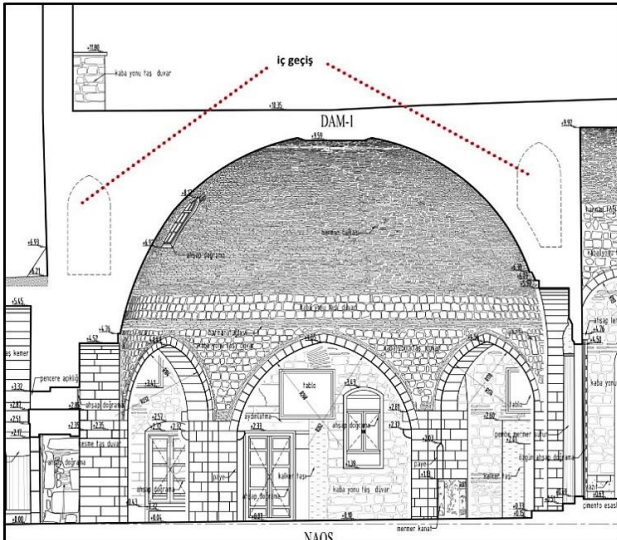


Şekil 14. Naos bölümünü örten tuğla kubbe

Kubbeyi taşıyan 8 adet ayak, kemerin başladığı hizaya kadar düzgün kesme taşlarla örülmüştür. Kemer açıklıklarında kullanılan sivri kemerlerin ilk sırasında düzgün kesme taş kullanılırken üstünde iki sıra tuğla örülmüştür. Kubbeye geçiş pandantiflerle sağlanmıştır. Sivri kemerler arasında bulunan pandantifler kaba yonu bazaltla örülmüştür. Pandantiflerin bittiği yerde, üç sıra örülmüş tuğla hatıl kubbeyi çevrelemektedir. Hatılın üstünde, kubbenin eteğinde, 3 sıra kaba yonu bazalt kullanılmış ve sonrasında kubbenin tamamı tuğla ile örülmüştür. Kubbenin yerden yüksekliği 946 cm'dir.

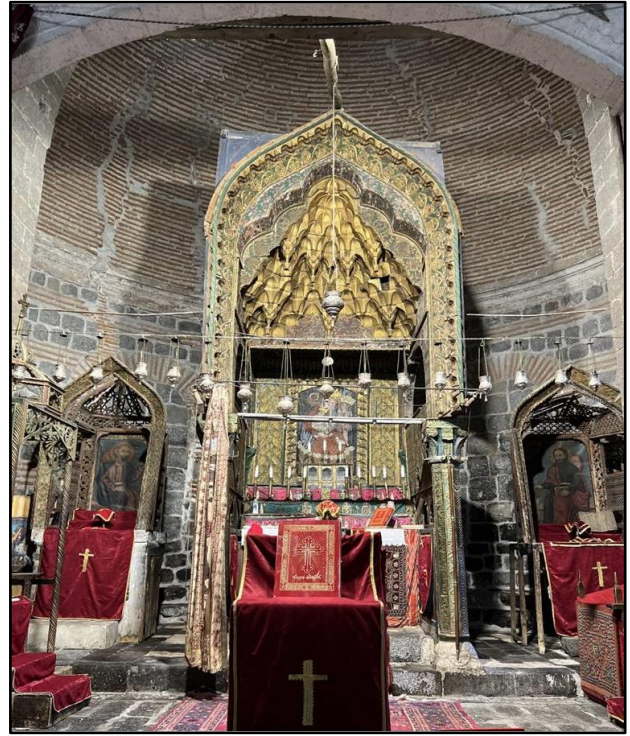
Sekizgen planın kemer aralıkları eşit değildir ve apsis bölümüne geçiş sağlayan kemer diğerlerine göre daha yüksek ve genişliği daha fazladır (463 cm). Diğer açıklıklar sırasıyla soldan sağa doğru 308 cm, 431 cm, 329 cm, 314 cm, 329 cm, 437 cm ve 301 cm'dir.

Naosu örten kubbenin duvarının içinde kubbeyi dolanan içten bağlantılı bir geçiş bulunmaktadır (Şekil 15). Çift cidarlı kubbe oluşturan bu bölümün, kubbeye içten boşluk oluşturduğu için kubbenin yükünü hafifletmek amacıyla yapıldığı söylenebilir.



Şekil 15. Naosu örten kubbe içinde bulunan geçiş

Apsis bölümünün üst örtüsü yarım kubbedir ve tuğla malzemedir yapılmıştır. Kubbenin çapı 824 cm'dir. Yerden yüksekliği ise 1012 cm'dir (Şekil 16).



Şekil 16. Apsis ve üst örtüsü, 2022

Geçmişte Dicle Nehri kenarındaki atölyelerde harman tuğla üretimi yapıldığı; tarihi yapıların özellikle kubbe, tonoz ve kemer gibi eğrisel örtülerinde ve öğelerinde pişmiş harman tuğlasının kullanıldığı bilinmektedir [9].

Kemerler

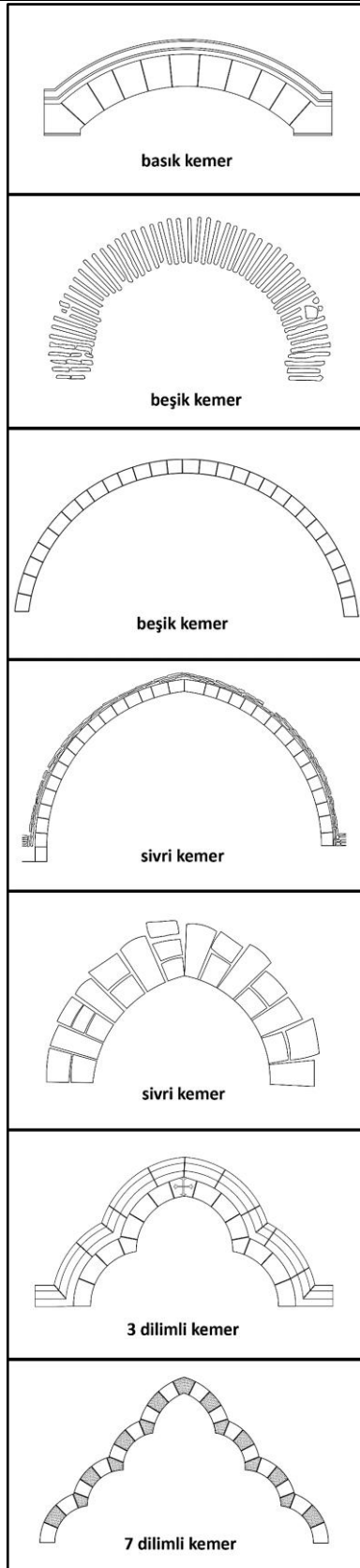
Kilisede basık kemer, beşik kemer, sivri kemer, 3 dilimli ve 7 dilimli kemer kullanılmıştır (Şekil 17).

Nartekste üst örtüyü taşıyan kemerler beşik kemerdur. Tek sıra bazalt diziliminden oluşan kemerin üzerinde ince yonu bazalt taş örgüleri bulunmaktadır.

Kilisenin naos bölümünde kubbeyi taşıyan, bazalttan örülmüş sivri kemerler vardır. Bu sivri kemeri oluşturan bazalt dizilimlerinin üzerinde iki sıra tuğla dizilimi bulunmaktadır.

Avludan naos bölümüne geçişi sağlayan kapının üzerinde tuğla dizilimlerinden oluşan sağır beşik kemer vardır. Bu kemerin alt ve üst taraflarındaki duvar örgüleri kaba yonu bazalttan oluşmaktadır.

Kilisede avludan Mor Yakup Kilisesi bölümüne geçişi sağlayan kapının üzerinde kireç taşından yapılmış üç dilimli kemer bulunmaktadır. Ayrıca Mor Yakup Kilisesi'nin içinde basık kemerler vardır.

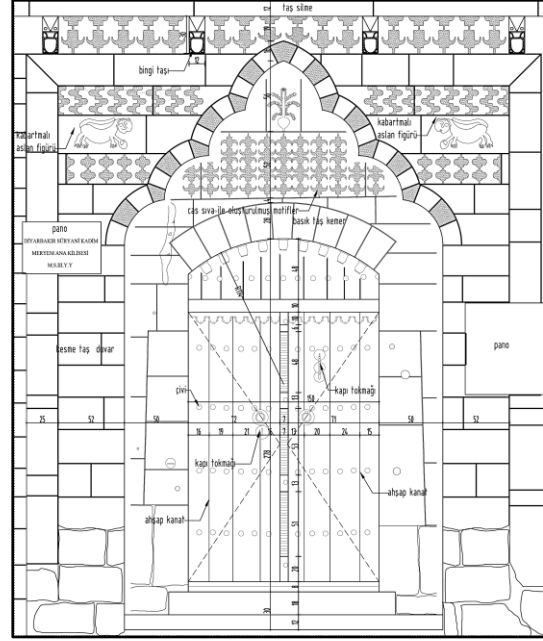


Şekil 17. Kilisede bulunan kemer türleri

Kapı ve pencereler

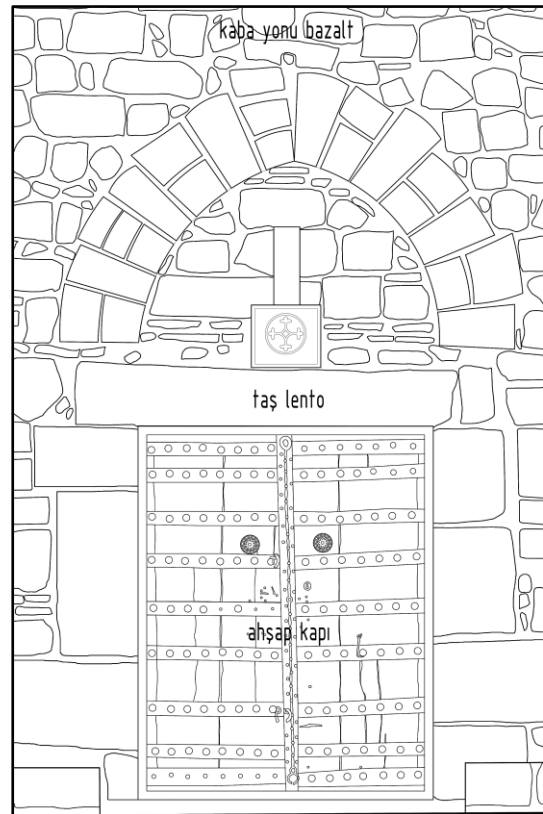
Diyarbakır Meryem Ana Kilisesi'nin avlusuna açılan dış kapı, yapı grubunun ana giriş kapısıdır. Ahşap olan kapının üstünde, dokuz adet bazalt taştan oluşmuş basık kemer bulunmaktadır. Bu kemerin üst tarafında kireç taşından yapılmış süslemeler görülmektedir. Süslemeleri

çerçeveleyen 7 dilimli kemer bulunmaktadır. Bu kemerin sağında ve solunda aslan figürü vardır (Şekil 18).



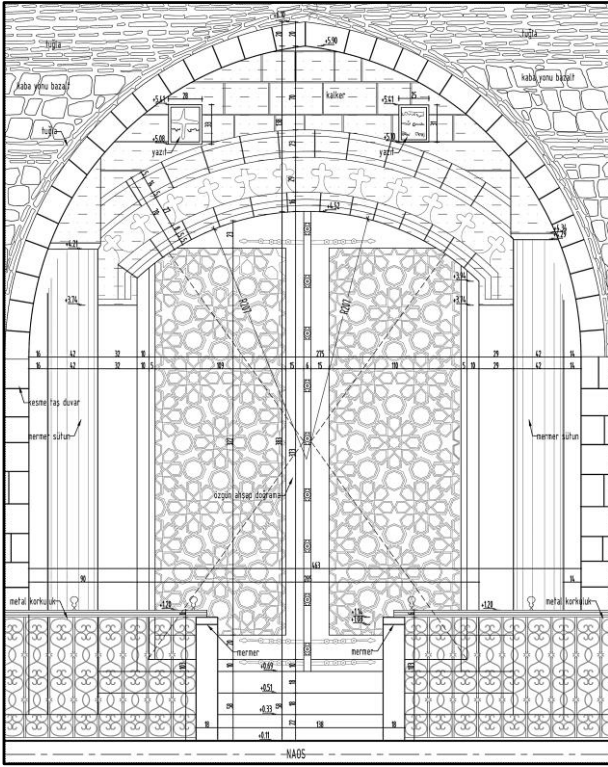
Şekil 18. Kilisenin ana avlusuna geçişi sağlayan ana giriş kapısı

Nartekste naos bölümüne açılan ana kapı ahşaptır. Ana kapı üzeri düz taş lentodur. Kapının üzeri sağır sivri kemerle geçilmiştir. Bu sivri kemerde soldan ilk sıra yatay iki taş dizilimi şeklinde yapılmıştır. Yanında dikey tek taş bulunmaktadır. Üçüncü sırada yatay üç taş dizilimi varken dördüncü sırada yine dikey taş kullanılmıştır. Sonraki dört sıra ilk dördün örüntüsü şeklindedir. Sondaki 6 sıra ise ilk iki sıranın örüntüsü şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 19).



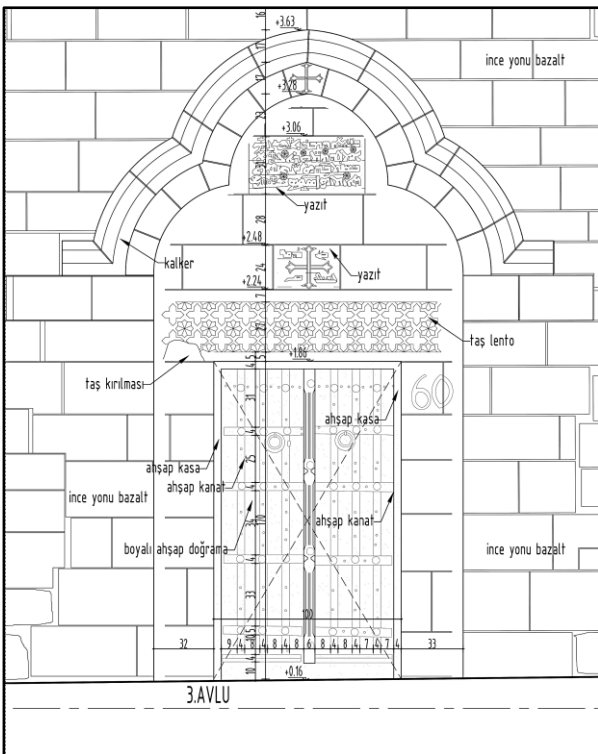
Şekil 19. Naosa açılan ana giriş kapısı

Apsis bölümüne açılan ceviz ağacından yapılmış olan 3 adet kapı bulunmaktadır. Bu kapılardan ana apside açılan iki kanatlı kapı, işlemleriyle ve büyüklüğüyle oldukça dikkat çekmektedir (Şekil 20). Ana kapının sağında ve solunda bulunan, apside açılan diğer iki kapı da iki kanatlıdır, ana kapıya göre daha sade ve daha küçüktür.



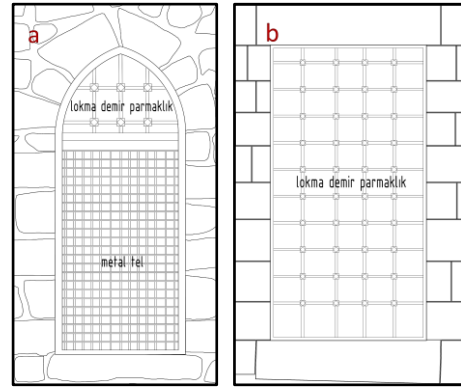
Şekil 20. Apsise açılan çift kanatlı ceviz kapı

Avludan Mor Yakup Kilisesi'ne doğrudan geçişi sağlayan, lentosu bazalttan ve işlemeli yapılmış, ahşap bir kapı yer alır. Kapının üzerinde 3 dilimli sağır bir kemer bulunmaktadır (Şekil 21).



Şekil 21. Mor Yakup Kilisesi'ne açılan kapı

Kilisenin batı cephesindeki yüksek duvarda 3 adet sivri kemerli pencere bulunmaktadır. Bu pencereler dışında kalan tüm pencere açıklıkları düz lentoludur (Şekil 22).

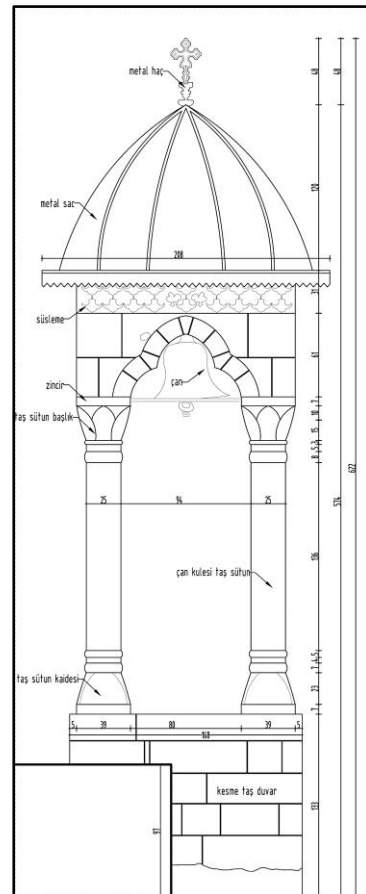


Şekil 22. Kemerli ve düz lentolu pencereler

Kilisede bulunan pencereler yapılan son tadilatla yenilenmiştir. Pencerelerde ahşap görümlü PVC doğrama kullanılmıştır.

Çan kulesi

Kilisenin güney cephesinin üst hizasında çan kulesi bulunmaktadır. Çan kulesi, Gertrude Bell'in 1909 yılındaki fotoğraflarında da görülmektedir. Bazaltla örülmüş 200 cm -200 cm ölçülerinde kare bir kaidenin üstüne 25 cm çapında 220 cm yüksekliğinde 4 sütun oturtulmuştur. Çan kulesi yüksekliği tepe noktasına kadar 574 santimetredir. Sütunların arasında toplamda dört adet sivri kemer bulunmaktadır. Bu kemerler, üst kaplaması kurşun olan kubbe ile örtülmüştür (Şekil 23).



Şekil 23. Çan kulesi

Sonuç ve Öneriler

Erken Bizans dönemi yapılarından olan Meryem Ana Kilisesi'nde günümüzde yapılan analiz çalışmalarında hem yapıldığı dönemin izlerini ve yapım tekniğini hem de dönem dönem yapılan müdahaleler sonucu günümüze ulaşan geleneksel yapım tekniklerini bir arada görmek mümkündür. Yapım teknikleri, yapının dönemsel durumunu belirleyebilmek açısından da önemlidir.

Bazalt duvarlarda görülen tuğla hatıllar, Erken Bizans dönemine ait olduğu düşünülen, korunmuş olan duvarlarda bulunmaktadır. Yine tuğla beşik kemer dizisinin de bu dönemden kalan izler olduğu düşünülmektedir. Erken Bizans döneminde de sıklıkla kullanılan oval mermer sütunlar kilisede de mevcuttur. Ayrıca 6. yüzyıl döneminde pencerelerde kullanılan mermer dikmeler (mullionlar) de kilisede bulunmaktadır. Kireç taşı, 6. yüzyıldan günümüze ulaşmış olan akantus yapraklı sütun başları ile kemer kalıntılarında kullanılmıştır.

Tarihi yapının korunmasını sağlamak, öncelikle tarihi dokuya uygun teknik ve malzemelerle, sürekli bakım yapılarak mümkündür. Kilisede yapılacak kapsamlı restorasyon uygulamalarında, özgün malzeme ve yapım teknikleri referans alınarak müdahale edilmesi yapının sürekliliği ve gelecek nesillere aktarımı açısından oldukça önemlidir.

Not: Kaynak belirtilmeden kullanılan tüm çizim ve fotoğraflar yazarlara aittir.

Etik Kurul İzni

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Teşekkür

Bu araştırma; Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Ana Bilim Dalı bünyesinde, Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ'ın danışmanlığında, Sultan SAYLIK tarafından hazırlanan, "Diyarbakır Meryem Ana Kilisesi Koruma Önerisi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiş olup, Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir (Proje Numarası: FBE.21.005).

Çıkar Çatışması

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] S. Guyer, "Le role de l'art de la Syrie et de la Mésopotamie a l'époque Byzantine". Syria. vol. 14, no. 1 pp. 56-70, 1933.
- [2] W.E. Kleinbauer, "The Origins and Functions of the Aisled Tetraconch Churches in Syria and Northern Mesopotamia". Dumbarton Oaks Papers. Vol. 41, pp. 89-114, 1973.
- [3] E. Keser-Kayaalp, "The Church of Virgin at Amida and the Martyrium at Constantia: Two Monumental Centralised Churches in Late Antique Northern Mesopotamia". OLBA XXI. vol. 21, pp. 393-436, 2013.
- [4] www.earth.google.com

- [5] M. Berchem, J. Strzygowski, G. Bell, "Amida". Orient Yayınları. Türkiye. 2015. (1910 yılında yayınlanmış olan Amida kitabının çevirisidir.)
- [6] J. Strzygowski, "The Origin of Christian Art. The Burlington Magazine for Connoisseurs". Vol. 20, no. 105, pp. 146-153, 1911.
- [7] C.A. Mango, "Byzantine architecture". London. 2006.
- [8] D. Hasol, "Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü". Yem Yayın. 2022.
- [9] N. Dalkılıç, A. Nabikoğlu, "Traditional Manufacturing of Clay Brick Used in the Historical Buildings of Diyarbakir (Turkey)". Frontiers of Architectural Research, vol. 6, no. 3, pp. 346-359. 2017.



Atık Taşıt Lastik Çelik Lifinin Beton Davranışına Etkisi

*Effect of Waste Vehicle Tire Steel Fiber on Concrete Behavior*Ersin AYHAN^{1*}, Murat DOĞRUYOL², Fırat KIPÇAK³, Abdulhalim KARAŞİN⁴¹Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Phd, ersinayhan@siirt.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-2108-0199²Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, mdogruyol@siirt.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0406-7854³Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Bölümü, firatkipcak@yyu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3849-7545⁴Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, karasin@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-8802-0588

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 14.04.2024
Revizyon 09.06.2024
Kabul 24.06.2024
Online 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Atık Taşıt Çelik Lifi, Ultrases
Darbe Hızı, Geri Dönüşüm, Çelik
Lifli Beton, Basınç ve Eğilme Testi

Sürdürülebilirlik kavramı Dünyada ve insan hayatında önemli bir yer teşkil etmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ile farklı sektörler çözümler geliştirerek insana yatırım adı ile hayatın zorluklarını kolaylaştırmaya çalışmaktadır. Taşıtlar da bu söylemi doğrulayan etmenlerden birisidir. Dünyanın artan nüfusu karşısında ortaya çıkan taşıt arzı bu sayının çoğalmasına sebep olmaktadır. Böylece artan taşıt sayısına bağlı olarak servis ömrünü tamamlayan atık taşıt lastikleri de ortaya çıkmaktadır. Atıkların düzgün ve akıllı yöntemler ile bertaraf edilmemesi hem ekonomik hem de çevresel zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların yenilmesi bağlamında gelişen teknoloji bir takım çareleri beraberinde getirmiştir. Atık taşıt lastiklerinin akıllı yöntemlerle bertaraf edilmesine ilişkin enerji üretimi, hammadde sağlama, dönüştürme gibi bir takım uygulamalar bulunmaktadır. Cesaret verici uygulamalar bilim insanlarının daha çok dikkatini çekerek onları, atık lastiklerinin bazı türevlerinin inşaat sektörünün en çok talep gören malzemesi olan betonda kullanımına yönelik çalışmalara itmiştir. Bu türevlerden biri olan atık lastik çelik lifi ile ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Ancak yapılan araştırmalar çelik lifin betonda kullanımına yönelik daha çok çalışma yapılması ve bu yönde bilgi alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bakımdan çalışma kapsamında atık çelik lifler kullanılarak literatürün zenginleşmesi ve neden sonuç ilişkisi ile sonuçların irdelenerek tartışılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında 150×300 mm ebatlarında silindirik ve 150×150×600 ebatlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Çelik lifler betonda hacimce %0.4 ve %0.8 oranlarında agrega yerine ikame olarak kullanılmıştır. Basınç, Eğilme, Ultrases Darbe Hızı deneyleri yapılarak sonuçlar tartışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %0,4 ve %0,8 atık lastik çelik lif katkısının betonun basınç dayanımını sırasıyla %23 ve %15 oranında azalttığı, eğilme dayanımını ise sırasıyla %5 ve %16 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, beton basıncı ile ultrases dalga hızları arasında paralel bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 14 April 2024
Received in revised form 09 June 2024
Accepted 24 June 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Waste Vehicle Steel Fiber,
Ultrasonic Pulse Velocity,
Recycling, Steel Fiber Concrete,
Compression and Flexural Testing

Doi: 10.24012/dumf.1468070

* Sorumlu Yazar

Sustainability is an important issue in the world and in human life. With the advancement of technology, different sectors are trying to facilitate the difficulties of life by developing solutions under the name of investing in people. Vehicles are also one of the factors that confirm this discourse. The resulting vehicle supply in the face of the increasing population of the world causes this number to multiply. Thus, depending on the increasing number of vehicles, waste vehicle tires that have completed their service life also appear. Failure to dispose of waste with proper and intelligent methods brings with it both economic and environmental difficulties. In order to overcome these difficulties, the developing technology has brought with it several remedies. There are many applications such as energy production, raw material supply, and conversion to dispose of waste vehicle tires by intelligent methods. Encouraging applications have attracted more attention of scientists, and studies have been conducted to use some of the waste tires in concrete, which is the most in-demand material in the construction industry. A lot of scientific studies have been conducted related to waste tire steel fiber, one of these derivatives. However, the research conducted shows that more studies should be done on the use of steel fiber in concrete and information should be obtained in this direction. In this regard, it is aimed to enrich the literature by using waste steel fibers within the scope of the study and to discuss the cause-and-effect relationship and the results by examining them. Within the scope of experimental studies, 150×300 mm cylinder and 150×150×600 beam samples were produced. Steel fibers at the rates of 0.4% and 0.8% by volume were used instead of fine aggregate in concrete. The results of Compression, Flexural and Ultrasonic Pulse Velocity experiments were examined and discussed. As a result of the experimental studies, it was determined that 0.4% and 0.8% waste tire steel fiber additives decreased the compressive strength of concrete by 23% and 15%, respectively. On the other hand, the 0.4% and 0.8% waste tire steel fiber additives increased the flexural strength by 5% and 16%, respectively. Also, it is noted that a parallel relationship exists between concrete strength and ultrasonic wave velocities.

Giriş

Dünyada üretilen yaklaşık 1,5 milyar taşıt lastiği servis ömrünü tamamladığında er ya da geç atık durumuna dönüşeceğinden Avrupa Birliği tarafından da imhası yasak olan bu atıkların geri dönüşümde değerlendirilmesi gerekmektedir [1]. Atık birikimi konusunda herhangi bir önlem alınmaması durumunda bu atıklar çevresel konularda tehlikeli boyutlara ulaşacaktır [2]. Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı amaçlayan çabalar, yerel çevre kirliliğine sebep olan yeni atık malzemelerin değerlendirilmesine odaklanmaktadır [3]. İmhası çevresel ve ekonomik bakımdan önemli bir sorun olan atık lastik üretimi, her sene yaklaşık olarak 4 milyar ton olup hem bertaraf edilmesi zordur hem de çevre kirliliğine neden olması bakımından önemle dikkate alınmalıdır [4]. Bu bakımdan atık lastiklerden elde edilebilen yan ürünlerden özellikle kauçuk kırıntı ve tozları ile çelik liflerinin değerlendirilmesi büyük bir önem kazanmaktadır. Dolayısıyla sürdürülebilirliği sağlamak açısından günümüzde yapılan yakıt üretimi, doğrudan kullanma, piroliz işlemi ile başka ürünlerin elde edilmesi gibi birçok uygulama yapılmaktadır. Atık taşıt lastiklerinin geri dönüşüme kazandırılması sanayi sektöründe gelişmiş Dünyadaki bütün devletler nezdinde hem ekonomik olarak hem de çevresel olarak büyük öneme sahip olan ve çözüme kavuşturulması gereken bir problemdir [5]. Lastiğin doğrudan yakıt olarak kullanılması teknik bakımdan mümkün olsa da ekonomik olmayacağı bilinmelidir [6]. Küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini yaşadığımız bu dönemde fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve böylece bu olumsuz etkileri hafifletmek bakımından malzemelerde geri dönüşüm önleminin alınması etkili yollardan birisidir [7]. Bu bakımdan lastiğin en ideal şekilde geri dönüşümünün hem ekonomik katkı yapması hem de çevresel bakımdan zarar vermesini önleme gereği duyulmaktadır. Bahsi geçen bu gereksinim üzerine ortaya çıkan çözümlerden biri de atık araç lastiği içerisinde yer alan çelik liflerin betonda kullanılması üzerine olmuştur. Çünkü çelik lifler betonun gevrek kırılma davranışını sünek davranışa dönüştürerek betonun mekanik dayanımı üzerinde olumlu etkiye sahip olmasını sağlamaktadır [8]. Fiber takviyeli güçlendirilmiş kompozit malzemelerin kullanımı son zamanlarda giderek artmıştır [9]. Yarı gevrek özellikteki yapıya sahip olan beton heterojen yapıdaki çatlaklara, hata ve düzensizliklere sahiptir [10]. Çelik lifin beton içerisine rastgele dağılımının sağlanması sonrası böylece beton özellikleri üzerinde iyileştirici etkiye sahip olmaktadır [11]. İnşaat sektörü yalnızca Türkiye’de değil aynı zamanda Dünyada da ekonomik bakımdan büyüme ve sosyal açıdan kalkınma da önemli bir unsurdur ve bu unsuru oluşturan temel taşlardan birisi de sektördeki birçok faydası nedeniyle en çok kullanılan beton malzemesidir [12]. İnşaat sektörünün önemli temsilcileri olan mühendisler ve mimarlar gün geçtikçe artan sürdürülebilirlik ilkesi ve kalkınmaya olan ilgi karşısında malzeme seçiminden, performans ve maliyet konularına kadar birçok parametrede daha ilgili olmaya başlamıştır [13]. Betonun tüm Dünyada kolay erişilebilir, kullanımının ve üretiminin kolay olması, yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip ve ekonomik olması onu

daha popüler hale getirmekte ve ilerleyen teknolojiler sayesinde betonun mekanik özelliklerini iyileştirme çabalarında önemli gelişmeleri de beraberinde getirmektedir [14]. Beton Dünyada en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir [15] ve üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonunun yaklaşık %5 ile %7 arasındaki orandan sorumludur [16]. Çelik lifin beton içerisinde kullanımının iyileştirici etkileri ve agrega, çimento ihtiyacını azaltacağı hususu göz önüne alındığında, yüksek karbon ayak izi konusunda hafifletici önlemlere sebep olacağı da aşikârdır [17]. Enerji ve hammadde ihtiyacı inşaat sektöründeki gelişmelere bağlı olarak giderek artış göstermektedir [18]. Betonun ana hammaddelerinden biri olan agregaların temini gün geçtikçe giderek zorlaşmakta ve teminindeki zorluklar enerji tüketimini artırmaktadır. Bu zorluklar betonda ikame malzeme bulma ihtiyacını doğurmuştur. Renk ile hiçbir alakası olmayan yeşil betonun ikame malzemeler kullanılarak üretilmesi, enerji ihtiyacının azalması ile daha ucuz beton kavramına ışık tutarak çevreci bir yaklaşıma da sahip olmuştur [19]. Çelik lifin betona ikamesi üzerine yapılan çalışmalar literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Kimi yapılan bazı çalışmalarda endüstriyel sanayi tipi çelik lifler çalışılmış iken [6],[14],[20]-[23] kimileri de atık lastiklerden elde edilen çelik lifler üzerine çalışma yapmıştır [24]-[28]. İkisini mukayese etmek bakımından 2 farklı çelik lif katkılı beton üretilerek yapılan çalışma da olmuştur [29],[30]. Literatürden çalışmaları konusunda birkaç örnek verilecek olursa; Aiello vd. (2009), aşınmış lastiklerden mekanik olarak çıkarılan geri dönüştürülmüş çelik lifler ile eklenen betonun mekanik davranışını araştırmak için İtalya'daki Salento Üniversitesi'nde bir araştırma yürütmüştür. Kritik lif uzunluğunu belirlemek ve beton-lif bağının özelliklerini değerlendirmek için ilk olarak çekme testlerini gerçekleştirilmişlerdir. RSFRC'nin çatlama sonrası davranışı eğilme testi ile incelenmiş ve betonun basınç dayanımı, eklenen çelik liflerin farklı hacim oranları için değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, endüstriyel çelik liflerle güçlendirilmiş numuneler de incelenmiştir. Geri dönüştürülmüş çelik lifler ve beton arasındaki ilişkinin iyi olduğu belirlenmiştir; ancak, liflerin varlığının, düzensiz geometrik yönlerine rağmen, betonun basınç dayanımı üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür [31].

Shahjalal vd. (2021), çalışmalarında geri dönüştürülmüş iri agrega, kırıntı kauçuk ve polipropilen fiberin Fiber Takviyeli Kauçuklaştırılmış Geri Dönüştürülmüş Betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki birleşik etkisini araştırmaktadır. Ayrıca, betonarme fiber takviyeli kauçuklaştırılmış geri dönüştürülmüş beton kırıntıların eğilme tepkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarının sonuçları, kırıntı kauçuk ve polipropilen elyafın eklenmesinin ardından betonun kısa ve uzun vadeli mekanik özelliklerinde bir iyileşme olduğunu göstermektedir. 30 geri dönüştürülmüş kaba agrega, %5 kırıntı kauçuk ve %0,5 polipropilen lif içeren beton kırıntıların eğilme kapasitesi, sünekliği ve tokluğunda iyileşme göstermiştir [32].

Aksoylu vd. (2022) çalışmalarında atık lastiklerden elde edilen geri dönüştürülmüş çelik teller ile geleneksel

betonarme kirişin özelliklerini araştırmaktır. Betonarme kirişe ağırlıkça %1 ile %3 oranında geri dönüştürülmüş çelik teller ilave edilmiştir. Toplamda 9 küp, 12 silindir ve 12 betonarme kiriş dökülerek test edilerek sırasıyla basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları elde edilmiştir. Betona %1, %2 ve %3 oranında eklenen geri dönüştürülmüş çelik tellerin, referans betona kıyasla basınç ve yarma çekme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Etriye aralığının yüksek olduğu (27 cm) numunelerdeki lif içeriğinin etkisinin kiriş davranışını iyileştirmede önemli fayda sağlamış olduğu anlaşılrsa da, etriye aralığının azaldıkça (20 cm ve 16 cm) liflerin etkisinin daha sınırlı kalmış olduğunu tespit etmişlerdir [33].

Görüldüğü üzere literatürde çelik lif katkılı betonun mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılması bakımından birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonuçları deney şartları, malzeme oranları, numune boyut ve şartlarına göre değişkenlik göstermiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürde birebir olmasa da benzer yapılan çalışmalar konusunda bir genelleme yapılabilir. Çelik lif katkısının özellikle basınç dayanımına etkisi konusunda daha fazla çalışma yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu durum geri dönüştürülebilir malzemeler üzerine çalışmaların genişletilerek devam edilmesi konusunda güven ve fikir vermektedir. Makale kapsamında atık taşıt lastik çelik lif katkılı betonun mekanik özelliklerinden elde edilen sonuçlar ile literatür çalışmalarından elde edilen sonuçların mukayese edilerek çalışmaların zenginliğini ve güvenilirliğini desteklemek ve farklı ikame oranları kullanılarak sonuçların irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında 150×300 mm ebatlarında silindir ve 150×150×600 ebatlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Çelik lifler betona hacimce %0.4 ve %0.8 oranlarında agrega yerine ikame olarak kullanılmış ve aynı zamanda kıyaslama amacı ile kontrol numuneler de üretilmiştir. Silindir numunelerinin su tutma kapasitesini tespit etmek üzere yüzey kuru ve kuru haldeki ağırlıkları tespit edilmiştir ayrıca basınç mukavemet testine tabi tutulmadan önce de numunelerin ultrases dalga hızı testleri yapılmıştır. Ardından silindir numunelere basınç testleri ve kiriş numunelere ise eğilme testleri uygulanmış ve sonuçlar irdelenip tartışılmıştır. Kullanılan atık çelik lifler ağır vasıta lastiklerinden elde edilen çelik lifler olup, çelik liflerden kaynaklı mekanik test sonuçlarının elde edilmesi dışında su tutma kapasiteleri ile işlenebilirlikleri arasındaki ilişki, ile ultrases dalga hızları ile mekanik dayanım arasındaki ilişkiyi anlamak bakımından literatüre bu yönlerden katkı sağlamak da amaçlanmıştır.

Materyal

Çimento

Deneyisel çalışmada CEM I 42.5 N tipi Portland çimentosu kullanılmıştır.

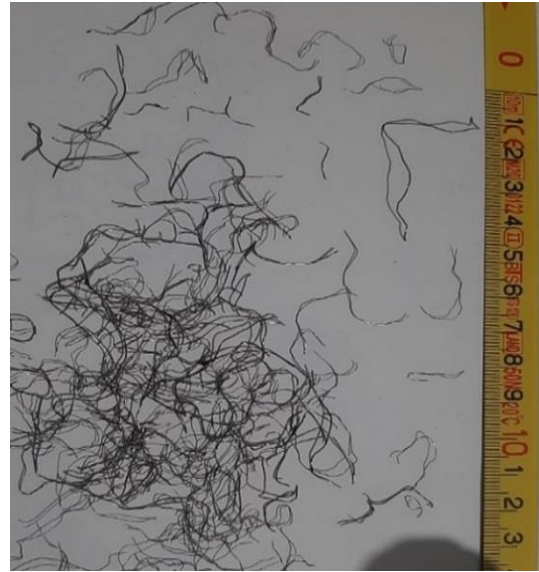
Agregalar

Agrega olarak 0-4 mm, 4-11.20 mm ve 11.20-22.40 mm aralığındaki malzemeler kullanılmıştır. İnce agregadan oluşan kumun yoğunluğu 2.62 gr/cm³, orta agreganın 2.69 gr/cm³ ve iri agreganın 2.72 gr/cm³tür. Agregalar doğal

dere agregalarından oluşmaktadır. Beton karışımları TS802 [34] (beton karışım tasarım hesap esasları) standardına göre yapılmıştır. Çalışma kapsamında atık çelik lif katkılı beton üretildiği için TS10514 [35] (lif katkılı betonların karışım oranları ve imalatı) standardı kapsamında seçilen lif içeriğine göre en büyük agrega çapının 22.40 mm olmasına dikkat edilmiştir.

Atık Çelik Lif

Ağır vasıta taşıt atık lastiklerinden mekanik yöntemlerle ayrılan çelik liflerin çapları elektronik kumpas yardımıyla yapılan ölçümlerle belirlendi. Buna göre farklı çaplarda tespit edilen iki grup çelik liflerin uzunlukları mekanik parçalanma nedeniyle değiştiğinden uzunlukları ölçüm aralıkları olarak verilmiştir. Uzunlukları çaplarına bölünerek narinlikleri belirlenmiştir. Çelik liflerin görüntüsü Şekil 1'de ve fiziksel özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Çelik Lifler

Şekil 1'de de görüleceği üzere çelik lifler kıvrımlı bir yapıya sahip olup değişen boylarda ve çaplarda bulunmaktadır.

Tablo 1. Çelik liflerin fiziksel özellikleri

Çelik Lif Grubu	Çapları mm	Uzunluk mm	Narinlik	Ağırlıkça Oranı %
1.Grup	0.11	25-55	227-500	%61
2.Grup	0.29	35-50	120-172	%39

Süper Akışkanlaştırıcı

Chryso Delta Super Akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Katkı 1 m³ beton için 6 kg olarak ayarlanmıştır.

Su ve Çimento Oranı

Su/Çimento oranı 0.50 olarak alınmıştır. Maksimum agrega çapı 22.4 mm olan karışımlarda TS 10514 standardı [35] su/çimento oranını 0.35-0.50 olarak önermiştir. 1 m³ beton için su 175 kg ve çimento ise 350 kg olarak sabit bırakılmıştır.

Beton Karışım Oranı

Deney karışımları biri şahit beton için olmak üzere toplamda 3 ayrı gruptan oluşmaktadır. Atık araç lastik çeliği (ALÇ) katkılı toplam 2 adet deney grubu bulunmaktadır. Çelik lifler beton hacminin %0.4 ve %0.8 oranlarında agrega yerine ikame olarak kullanılmıştır.

Numunelere ait harç laboratuvarında TS EN 206+A2 [36] standardına uygun şekilde hazırlanmış, beton karışımlarına katkı ilavesi yapılırken TS10514 standardında [35] yer alan karıştırma yöntemlerinden faydalanılarak üretim yapılmıştır. Çelik liflerden kaynaklı topaklanmayı önlemek için karıştırıcıya lifler dağıtılabilecek yeterli dönme hızı ile en son eklenmiştir. Tüm liflerin karıştırıcıya atılması ile en az dakikada 40 devirde karışım istenilen seviyeye gelinceye kadar karıştırılmıştır. Lif ile üretilen karışımlarda ilk önce ıslak karışım lifsiz hazırlanmıştır. Betonun nihai çökme değerinin 25 mm ile 76 mm arasında olmasına özen gösterilmiştir.

Deney numunelerinin uygun ölçüdeki silindir ve kiriş kalıplarına alınması, uygun sıcaklık şartlarında 28 gün kür havuzunda bekletilmesi ve kalıptan çıkarılması ve deneye hazır hale getirilmesi işlemleri TS EN 12390-1 standardına [37] göre yapılmıştır. Silindir numuneler 3 ayrı deney grubu için toplam 9 adet olarak Ø15/300 mm kalıplarda ve kiriş numuneler de 3 adet deney grubu için toplam 9 ad olarak 150×150×600 mm kalıplarda alınmıştır.

Literatür araştırmalarından çalışmalarda farklı agrega ikame oranlarının kullanıldığı tespit edilmiştir. Çelik lif katkısı olarak hacimce %0, %0.25, %0.5 ve %1 [38], %0.5, %1.0 ve %1.5 [39], %1 ve %5 [40], %0.25, %0.50 ve %0.75 [41], %1 [42], %0.2 [43], %0.2, %0.35, %0.5 ve %0.8 [44] gibi farklı hacim oranları kullanarak yapılan çalışmalar olmuştur.

Çalışma kapsamında karışım oranlarında ALÇ betona hacimce %0.4 ve %0.8 oranlarında agrega yerine ikame olarak eklenmiştir. Geri kalan tüm karışımlar sabit tutulmuştur.

Metod



Şekil 2. Kiriş ve Silindir Numuneler ile UPV testi

Basınç Dayanımı

150×300 mm ebatlarında kontrol ve ince agrega yerine hacimce %0.4, %0.8 oranında ALÇ ikame edilerek üretilen silindir numuneler TS EN 12390-2 e uygun [45] şekilde 28 günlük kür işleminden sonra TS EN 12390-3 e uygun [46] şekilde basınç testine tabi tutulmuştur.

Ultrases Darbe Hızı Testi (UPV)

Silindir numuneler basınç testine tutulmadan önce tahribatsız test yöntemlerinden biri olan ve Pundit+Lab Ultrasonik Dalga Hızı Test Cihazı ile TS EN 12504-4 [47] ve ASTM C-597-02 [48] standartlarında silindir numunelere dalga hızı testi uygulanmıştır.

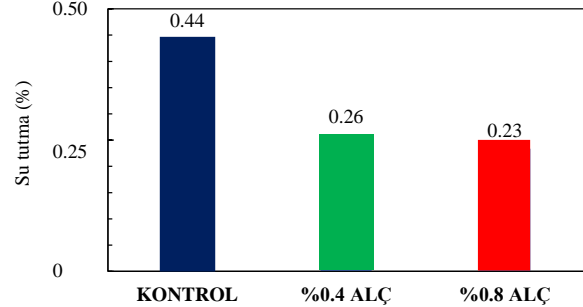
Eğilme Dayanımı

15×15×60 cm ebatlarında kontrol ve %0.4, %0.8 ALÇ katkılı üretilen kiriş numuneler TS EN 12390-2 e uygun [45] şekilde 28 günlük kür işleminden sonra TS EN 12390-5 e uygun [49] şekilde 3 noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Bulgular

Silindir Numune Gruplarının Su Tutma Kabiliyetleri

Her numune grubuna ait kür havuzundan çıkarılan silindir numunelerinin yüzey kuru hale getirilmesi sonrası yaş ağırlıkları ve sonrasında 24 saat 105 °C de etüv şartlarında tutularak kuru hale getirilen numunelerin ağırlıklarının hesaplanması sonrasında oluşan ağırlık kayıpları yüzdelik olarak Şekil 3'te sunulmuştur.

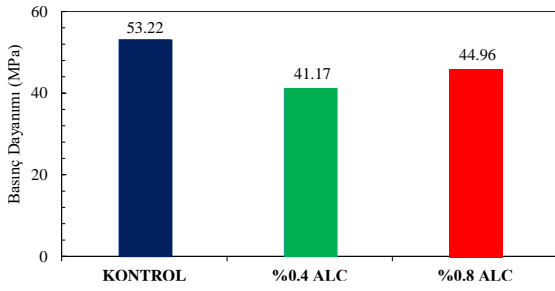


Şekil 3. Silindir Numune Grupları Yaş Kuru Ağırlık Ortalama Fark Yüzdeleri (%)

Çıkan sonuçlar numuneler çelik lif oranının artması ile numunelerin su tutma kabiliyetlerinde azalma olduğu göstermiştir. Bu durum, çelik lif oranının artması ile slump değerlerinde meydana gelen azalmalar ile bir ilişkisi olduğunu göstermektedir.

Basınç Dayanımı

Bazı literatür çalışmalarında çelik lif katkılı betonlarda mekanik basınç artışı olduğu ifade edilmiş iken [11],[50],[51], bazılarında basınca bir etkisinin olmadığı ifade edilmiştir [52]-[55]. Yapılmış olan bu çalışmalara karşın bazı çalışmalar da çelik lifli betona ilişkin çalışmaların, çelik lif etkisinin daha iyi anlaşılması bakımından devam etmesini savunmaktadır [56],[57]. Ayrıca bimsbeton bloklarında da endüstriyel tip çelik lif katkılı çalışma da yapılmış olup mekanik basınç dayanımını artırdığı tespit edilmiştir [58].

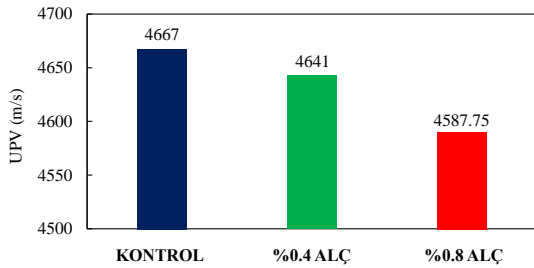


Şekil 4. Ortalama Silindir Basınç Dayanımları (MPa)

Bu çalışmada, Şekil 4'te görüleceği üzere 28 günlük ALÇ ikamesiz kontrol numunelere ait ortalama basınç değeri, ALÇ ikameli olan numunelerden fazla çıkmış olup %0.8 ALÇ ikameli gruba ait basınç ortalaması %0.4 ALÇ ikameli olandan yüksek çıkmıştır.

Ultrases Dalga Hızı Testi UPV

Test programının ilk aşamasında numuneler üzerinde tahribatsız ultrasonik darbe hızı (UPV) testleri gerçekleştirilmiştir. Ultrases deneyi, numunelere ultrason dalgaları göndererek ve numune içindeki dalgaların hızını ölçerek numunelerin mukavemetini tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntem, numune içindeki çatlakları, boşlukları ve diğer yapısal özellikleri tespit ederek numunenin mukavemetini belirlemeye yardımcı olur. Doğrudan UPV testi, ASTM C597'ye göre karışım başına üç silindir üzerinde gerçekleştirilmiştir. UPV testi uygulaması, numunelerin pürüzsüz karşılıklı yüzeylerinde gerçekleştirilmiştir. Sensörler paralel ve aynı yönde olmalıdır. Ölçüm yüzeylerindeki tozlar jel ile temizlenmiştir. Etkili sonuçlar elde etmek için, sensör ve numune arasındaki boşlukları kapatmak için jel kullanılmıştır. Numuneler test edilmeden önce, test için hazırlanan numunelerin yerleştirildiği yüzeyin uygun olmasına dikkat edilmiştir. Deneylerde standartlarına uygun Proceq marka Pundit Lab cihazı kullanılmıştır. Dalganın geçiş hızları, her bir numuneden üç farklı yerden ölçülen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. [59],[60].

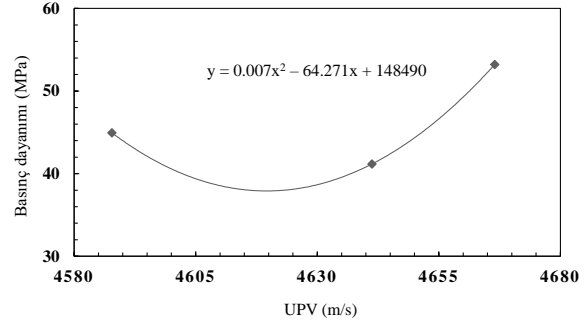


Şekil 5. UPV Değerleri

Şekilde 5'te görüldüğü gibi 3 ayrı deney grubu için tespit edilen ortalama değerler dikkate alındığında numunelere ait UPV değerleri ile silindir basınç değerleri arasında orantılı bir ilişki olduğu, UPV değerlerindeki artışa karşılık basınç değerlerinde de artış olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla UPV değeri arttıkça basınç dayanımı da artmaktadır [61],[62]. En yüksek dalga hızı kontrol numunesinde ölçülmüştür, en düşük dalga hızı %0.4 çelik lif içeren numunesinde ölçülmüştür. Çelik lif ikamesi arttıkça ses iletim hızı artmış olup %0.8 çelik lif

içerikli numunenin ortalama dalga hızının %0.4 çelik lif içerikli olandan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Silindir basınç değerleri ile UPV değerleri arasındaki ilişkide basınç ve UPV eksenlerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan parabolik bir eğri denklemi Şekil 6'da verilmiştir.

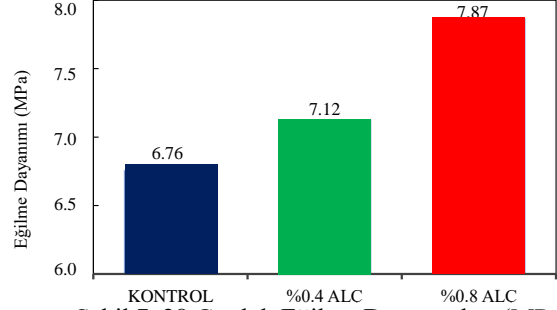


Şekil 6. Basınç Değerleri ile UPV korelasyonu

Şekil 6'da verilen grafik UPV değerlerindeki değişim ile basınç dayanımları arasındaki değişimi anlamlandırmak ve yorumlamak bakımından kayda değer bir sonuç vermiş olmak ile beraber tahmin yöntemlerinde de kullanılabilirliğinin olduğu görülmüştür [60].

Eğilme Dayanımı

Yapılan literatür araştırmalarının çoğu çelik lif katkılı betonların eğilme dayanımının yükseldiğini, gevrek betona sünek davranış özelliğini kazandırdığını göstermektedir [11], [50]-[53], [55].



Şekil 7. 28 Günlük Eğilme Dayanımları (MPa)

Şekil 7'de Kiriş numunelerine ait 28 günlük numune sonuçlarında ALÇ miktarının arttıkça eğilme dayanımı üzerinde pozitif yönde bir katkı sağladığı anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, atık taşıt lastik çeliğinin eğilme dayanımına bariz bir şekilde olumlu katkıda bulunduğu ancak basınç dayanımı üzerinde olumlu katkısının olmadığı anlaşılmıştır.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada atık araç lastik çelik lifleri, üretilen betonda ince agrega yerine betona hacimce ikame edilerek betonun basınç ve eğilme dayanımı performansları araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar şu sonuçları ortaya koymuştur;

□ Deneysel çalışmalarda çelik lif kullanımının beton karışımında ekstra su ihtiyacına neden olduğu dolayısıyla çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkının kullanımının doğru bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Silindir numunelerine ait yaş ve kuru ağırlıkları

arasındaki farkların yüzdelik değişimleri de atık lastik çelik lif ikameli numunelerde çelik miktarı artıkaça su tutma kabiliyetinde azalmaların olduğunu göstermiştir.

□ %0.4 ve %0.8 atık lastik çelik lif katkısının betonun basınç dayanımını sırasıyla %23 ve %15 oranlarında azalttığı, eğilme dayanımını ise sırasıyla %5 ve %16 oranlarında artırmış olduğu tespit edilmiştir.

□ Atık Taşıt Lastik Çeliğinin betonda kullanımındaki en büyük zorluklardan birisi içeriğindeki lif oranının artması ile topaklanma riskinin artması ve bu durumun homojen karışım elde etme hususunda önemli bir zorluk olduğu görülmüştür. Ancak çalışmada da anlatılan karıştırma yöntemi sayesinde bu zorluk önemli bir derecede minimize edilebilir.

□ Betona çelik lif katılması ile basınç dayanımında bir artış olmamıştır ancak buna karşılık ortaya çıkan mekanik sonuçlar dikkate alındığında çelik lif belli oranlarda tatmin edici mekanik değerler ile kullanılabilir. Ancak deneysel çalışmalar göstermiştir ki çelik lif katılı betonda daha sünek davranışlar ortaya çıkarak eğilme dayanımında belirgin bir artışa neden olmuştur.

□ Ultrasonik darbe hızı UPV ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu anlaşılmış olmak ile beraber tahribatsız bir yöntem olması bakımından betonun mekanik davranışlarına ilişkin ön bilgi alınması noktasında hızlı ve verimli bir test işlemi olarak dikkate alınabilir.

□ Çelik lifin betonda kullanımına ilişkin literatürde yapılan çalışmalardan lif katılı betonlarda basınç dayanımına ilişkin farklı sonuçlar ortaya çıkmış olsa da eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu da lif katılı betonların sünek davranış sergileyerek çekme dayanımları karşısında betonun çatlama direncinde önemli bir katkıya sahip olduğu göstermiştir.

□ Atık Taşıt Lastik Çeliğinin betonda ikame olarak kullanılabilmesi ve daha homojen karışımın sağlanması durumunda basınç dayanımında önemli bir düşüğe sebep olmayacağı buna karşılık eğilme dayanımında ise belirgin artış sağladığı tespit edilmiştir. Çevresel etkilerin göz önünde bulundurulması durumunda gelecekte uygun ihtiyaçlar doğrultusunda yeşil beton anlayışı ile kullanım alanlarının genişlettilmesinde fayda vardır.

□ Literatür çalışmalarından elde sonuçlar incelendiğinde deney şartlarındaki, numune türleri, malzeme oranları ve malzeme türlerindeki farklılıkların deney sonuçları üzerinde etkili olduğu ve farklı sonuçların ortaya çıkabileceği anlaşılmaktadır. Lif katkısının sonuçlarının bahsedilen bu parametrelere bağlı olarak değişebileceği göz ardı edilmese de kesin bir kanaat olarak konuşmak gerekirse özellikle artık herkesçe kabul görmüş ve literatürde de pozitif sonuçlar elde edilen hususlar üzerinden daha kesin bir dil ile ifade etmek mümkündür. Örneğin lif içeriğinin artmasına bağlı olarak eğilme dayanımında meydana gelen artış literatürde fazlası ile ortak bir nokta olarak yer almaktadır. Ancak basınç dayanımı üzerine çalışmaların genişleyerek devam etmesinin faydalı olacağı anlaşılmıştır. Bu bakımdan geri

dönüşüm odaklı çalışmaların genişletilerek devam etmesinin literatüre daha çok veri akışı sağlayacağı ve geri dönüştürülmüş çevre odaklı malzeme kullanımının öneminin ve bilincinin daha da artacağı söylenebilir.

Teşekkür

“Atık Araç Lastiklerinin Geri Dönüşüm Malzemelerinin Beton Davranışına Etkisi “ adlı doktora tez çalışması kapsamında yapılan ve başvurusu kabul edilen MÜHENDİSLİK.23.006 proje numaralı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamındaki destek için Dicle Üniversitesi BAP birimine teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

- [1] Czajczyńska, D., Krzyżyńska, R., Jouhara, H., & Spencer, N. (2017). Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, 134, 1121-1131.
- [2] Siddika, A., Al Mamun, M. A., Alyousef, R., Amran, Y. M., Aslani, F., & Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 711-731.
- [3] Baran, Y., Gökçe, H. S., & Durmaz, M. (2020). Physical and mechanical properties of cement containing regional hazelnut shell ash wastes. *Journal of cleaner production*, 259, 120965.
- [4] Sathiskumar, C., & Karthikeyan, S. (2019). Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products—a review. *Sustainable Materials and Technologies*, 22, e00125
- [5] Karabörk, F. Atık Taşıt Lastiklerinin Geri Kazanımında Sürdürülebilir Uygulamaların Geliştirilmesi Ve Önemi. *Türkiye’de Sıfır Atık: Tespitler, Beklentiler*, 198
- [6] Eisa, A. S., Elshazli, M. T., & Nawar, M. T. (2020). Experimental investigation on the effect of using crumb rubber and steel fibers on the structural behavior of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 252, 119078
- [7] Mehdipour, S., Nikbin, I. M., Dezhampanah, S., Mohebbi, R., Moghadam, H., Charkhtab, S., & Moradi, A. (2020). Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120126
- [8] Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and building materials*, 103, 8-14.
- [9] Günaslan, S. E., Karasin, A., & Öncü, M. E. (2014). Properties of FRP materials for strengthening. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 1(9), 656-660.

- [10] S.Y.Çetin, “Kesikli granülometriye sahip betonların lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi/Investigation of gap-graded concrete by nonlinear fracture mechanic principles,” Ph.D. dissertation, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2015.
- [11] Mohod, M. V. (2012). Performance of steel fiber reinforced concrete. *International Journal of Engineering and Science*, 1(12), 1-4.
- [12] Lakhari, M. T., Sohu, S., Bhatti, I. A., Bhatti, N., Abbasi, S. A., & Tarique, M. (2018). Flexural performance of concrete reinforced by plastic fibers. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(3), 3041-3043.
- [13] Obla, K. H. (2009). What is green concrete. *The Indian Concrete Journal*, 24, 26-28.
- [14] Bedirhanoglu, I., & Ilki, A. (2018, November). Fiber reinforced cementitious composites for retrofit of reinforced concrete members-A Review. In *International workshop on advanced materials and innovative systems in structural engineering: seismic practices* (p. 122).
- [15] Karasin, A., Hadzima-Nyarko, M., Işık, E., Doğruyol, M., Karasin, I. B., & Czarnecki, S. (2022). The effect of basalt aggregates and mineral admixtures on the mechanical properties of concrete exposed to sulphate attacks. *Materials*, 15(4), 1581.
- [16] Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Gholampour, A., Gencil, O., Koksall, F., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate. *Structural Concrete*, 22(5), 2791-2812.
- [17] Liew, K. M., & Akbar, A. (2020). The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 232, 117232.
- [18] Karasin, A., & Doğruyol, M. (2014). An experimental study on strength and durability for utilization of fly ash in concrete mix. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- [19] Baikerikar, A. (2014). A review on green concrete. *Journal of emerging technologies and innovative research*, 1(6), 472-474.
- [20] Bedirhanoglu, I., Ilki, A., & Kumbasar, N. (2013). Precast fiber reinforced cementitious composites for seismic retrofit of deficient RC joints—a pilot study. *Engineering Structures*, 52, 192-206.
- [21] Domski, J., Katzer, J., Zakrzewski, M., & Ponikiewski, T. (2017). Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete. *Journal of Cleaner Production*, 158, 18-28.
- [22] Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.
- [23] Shende, A. M., Pande, A. M., & Pathan, M. G. (2012). Experimental study on steel fiber reinforced concrete for M-40 grade. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 1(1), 043-048.
- [24] Centonze, G., Leone, M., & Aiello, M. A. (2012). Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. *Construction and Building Materials*, 36, 46-57.
- [25] Amin, M. N., Khan, K., Nazar, S., & Deifalla, A. F. (2023). Application of waste recycle tire steel fibers as a construction material in concrete. *Reviews on Advanced Materials Science*, 62(1), 20220319.
- [26] Sengul, O. (2016). Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires. *Construction and Building Materials*, 122, 649-658.
- [27] Sengul, O. (2018). Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers. *Construction and Building Materials*, 186, 1082-1091.
- [28] Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Tlemat, H. (2004, September). Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability* (Vol. 157, No. 3, pp. 131-138). Thomas Telford Ltd.
- [29] Carrillo, J., Lizarazo-Marriaga, J., & Lamus, F. (2020). Properties of steel fiber reinforced concrete using either industrial or recycled fibers from waste tires. *Fibers and Polymers*, 21, 2055-2067.
- [30] Samarakoon, S. S. M., Ruben, P., Pedersen, J. W., & Evangelista, L. (2019). Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00259.
- [31] Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G., & Maffezzoli, A. (2009). Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste management*, 29(6), 1960-1970.
- [32] Shahjalal, M., Islam, K., Rahman, J., Ahmed, K. S., Karim, M. R., & Billah, A. M. (2021). Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123842.
- [33] Aksoyulu, C., Özkılıç, Y. O., Hadzima-Nyarko, M., Işık, E., & Arslan, M. H. (2022). Investigation on improvement in shear performance of reinforced-concrete beams produced with recycled steel wires from waste tires. *Sustainability*, 14(20), 13360.
- [34] TS 802, “Beton Karışım Tasarımı Hesaplama Esasları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [35] TS 10514, “Çelik Tellerin Betonda Karıştırılması ve Kontrol Kuralları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

- [36] TS EN 206+A2, “ Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk ”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2021.
- [37] TS EN 12390-1, “Sertleşmiş Beton Deneyleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2021.
- [38] Dezhampahanah, S., Nikbin, I., Charkhtab, S., Fakhimi, F., Bazkiaei, S. M., & Mohebbi, R. (2020). Environmental performance and durability of concrete incorporating waste tire rubber and steel fiber subjected to acid attack. *Journal of cleaner production*, 268, 122216.
- [39] Simalti, A., & Singh, A. P. (2021). Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121102.
- [40] Gul, S., & Naseer, S. (2019). Concrete containing recycled rubber steel fiber. *Procedia Structural Integrity*, 18, 101-107.
- [41] Hu, J., Han, C., Gu, J., Schossler, R. T., dos Santos Rodrigues de L, I., & Yu, X. B. (2019). *Experimental Characterization of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete* (No. 19-06054).
- [42] Guo, Y. C., Zhang, J. H., Chen, G., Chen, G. M., & Xie, Z. H. (2014). Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 53, 32-39.
- [43] Agrawal, D., Waghe, U. P., & Raut, S. P. (2021). Performance evaluation of rubberized concrete with the use of steel fibers. In *Advances in Civil Engineering and Infrastructural Development: Select Proceedings of ICRAICEID 2019* (pp. 709-717). Springer Singapore.
- [44] Demircilioglu, E., Teomete, E., & Ozbulut, O. E. (2020). Strain sensitivity of steel-fiber-reinforced industrial smart concrete. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31(1), 127-136.
- [45] TS EN 12390-2 “Beton –Sertleşmiş Beton Deneyleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,2019
- [46] TS EN 12390-3 “Beton –Sertleşmiş Beton Deneyleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,2019
- [47] TS EN 12504-4 “Beton –Sertleşmiş Beton Deneyleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,2019
- [48] ASTM C 597-02, Pulse Velocity Through Concrete. American Society for Testing and Material: West Conshohocken, PA, USA., 2003.
- [49] TS EN 12390-5 “Beton –Sertleşmiş Beton Deneyleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,2019
- [50] Li, Y., & Li, Y. (2017). Experimental study on performance of rubber particle and steel fiber composite toughening concrete. *Construction and Building Materials*, 146, 267-275.
- [51] Abbass, W., Khan, M. I., & Mourad, S. (2018). Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and building materials*, 168, 556-569.
- [52] Papakonstantinou, C. G., & Tobolski, M. J. (2006). Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cement and concrete research*, 36(9), 1686-1691.
- [53] Yalcin, M., Taşdemir, C., & Taşdemir, M. A. (2011). Çelik lif donatılı betonların performans sınıflarının belirlenmesi. *İTÜDERGİSİ/d*, 8(6).
- [54] Neves, R. D., & Fernandes de Almeida, J. C. O. (2005). Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Structural concrete*, 6(1), 1-8.
- [55] Doğruyol, M., Ayhan, E., & Karaşin, A. (2024). Effect of Waste Steel Fiber Use on Concrete Behavior at High Temperature. *Case Studies in Construction Materials*, e03051.
- [56] Lee, S. C., Oh, J. H., & Cho, J. Y. (2015). Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers. *Materials*, 8(4), 1442-1458.
- [57] Liew, K. M., & Akbar, A. (2020). The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 232, 117232.
- [58] Isik, E., Karasin, A., & Kayan, Y. (2020). Pomzadan imal edilmiş çelik lif katkılı bimsblokların mekanik özelliklerinin araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 723-730.
- [59] Abdullah, V., Aydın, E., & Bedirhanoğlu, İ. (2017). Beton elasatisite modülünün ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 475-484.
- [60] Zebari, Z., Bedirhanoğlu, İ., & Aydın, E. (2016). Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 43-52.
- [61] Mohana, M. H. (2020). Assessment of concrete compressive strength by ultrasonic pulse velocity test. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 14(1), 39-46.
- [62] Zárata, D. M., Cárdenas, F., Forero, E. F., & Peña, F. O. (2022). Strength of concrete through ultrasonic pulse velocity and uniaxial compressive strength. *International Journal of Technology*, 13(1), 103-114.



Treatment of Vegetable Oil Industry Wastewaters with Coagulation-flocculation Methods

Talip TURNA^{1*}, Yalçın Şevki YILDIZ²

¹Dicle University, Vocational School of Technical Sciences, Diyarbakır, Turkey talipturna@gmail.com, Orcid No: 0000-0001-6318-7245

²Erciyes University, Department of Environmental Engineering, Kayseri, Turkey, yildiz@erciyes.edu.tr, Orcid No:0000-0002-5509-0731

ARTICLE INFO

Article history:

Received April 22, 2024
Received in revised form May 28, 2024
Accepted June 26, 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Wastewater treatment, vegetable oil industry wastewaters, coagulation-flocculation,

ABSTRACT

The vegetable oil industry uses high amounts of water as a process and contains high concentrations of various pollutants and compounds resistant to biodegradation. In this study, the coagulation/flocculation process was applied to treat these wastewaters that have a negative effect on the receiving environment. In coagulation-flocculation experiments performed with $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, the highest COD (92%) and Oil-Grease (89%) removal efficiencies were obtained at a coagulant dose of 800 mg Al^{+3}/L . In experiments conducted with $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ coagulant, the highest COD (88%) and Oil-Grease (89%) removal efficiencies were obtained at a dose of 600 mg Fe^{+3}/L coagulant. This study demonstrated the effective use of the coagulation/flocculation process in the treatment of vegetable oil industry wastewater containing high COD and Oil-Grease.

Doi: 10.24012/dumf.1472338

*Corresponding Author

Introduction

Together with recent increases in industrialization activities and changing human needs, dietary habits of people are also changing. There is a tendency in markets from animal-originated oils to vegetable oils, which were thought to be healthier, and such a tendency increased the vegetable oil production of the industry. Worldwide vegetable oil production has increased over the years and is expected to increase further in the upcoming years. About 60% of vegetable oil production is consumed as foodstuff and 32.0% is consumed in biofuel production [1].

Fats constitute a primary component of cell, tissue, and organs; thus, they are considered to be essential nutrients of human body for maintenance of life and regular performance of body functions. Vegetable oils provide energy, fatty acids, and fat-soluble vitamins for human nutrition. Cooking oil is generally produced from oilseed plants such as coconut, palm, peanut, rapeseed, soybean, olive, cottonseed, and sunflower [2]. During the production of cooking oils, significant amounts of different wastes are generated, including oilseeds, wastewater, organic solid wastes (i.e., seeds and husks) and inorganic residues. Oily parts of seed shells are generally used in feed industry and

the remaining parts are used as fuel in production facilities [3].

A significant amount of wastewater is generated in production of vegetable oils, especially during the processing of oil. Such wastewaters may result in serious environmental problems when they were not treated properly [4]. If the oily wastewater is not treated properly, it can cause health problems for living organisms. Presence of oil in water will reduce the oxygen concentration of water and such a case then increases mortality rates of fish, mammals and birds and may harm aquatic organisms [5], [6]. Oil can accumulate in sewer lines and pipes and emit an unpleasant odor, causing conditions to move towards anaerobic conditions. Accordingly, resultant corrosion and clogging of pipes prevent proper operation of wastewater treatment plants [7]. In terms of water consumption of vegetable oil industry, 0.5-0.75 tons of wastewater is generated per ton of fresh fruit during palm oil production [8]. In olive oil production, 1.2 – 1.8 m³ wastewater is generated per ton of olive [2]. Also in small-scale soybean oil industry, about 80 - 100 tons of wastewater are generated daily [9].

Vegetable oil industry wastewaters have high chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD),

*This study was produced from the first author's doctoral thesis.

total dissolved solids (TDS), total suspended solids (TSS), oil, grease, phosphate, and sulfate contents [10]. Therefore, when discharged directly into receiving environment, they cause rapid oxygen depletion in the receiving environment and irreversible damage to aquatic life [2]. These wastewaters should be so treated as to meet the discharge criteria. Wastewaters generated during production mostly occur at various stages during oil production/processing, including removal of sticky substances, acid removal, deodorization, and neutralization [11], [12]. Quite a large amount of wastewater is also produced in vegetable oil refining, acidification of soap stock, filter backwashing and equipment washing processes [13]. Besides, volume of wastewater may vary based on processing technology and types and quality of raw materials used during processing [14].

The (BOD)/(COD) ratio is an important parameter used in selection of proper wastewater treatment method and assessment of biological processes as an efficient treatment alternative. While a BOD/COD ratio greater than 0.6 is recommended for aerobic or anaerobic processes, such a value is around 0.2 for edible vegetable oil industry wastewaters [15], [16]. Since sunflower oil wastewaters contain high quantities of lipids, inhibition of microorganisms is an important problem in biological treatment of these wastewaters [17].

Generally, physico-chemical, biological, and electrochemical methods are used in treatment of vegetable oil industry wastewaters [18], [19], [20], [21], [22]. The difficulty in treatment of vegetable oil industry wastewaters comes from the distribution of oil droplets and surface-active substances. These are defined as dissolved oils and free oil droplets and emulsions [23]. The basic color of emulsions is white. If the emulsion is concentrated, the Tyndall effect scatters light and causes the color to shift to blue. If it is intense, the color shifts to yellow.

The first step in treatment of vegetable oil industry wastewaters is the separation of free oils as dispersed, emulsified, and soluble ones. In this step, generally physical treatment methods such as precipitation, flotation and centrifugation are used. Free oils of wastewater can be removed with simple grease traps. However, the main problem in wastewater is the removal of emulsion oils. Following the breakout of emulsion, physical processes such as flotation or coagulation-flocculation can be efficient [24]. The emulsion should be broken to remove the emulsified oil. This breaking process can be realized through physical, chemical, electrical, and biological methods [25]. To overcome the problems frequently encountered in treatment of sunflower oil wastewaters, it is necessary to apply new treatment approaches such as chemical and electrochemical treatment methods. Among these methods, coagulation-flocculation widely used in treatment of sunflower oil wastewaters [26]

The coagulation-flocculation is a two-stage conventional wastewater treatment method in which cationic inorganic metal salts are used as coagulants and long-chain nonionic or anionic polymers are used as

flocculants [27]. Addition of oppositely charged electrolytes to the system can lead to a reduction in net surface charge of the oil droplets and consequently to a reduction in repulsion potential between the oil droplets. Aluminum sulfate, $FeCl_3$, is among the most used [28], [29]. Since aluminum or iron salts used in the process have a good coagulation effect on negatively charged oil droplets, coagulation/flocculation can effectively remove majority of the suspended oil and emulsified oil [30], [31]. Deposition of oil droplets is realized through attraction by Van der Waals forces. Some other mechanisms such as compaction of the layers, inter-particle bridging and scavenging contribute to the flocculation process. The oil droplets in the flocs are then removed by sedimentation or flotation. Several coagulants are widely used in oily wastewater treatment. These coagulants are either inorganic (e.g., aluminum sulfate, poly-aluminum chloride, poly-zinc silicate) or synthetic organic polymers (e.g., polyacrylamide derivatives). Choice of coagulants depends on chemical properties of oily wastewater. Use of abrasive coagulants can result in large amounts of hazardous sludge. Alternatively, some natural coagulants have also been used in oily wastewater treatment due to their safe and environment-friendly nature [32], [33].

In this study, optimum conditions were determined for the coagulation-flocculation process, which is used in the treatment of vegetable oil industry wastewater that is difficult to biodegrade.

2. Material and method

2.1. Material

Wastewater samples were taken from an oil factory dealing with soybean oil, cottonseed oil, sunflower oil, corn oil and anhydrous oil production in Kahramanmaraş province of Turkey. Currently, there is a treatment plant operating actively in the facility. The treatment plant performs chemical treatment as to meet the discharge standards to the canal. Samples were taken from the entrance of treatment plant. Samples were transported in 30-liter high density polyethylene (HDPE) buckets. Wastewater samples were stored under laboratory conditions (at +4 °C) without any pre-treatments. Minimum and maximum values of the wastewater samples are provided in **Table 1**.

Table 1: Analysis values for vegetable oil industry wastewater used in present study.

Parameters	Wastewater Values	Discharge standards 2-h Composite Sample [34]
COD (mg/L)	11503	160
Oil-Grease (mg/L)	2810	60
pH	11.7	6-9
TSS (mg/L)	613	-
EC (μ S/cm)	2210	-
Temperature (°C)	80	-

2.2. Chemicals and reagents

For COD analysis, potassium dichromate (Merck 99.5%) was used as disintegration solution and silver sulfate (Merck) sulfuric acid solution (Merck 95-97%) and mercury chloride (Merck) were used as acid solution. Carbon tetrachloride (Sigma Aldrich 99%-FTIR) was used for oil grease analysis. Isopropyl alcohol (Merck) was used for FTIR spectrophotometry diamond cleaning.

2.3. Analytical methods

The pH, electrical conductivity, COD, oil-grease and TSS measurements were performed before and after the experiments with the use of standard methods. COD measurements were made in accordance with Standard Methods (5220-D). In COD analyses, Hach-Lange DR-3900 spectrophotometer was used. Prepared samples were read spectrophotometrically at 600 nm [35].

The pH and EC measurements were made with the use of WTW brand device. Oil analyzes of vegetable oil industry wastewater were made with the use of Agilent Cary 630 FTIR (Serial lot no:MY16160027) device. FTIR spectra were in the range ($4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$) and all spectra were adjusted to have a resolution of 4 with 128 scans [36], [37]. These analyses were conducted in accordance with ASTM D7678-11 and ARPA-APPA 75/2011 methods modified with CCL_4 [38], [39]. Measurements were carried out in a windless and humidity-free environment by making a baseline with air. First, crude oil was taken from the factory where vegetable oil was produced, and spectrum scans of this oil were made and the most logical and calibrable one was obtained. peaks and ranges were determined. The $1600\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ region is a distinctive region for vegetable oils. It was stated that the absorption peak in this region explains the C=O ester carbonyl functional group of triglycerides[40]. Stock solutions were prepared with CCL_4 in the range of 0-2000 ppm and absorbance values were recorded. Then, a calibration chart was prepared. Since the R2 value of the chart was seen as 0.99, this method was used in oil analysis.

2.4. Method

Coagulation - flocculation

For coagulation – flocculation experiments, 6 jar test setups with mixer were used (Figure 1). In coagulation-flocculation treatments, 500 mL wastewater sample was placed into 1000 mL beakers. Iron III Chloride ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and Aluminum Sulphate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) (Alum) were supplemented as coagulants and optimum pH and coagulant doses were determined based on COD and Oil-Grease removal efficiencies. WTW-brand pH-meter was used to adjust pH while finding optimum pH. Experiments were carried out in FCSL-brand Jar-test device by applying fast mixing at 120 rpm for 2 minutes and slow mixing at 30 rpm for 20 minutes[41]. After settling for one hour, the supernatant was collected for physicochemical analysis. A fixed amount of coagulant (400 mg Fe^{+3}/L and 400 mg Al^{+3}/L) was chosen for both coagulant substances to investigate the optimum initial pH value.

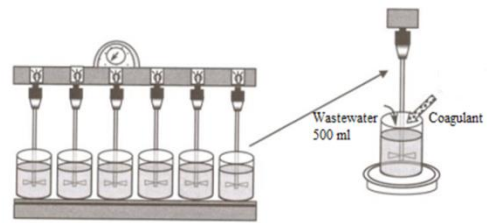


Figure 1. Schematic view of jar-test setup [42]

3. Results and discussion

3.1. Results of coagulation – flocculation experiments

3.1.1. Effect of initial pH on chemical coagulation

In chemical coagulation studies, effects of coagulant dosage and pH on wastewater treatment were investigated [43]. For chemical coagulation, alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) and iron salts $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ were used as coagulant material. Both Al^{+3} and Fe^{+3} based coagulants decompose in solution and also increase polymeric chain reactions to adsorb oil droplets on their surfaces by forming flocs [44] [45]. Initial pH range was selected as 3–10 and COD and Oil-Grease removal efficiencies were investigated at initial pH values. Effects of initial pH on COD and Oil-Grease removal in chemical coagulation are presented in Figure 2.

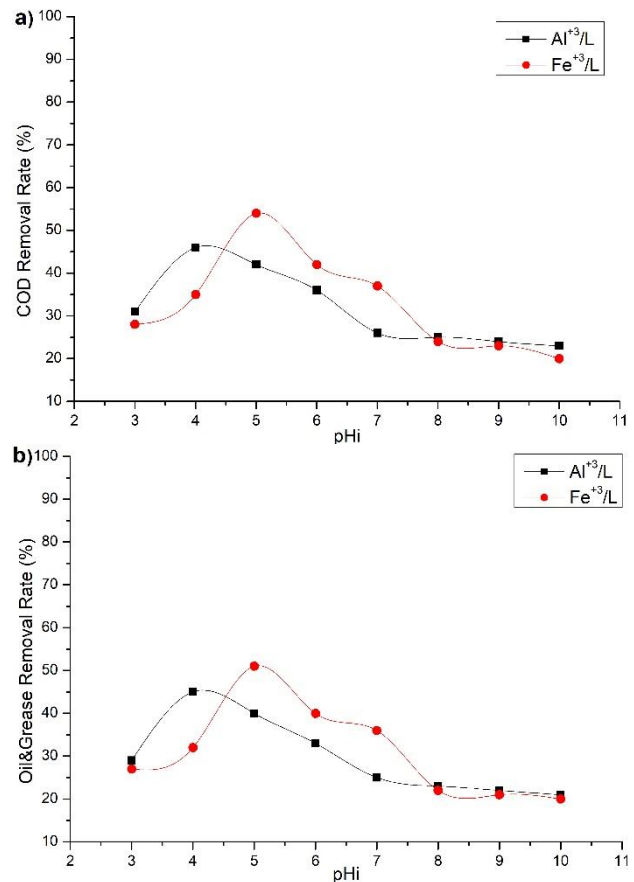


Figure 2: Effect of initial pH on COD (a) and Oil-Grease (b) removal in chemical coagulation. (COD:11503 mg/l; O&G: 2810 mg/l)

The greatest COD and Oil-Grease removal efficiency of $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ coagulant was achieved at pH 4 and the highest COD and Oil-Grease removal efficiency of $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ coagulant was achieved at pH 5. At constant 400 mg Fe^{+3}/L and 400 mg Al^{+3}/L coagulant quantities, the highest COD removal was 46% and the highest Oil-Grease removal was 45% for $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ coagulant; the values were respectively calculated as 54 and 51% for $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ coagulant. It was reported that micelle-based emulsion was broken at pH range of 4-5 and the coagulant material absorbed the pollutant more easily [46].

3.1.2. Effect of coagulant dosage on chemical coagulation

Amount of coagulant flocculant is an important parameter in coagulation-flocculation process. Coagulant dosage can technically be defined as the amount of substance added at maximum removal efficiency [46]. In chemical coagulation process, effects of coagulant quantity on COD and Oil-Grease removal efficiencies were investigated at dosage range of 100-900 mg/L, experiments were carried out at fixed values at pH 4 for $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ and at pH 5 for $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ and the results are present in Figure 3.

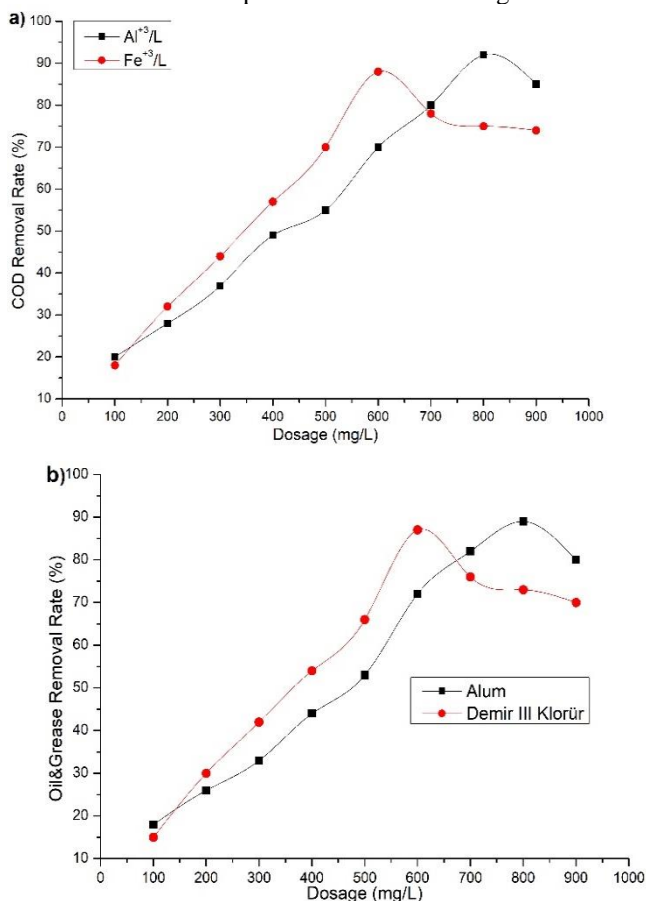


Figure 3: Effect of coagulant dosage on COD (a) and Oil-Grease (b) removal in chemical coagulation (COD:11503 mg/l; O&G: 2810 mg/l)

For $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ coagulant, the highest COD removal (92%) and Oil-Grease removal (89%) was achieved at 800 mg Al^{+3}/L dosage. For $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

coagulant, the highest COD removal (88%) and Oil-Grease removal (89%) was achieved at 600 mg Fe^{+3}/L dosage.

Effects of $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ and $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dosages on pH values were also investigated (Table 2). Accordingly, decreasing pH values were observed with increasing coagulant quantities supplemented into the process. Treatment efficiencies increased with increasing coagulant dosages. While the pH value was found to be 4-5 for fixed dosages of 400 mg Fe^{+3}/L and 400 mg Al^{+3}/L , the treatment efficiency increased by 20% with increasing dosages at this fixed value pH. Therefore, the study in Table 2 was carried out. When the initial pH (pHi) was brought to around 7 with the increased dosage, treatment efficiencies of around 90% were obtained. Such an increase in treatment efficiency could be attributed to separation of the broken emulsion because of reduced system pH by added coagulants. This micellar pollution was removed more easily with decreasing pH. Additionally, pH-dependent change in flock types might have been effective in increased efficiencies. The aim here is to reduce the actual pH of the wastewater, which is 11.7, to a constant pH of 4-5, where the efficiency is highest, instead of adding coagulant. Instead of reducing the pH to 7 and adding the coagulant, the pH of the system spontaneously rises to 4-5 without the addition of acid. It was aimed at reducing it to 5. In this way, less acid was used.

Therefore, for pHi value of 7, a pH value including the optimum values of the process was reached. In a similar study, coagulation-flocculation membrane process was employed in treatment and re-use of vegetable oil factory wastewaters. Aluminum sulfate was used as a coagulant in process and the turbidity, COD and TOC removal efficiencies were calculated as 100%, 98 and 97, respectively [47]. In another study in which coagulation-flocculation experiments were conducted, iron, alum and lime were used in treatment of vegetable oil industry wastewaters and more than 83% removal efficiencies were achieved for Oil-Grease, TSS and COD removal [48]. Again, in a different study conducted with coagulation-flocculation process, COD, turbidity, and Oil-Grease removal efficiencies were calculated as 96, 92 and 99%, respectively, by the addition of 700 mg/L $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ [46].

Table 2. Assessment of $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ and $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ Coagulation Experiments Conducted with the Same Wastewater Samples

		Al^{+3}/L	Fe^{+3}/L
Dosage (mg/L)		800	600
pHi	Influent	7	7
	Effluent	4.02	4.93
Removal Efficiency (%)	COD	92.03	88
	Oil-Grease	89.02	89

Haddaji et al. (2022) reported similar results. In a different real-scale study where vegetable oils were removed, the COD removal efficiency was found to be 79.5% under optimum conditions when $1 \text{ gL}^{-1} FeCl_3$ and 1 mL^{-1}

cationic polymer were used at pH =8 [49]. Almojjly et al. (2018) in a similar oil-grease removal study. It has been reported that COD and oil-grease removal efficiency increases by decreasing pH to 7-8 levels[50] In a similar study by Al-Shamrani et al. (2002), oil removals of up to 99.3% at pH 8 and 99.94% at pH 7 were reported for aluminum sulfate and ferric sulfate, respectively.[41] These results show that when pH values are low, zeta potential values are low and therefore the probability of clotting increases.[41]

4. Conclusion

In coagulation-flocculation experiments with $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ coagulant, the highest COD (92%) and Oil-Grease (89%) removal efficiencies were achieved at 800 mg Al^{+3}/L coagulant dose. In coagulation-flocculation experiments with $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ coagulant, the highest COD (88%) and Oil-Grease (89%) removal efficiencies were achieved at 600 mg Fe^{+3}/L coagulant dose. Coagulation levels and solution pH values decreased with increasing coagulant dosages. Therefore, pH of 7 was thought to be suitable for the process. Since effluent pH values were within the range of 4-5, they should be increased to meet local discharge standards (6-9). In this system, while the standards were met for COD, standards for Oil-Grease were not met. At this stage, this system can be considered as a pre-treatment option for this facility. If oil leaks that may occur in the production system can be reduced, discharge standards can be fully met. In addition to these evaluations, when we evaluate the coagulation-flocculation treatment process for this business from an environmental perspective; Reducing the amount of water discharged in the process and pollution loads, detecting, and recovering oil leaks can make this method a sustainable method that works with higher efficiency and meets discharge standards.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared."

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared."

Authors' Contributions

Turna T: Study conception and design, visualization, analysis, and interpretation of data, drafting of manuscript.

Yıldız YŞ: conceived the original idea, supervised the project, critical revision.

Acknowledgement

This study was supported by Scientific Research Projects Department of Erciyes University within the scope of FDK-2017-7392 numbered project entitled as "Treatment of Vegetable Oil Industry Wastewaters with Electrochemical Methods".

References

- [1] S. Di Fraia, N. Massarotti, M. V. Prati, and L. Vanoli, "A new example of circular economy: Waste vegetable oil for cogeneration in wastewater treatment plants," *Energy Convers Manag*, vol. 211, p. 112763, May 2020, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.112763.
- [2] Z. S. Lee, S. Y. Chin, J. W. Lim, T. Witoon, and C. K. Cheng, "Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review," *Environ Technol Innov*, vol. 15, p. 100377, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.eti.2019.100377.
- [3] W. I. Ngoie, O. O. Oyekola, D. Ikhu-Omoregbe, and P. J. Welz, "Valorisation of Edible Oil Wastewater Sludge: Bioethanol and Biodiesel Production," *Waste Biomass Valorization*, vol. 11, no. 6, pp. 2431–2440, Jun. 2020, doi: 10.1007/s12649-019-00633-w.
- [4] A. Hussein Falamarz Tahir, K. Nagham Obeid, and S. Abduljabbar Ibrahim, "COD Removal of Edible Oil Content in Wastewater by Advanced Oxidation Process," *Environment and Natural Resources Research*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.5539/enrr.v6n2p57.
- [5] Z. Šereš *et al.*, "Treatment of vegetable oil refinery wastewater using alumina ceramic membrane: Optimization using response surface methodology," *J Clean Prod*, vol. 112, pp. 3132–3137, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.070.
- [6] P. Dhanke and S. Wagh, "Treatment of vegetable oil refinery wastewater with biodegradability index improvement," *Mater Today Proc*, vol. 27, pp. 181–187, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.10.004.
- [7] M. C. Cammarota and D. M. G. Freire, "A review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content," *Bioresour Technol*, vol. 97, no. 17, pp. 2195–2210, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2006.02.030.
- [8] Y. Ahmed, Z. Yaakob, P. Akhtar, and K. Sopian, "Production of biogas and performance evaluation of existing treatment processes in palm oil mill effluent (POME)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1260–1278, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.073.

- [9] N. Yu *et al.*, “Electricity and methane production from soybean edible oil refinery wastewater using microbial electrochemical systems,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 96–102, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.116.
- [10] C. N. Nweke, J. T. Nwabanne, and P. K. Igbokwe, “Kinetics of Batch Anaerobic Digestion of Vegetable Oil Wastewater,” *Open Journal of Water Pollution and Treatment*, vol. 1, no. 2, pp. 1–10, 2014, doi: 10.15764/WPT.2014.02001.
- [11] C. C. Mar, Y. Fan, F. L. Li, and G. R. Hu, “Bioremediation of wastewater from edible oil refinery factory using oleaginous microalga *Desmodesmus sp. S1*,” *Int J Phytoremediation*, vol. 18, no. 12, pp. 1195–1201, Dec. 2016, doi: 10.1080/15226514.2016.1193466.
- [12] S. Sharma, A. Aygun, and H. Simsek, “Electrochemical treatment of sunflower oil refinery wastewater and optimization of the parameters using response surface methodology,” *Chemosphere*, vol. 249, p. 126511, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126511.
- [13] A. M. A. Pintor, V. J. P. Vilar, C. M. S. Botelho, and R. A. R. Boaventura, “Optimization of a primary gravity separation treatment for vegetable oil refinery wastewaters,” *Clean Technol Environ Policy*, vol. 16, no. 8, pp. 1725–1734, Apr. 2014, doi: 10.1007/s10098-014-0754-3.
- [14] Elham Abdollahzadeh Sharghi, Azadeh Shorgashti, and B. Bonakdarpour, “The Study of Organic Removal Efficiency and Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor Treating Vegetable Oil Wastewater,” *International Journal of Engineering*, vol. 29, pp. 1642–1649, 2016.
- [15] U. Tezcan Un, A. S. Koparal, and U. Bakir Ogutveren, “Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes,” *J Environ Manage*, vol. 90, no. 1, pp. 428–433, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2007.11.007.
- [16] O. F. Saeed, K. W. Hameed, and A. H. Abbar, “Treatment of vegetable oil refinery wastewater by sequential electrocoagulation-electrooxidation process,” *J Environ Manage*, vol. 342, p. 118362, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118362.
- [17] P. Cisterna, “Biological Treatment by Active Sludge with High Biomass Concentration at Laboratory Scale for Mixed Inflow of Sunflower Oil and Saccharose,” *Environments 2017, Vol. 4, Page 69*, vol. 4, no. 4, p. 69, Sep. 2017, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS4040069.
- [18] G. Louhichi, L. Bousselmi, A. Ghrabi, and I. Khouni, “Process optimization via response surface methodology in the physico-chemical treatment of vegetable oil refinery wastewater,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 19, pp. 18993–19011, Jul. 2019, doi: 10.1007/S11356-018-2657-Z/FIGURES/16.
- [19] E. I. Ohimain and S. C. Izah, “A review of biogas production from palm oil mill effluents using different configurations of bioreactors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 242–253, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.221.
- [20] J. Coca, G. Gutiérrez, and J. M. Benito, “Treatment of oily wastewater,” *Water Purification and Management*, vol. 101, pp. 1–55, 2011, doi: 10.1007/978-90-481-9775-0_1.
- [21] V. Eroglu, I. Ozturk, H. A. San, and I. Demir, “Comparative evaluation of treatment alternatives for wastewaters from an edible oil refining industry,” *Water Science and Technology*, vol. 22, no. 9, pp. 225–234, Sep. 1990, doi: 10.2166/wst.1990.0086.
- [22] J. Zhang *et al.*, “Enhanced Purification and Disinfection of Restaurant Wastewater by Electro-coagulation Coupled with an Electro-oxidation Process: From Lab Scale to Field Scale,” *ACS ES&T Engineering*, vol. 3, no. 7, pp. 932–943, Jul. 2023, doi: 10.1021/acsesteng.2c00381.
- [23] A. E. Bailey and F. Shahidi, *Bailey’s industrial oil & fats products*, 6th ed. Memorial University of Newfoundland: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] D. Kalat, “Bitkisel Yağ Sanayii Rafinasyon Atıksularının Anaerobik Mezofilik ve Termofilik Şartlarda Arıtılabilirliği,” Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi, Adana, s.181, 2011.
- [25] Y. Bi *et al.*, “Star-shaped quaternary ammonium compounds with terminal amino groups for rapidly breaking oil-in-water emulsions,” *Fuel*, vol. 304, p. 121366, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.FUEL.2021.121366.
- [26] T. Ahmad *et al.*, “Utilization of wastewater from edible oil industry, turning waste into valuable products: A review,” *Trends Food Sci Technol*, vol. 99, pp. 21–33, May 2020, doi: 10.1016/j.tifs.2020.02.017.
- [27] C. S. Lee, J. Robinson, and M. F. Chong, “A review on application of flocculants in wastewater treatment,” *Process Safety and Environmental*

- Protection*, vol. 92, no. 6, pp. 489–508, Nov. 2014, doi: 10.1016/J.PSEP.2014.04.010.
- [28] G. Louhichi, L. Boussemmi, A. Ghrabi, and I. Khouni, “Process optimization via response surface methodology in the physico-chemical treatment of vegetable oil refinery wastewater,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 19, pp. 18993–19011, Jul. 2019, doi: 10.1007/s11356-018-2657-z.
- [29] O. Hartal *et al.*, “Optimization of coagulation-flocculation process for wastewater treatment from vegetable oil refineries using chitosan as a natural flocculant,” *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 22, p. 100957, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.enmm.2024.100957.
- [30] C. Zhao *et al.*, “Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review,” *Science of The Total Environment*, vol. 765, p. 142795, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.142795.
- [31] A. Kayvani Fard *et al.*, “Enhancing oil removal from water using ferric oxide nanoparticles doped carbon nanotubes adsorbents,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 293, pp. 90–101, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.CEJ.2016.02.040.
- [32] C. An, G. Huang, Y. Yao, and S. Zhao, “Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review,” *Science of the Total Environment*, vol. 579, pp. 537–556, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.062.
- [33] F. El-Gohary, A. Tawfik, and U. Mahmoud, “Comparative study between chemical coagulation/precipitation (C/P) versus coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) for pre-treatment of personal care products (PCPs) wastewater,” *Desalination*, vol. 252, no. 1–3, pp. 106–112, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.desal.2009.10.016.
- [34] Ş. ve İ. D. B. Çevre, “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği,” Ankara, 2022.
- [35] APHA/AWWA/WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 2012. doi: ISBN 9780875532356.
- [36] R. Jamwal *et al.*, “Attenuated total Reflectance–Fourier transform infrared (ATR–FTIR) spectroscopy coupled with chemometrics for rapid detection of argemone oil adulteration in mustard oil,” *LWT*, vol. 120, p. 108945, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.LWT.2019.108945.
- [37] R. Jamwal *et al.*, “Recent trends in the use of FTIR spectroscopy integrated with chemometrics for the detection of edible oil adulteration,” *Vib Spectrosc*, vol. 113, p. 103222, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.VIBSPEC.2021.103222.
- [38] P. Scardina, G. Copeta, and P. Teragni, “Analysis of oil in water using the agilent Cary 630 FTIR,” USA, 2014.
- [39] T. Turna, “Treatment of vegetable oil industry wastewaters by electrochemical methods,” Doctoral Thesis, Erciyes University, 135 p., 2020.
- [40] H. YANG, J. IRUDAYARAJ, and M. PARADKAR, “Discriminant analysis of edible oils and fats by FTIR, FT-NIR and FT-Raman spectroscopy,” *Food Chem*, vol. 93, no. 1, pp. 25–32, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.foodchem.2004.08.039.
- [41] A. A. Al-Shamrani, A. James, and H. Xiao, “Destabilisation of oil–water emulsions and separation by dissolved air flotation,” *Water Res*, vol. 36, no. 6, pp. 1503–1512, Mar. 2002, doi: 10.1016/S0043-1354(01)00347-5.
- [42] F. Özyonar and B. Karagözoğlu, “Removal Of Turbidity From Drinking Water By Electrocoagulation And Chemical Coagulation,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 27, no. 1, pp. 81–89, 2012.
- [43] O. S. Amuda, I. A. Amoo, and O. O. Ajayi, “Performance optimization of coagulant/flocculant in the treatment of wastewater from a beverage industry,” *J Hazard Mater*, vol. 129, no. 1–3, pp. 69–72, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.078.
- [44] E. K. Tetteh, S. Rathilal, and K. Robinson, “Treatment of industrial mineral oil wastewater – effects of coagulant type and dosage,” *Water Pract Technol*, vol. 12, no. 1, pp. 139–145, Mar. 2017, doi: 10.2166/wpt.2017.021.
- [45] F. Özyonar and B. Karagözlüoğlu, “Mezbahane atıksularından KOİ, yağ-gres ve bulanıklık giderimi üzerine bir çalışma: kimyasal koagülasyon prosesiyle ön arıtım,” *Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 32, no. 1, 2011.
- [46] M. Chatoui, S. Lahsaini, A. Aguelmous, S. Souabi, M. A. Bahlaoui, and A. Jada, “Moroccan Journal of Chemistry Removal of oil and grease from vegetable oil refinery wastewaters by coagulation-flocculation process,” *Moroccan*

- Journal of Chemistry*, vol. 5, no. 4, pp. 683–690, Jul. 2017.
- [47] I. Khouni, G. Louhichi, A. Ghrabi, and P. Moulin, “Efficiency of a coagulation/flocculation–membrane filtration hybrid process for the treatment of vegetable oil refinery wastewater for safe reuse and recovery,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 135, pp. 323–341, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.01.004.
- [48] M. Basibuyuk and D. G. Kalat, “The use of waterworks sludge for the treatment of vegetable oil refinery industry wastewater,” *Environmental Technology (United Kingdom)*, vol. 25, no. 3, pp. 373–380, 2004, doi: 10.1080/09593330409355471.
- [49] C. Haddaji, K. Ennaciri, A. Driouich, K. Digua, and S. Souabi, “Optimization of the coagulation-flocculation process for vegetable oil refinery wastewater using a full factorial design,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 160, pp. 803–816, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.02.068.
- [50] A. Almojjly, D. Johnson, D. L. Oatley-Radcliffe, and N. Hilal, “Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation/sand filter as pre-treatment,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 26, pp. 17–27, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.09.004.



Lefkoşa Selimiye Camii Yapısal Özellikleri ve İyileştirilmiş Deprem Performansı İçin Bir Ön Çalışma

Structural Properties of Nicosia Selimiye Mosque and Preliminary Intervention Recommendations for Improved Seismic Performance

Tuğçe Alan^{1*}, Alper İlki²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Bölümü, alan20@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5185-4758>

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ilki@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4853-7910>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 14 Mayıs 2024
Revizyon 7 Haziran 2024
Kabul 26 Haziran 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Tarihi Yapılar, Lefkoşa Selimiye Camii, Yapısal Performans Analizi, Sonlu Elemanlar Modeli

ÖZ

Tarihi yapılar, kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılabilmesinde önemli rol oynayan unsurlardır. Bu devamlılığın sağlanabilmesi için tarihi yapıların depremlere rağmen asırlar boyunca ayakta kalabilmesi esas amaçlardan olmuştur. Depremi neden olabileceği yıkımların önüne geçebilmek için öncelikle tarihi yapıların deprem güvenliği belirlenmeli ve gerekmesi halinde deprem performansının iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmalıdır. Bu makale kapsamında Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne ait Lefkoşa ilinde yer alan gotik kilise örneklerinden Selimiye Camii taşıyıcı sistemi yapısal davranışı, makro modelleme yaklaşımı ile tepki spektrumu analizi yapılarak değerlendirilmiştir. Makalede, yapının düşey yükler ve deprem etkileri altındaki performansının iyileştirilmesine yönelik müdahale önerilerine yer verilmiştir. Bu çalışmada geçen modelleme, analiz ve öneriler, sözkonusu yapı üzerinde gerçekleştirilmekte olan restorasyon çalışmalarından farklı modelleme, analizler ve müdahalelere dayanmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 May 2024
Received in revised form 7 June 2024
Accepted 26 June 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Historical buildings, Nicosia Selimiye Mosque, Structural Performance Analysis, Finite Element Modeling,

ABSTRACT

Historical buildings play a crucial role in transferring cultural heritage to future generations. Ensuring the continuity of this heritage has been one of the primary goals, particularly in enabling historical structures to withstand earthquakes for centuries. To prevent earthquake damage, it is essential to first assess the seismic safety of historical buildings and then conduct interventions to improve their seismic performance when necessary. Within the scope of this article, the structural behavior of the Selimiye Mosque, an example of Gothic churches located in the city of Nicosia in the Turkish Republic of Northern Cyprus, was evaluated through response spectrum analysis, for which macro modeling approach was implemented. The article also presents intervention proposals aimed at enhancing the performance of the structure under vertical loads and seismic effects. Macro modeling, analysis, and recommendations presented are limited to the scope of thesis and article research, while the ongoing restoration efforts on the structure rely upon distinct modeling, analyses, and interventions.

Doi: 10.24012/dumf.1483819

* Sorumlu Yazar

Giriş

Geçmişten günümüze tarihi yapıları en çok etkileyen, geri dönüşü çok zor olan, büyük ve kalıcı hasarlar veren faktör deprem olmuştur. Depremün önüne geçebilmek için öncelikle tarihi yapıların deprem güvenliği belirlenmeli ve gerekmesi halinde deprem performansının iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmalıdır. Bunun için tarihi yapıların mevcut taşıyıcı sistem özelliklerinin gerçekçi bir biçimde belirlenmesi ve sistemin deprem performansının artırılması için uygulanabilir çözümler geliştirilmesi gerekmektedir [9].

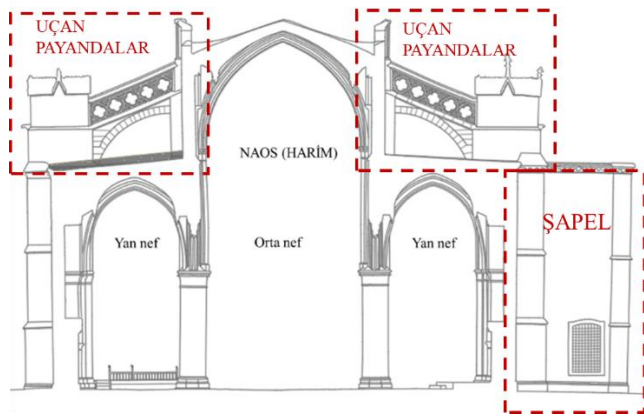
Bu çalışma kapsamında Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne ait Lefkoşa ilinde yer alan Selimiye Camii taşıyıcı sisteminin yapı mühendisliği açısından değerlendirilmesi ele alınmıştır. Yapıda bulunan tüm elemanlar için analiz ve tahkikler yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Çalışma kapsamında, yapının düşey yükler ve deprem etkileri altındaki performansının iyileştirilmesine yönelik müdahale önerilerine yer verilmiştir. Tarihi yapıların korunmasına yönelik temel ilkeler gereği önerilen müdahaleler olabildiğince sınırlı düzeyde tutulmuştur.

Modelleme, analiz ve öneriler sadece tez ve makale çalışması kapsamında yapılmış olup, yapı üzerinde gerçekleştirilmekte olan restorasyon çalışmaları ile ilgisi bulunmamaktadır.

Lefkoşa Selimiye Camii

Dünya mimari mirasının Gotik örneklerinden olan yapı 1209-1326 yılları arasında bir Katolik kilisesi olarak inşa edilmiştir. Lüzinyanlar Döneminde inşa edilen St. Sophia Katedrali'nin yapıyla dini bir merkez olarak oluşmaya başlamış ve sonraki tarihi dönemlere ait çevresel gelişimi tamamlanarak Lefkoşa'nın önemli bir tarihi doku parçası olmuştur [18]. Yapının 1431 yılında meydana gelen deprem sonrası batıdaki üst bölümünün yıkıldığı ve 1432'de hasarın tamir olması için restorasyon geçirdiği düşünülmektedir [1]. Güney yan nefin orta kısmından taşacak şekilde inşa edilen şapel bölümü ve orta nef duvarlarını destekler şekilde konumlanan kesme taş uçan payandaların yapıya sonradan, apsisteki uçan payandaların ise 14. Yüzyılın ikinci yarısında eklendiği bilinmektedir, Şekil 1 [2].



Şekil 1. Yapıya sonradan eklenen kısımlar- kesit.

Ayrıca 1547'de yapı başka bir depremle zarar görmüş, uzun süre ihmal edilmiş ve 1565'te genel bir restorasyon yapılmıştır [2]. Katedral, Osmanlı döneminde katedral girişinin iki yanındaki bitirilememiş olan çan kulelerinin

üzerine, yaklaşık 46 metre yüksekliğinde minareler, mihrap ve minber eklenerek camiye çevrilmiştir. Osmanlı döneminde birçok kez restore edilmiş olan yapı, özellikle 16.yy ve 18.yy'da yaşanan depremlerden çok zarar gördüğünden, kapsamlı yapısal çalışmalar yapılmış ve duvarların desteklenmesi için güneyine kemerli uçan payandalar ile iki tane fil ayağı inşa edilmiştir [3,4]. 1571 yılından sonra başlayan Osmanlı hükümdarlığı ile, İslam dinine uygunluğu açısından kulelerin minareye çevrilmesi gibi yapısal değişikliklere uğramıştır [20]. 1741 yıllarında olan şiddetli bir depremde caminin minaresinin hasar aldığı bilinmektedir. Bunun üzerine kuzey minarenin ana binadan ayrılması nedeniyle yıkılma tehlikesi geçirdiği düşünülerek 1902'de yıkılarak tekrar inşa edilme kararı alınmış, 1922'de bu karar gerçekleştirilmiştir [1]. 1968-1974 yılları arasında UNESCO uzmanları Profesör P. Gazzola ve Dr. C. Musso'nun yönetiminde kapsamlı şekilde yapısal restorasyon yapılmıştır (Şekil 2) [5,19]. Bu restorasyonda yapının güney kısmında çıkıntı oluşturan iki şapel bölümü inşa edilmiştir. Restorasyonda, dönemin restorasyonlarında yaygın olarak kullanılan çimento harcı yerine, ilk kez yapısal anlamda katkı sağlayacak bir tamir harcı türevi kullanılmıştır [19]. 1986 yılında ise Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti döneminde Vakıflar İdaresi'ne devredilen Selimiye Camii'nin, zaman zaman gereken bakım ve onarımları, Vakıflar tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapının günümüzdeki hali Şekil 3'te verilmiştir.



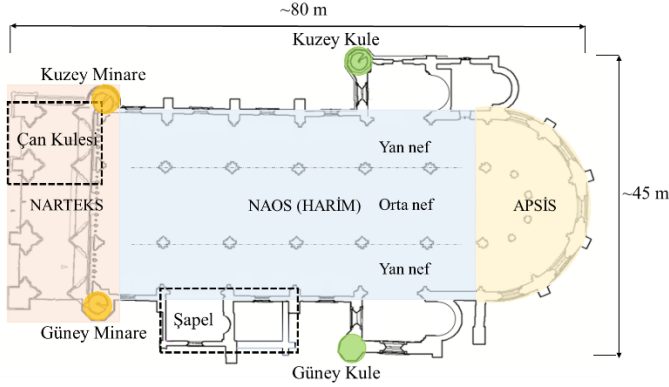
Şekil 2. 1968-1974 yılları arasında yapılan restorasyon [19].



Şekil 3. Günümüzden bir görünüş.

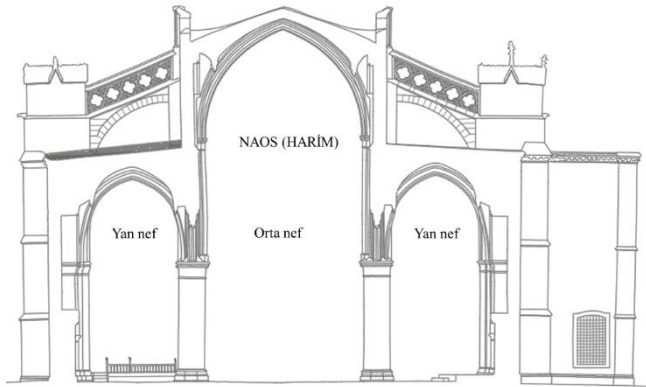
Yapısal Özellikler

Lefkoşa Selimiye Camii'nin ana yapısı narteks, naos (harim) ve apsis bölümlerinden oluşmaktadır. Yapının önemli ve çalışmada adı geçen bölgeleri Şekil 4'te verilmiştir. Yapının plan boyutları x doğrultusunda 80 m, y doğrultusunda 45 m mertebelerindedir.

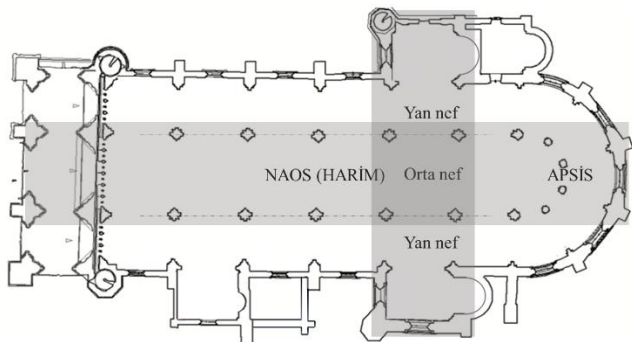


Şekil 4. Yapıya ait ana bölümler- Plan.

Narteks bölümü 8 adet devasa kesme taş fil ayağından oluşmaktadır ve üzerinde bir çan kulesi bulunmaktadır. Harim bölümü iki sıra halinde altışar dairesel kesme taş sütunla üç nef ayrılan, bazilikal planlıdır. Ana (orta) nef yan neflerden daha yüksek ve geniş olarak tasarlanmıştır. Yapıda bulunan kesme taş uçan payandalar orta nef duvarlarını destekler niteliktedir. Orta nefin yüksekliği 22 m, yan neflerin kat yükseklikleri 13.2 m mertebelerindedir (Şekil 5).



Şekil 5. Yapıya ait ana bölümler- Kesit.



Şekil 6. Yapı transeptinin görünüşü.

Yapının aslında transepti olmamasına rağmen, kuzeyinde ve güneyinde bulunan birer şapel yapı formuna dik doğrultu kazandırmış ve transept oluşturmuştur (Şekil 6). Transeptin uç kısımlarından, yapının kuzey ve güneyinde konumlanmış ana yapıya tamamen bağlı durumdaki kulelere ulaşabilmektedir. Kulelerin yükseklikleri 19.6 m olarak ölçülmüştür. Apsis bölümündeki dairesel sütunlar harim bölümündeki dairesel sütunlardan daha küçük kesitlere sahiptir. Orta nefte olduğu gibi apsis kısmında da üst duvarlar uçan payandalarla desteklenmiştir. Uçan payandalarla desteklenen orta nefin üzeri ve yan neflerin üzerine dolgu yapılmıştır, bunun sonucunda yan neflerin üstü düze çok yakın bir forma ulaşmıştır. Caminin kuzeybatı ile güneybatı köşelerinde yapıya bitişik olarak yükselen, kesme taştan yapılmış, tek şerefeli iki minare bulunmaktadır. Minarelerin yükseklikleri 46 m mertebelerindedir. Minareler sekizgen planlı başlamakta olup silindirik gövdelidir. Yapının üst örtüsü, düzgün kesme taş örgü ile inşa edilmiş kaburgalı çapraz tonozlardan oluşmaktadır (Şekil 7). Kaburgalı çapraz tonozların plan boyutları x doğrultusunda 9.5 m, y doğrultusunda 7.5 m mertebelerindedir.

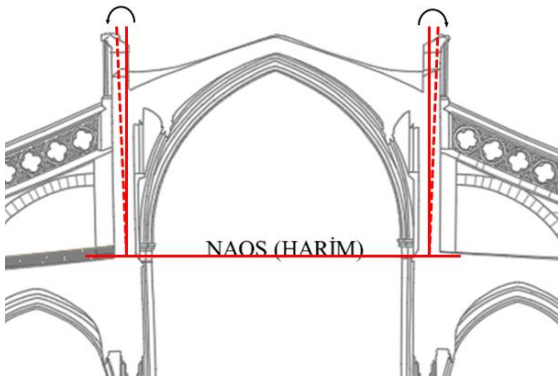


Şekil 7. Yapıya ait kaburgalı çapraz tonozlar.

Tonoz kalınlıkları, yapının yapısal analizler esnasında gerçekçi olarak incelenebilmesi amacıyla üzerinde bulunan mevcut dolgular kaldırıldıktan sonra 35 cm olarak ölçülmüştür. Yapının beden duvarları da diğer yapı bölümleri ile aynı olmak üzere düzgün kesme taş örgüye sahiptir. Beden duvarı kalınlıkları 78 cm ile 165 cm arasında değişmektedir.

Yapının Mevcut Hasarları

Yapının maruz kaldığı depremler ve zemin oturmaları sonucunda taşıyıcı sisteminde bazı hasarların meydana geldiği görülmüştür. Rölöveler aracılığıyla orta nef beden duvarlarının, her iki tarafta olmak üzere dışa doğru yaklaşık 2° döndüğü tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Orta nef beden duvarlarındaki 2 derecelik dönme.

Yapısal analizde gerçeğe uygun sonuçlar alınabilmesi amacıyla mevcut durumdaki orta nef duvarı dönmeleri oluşturulan numerik modele yansıtılmıştır. Haricindeki ileri düzeyde çatlak, ayırık vb deformasyonlar sonlu elemanlar modeline yansıtılmamıştır. Sahada gerçekleştirilen incelemeler esnasında tonozların iç mekan tarafındaki alçı tabakaları sıyrılmış, bunun sonucunda tonozların büyük çoğunluğunda çatlaklar ve yapı genelinde derzlerde malzeme kayıpları gözlenmiştir. Oluşan ayrılmaların 7 cm mertebelerine ulaştığı görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. Tonozlar- orta nef beden duvarı birleşim bölgesinde oluşan çatlak ve ayrılmalar.

Narteks bölümünün kuzey tarafında bulunan Çan Kulesi pencere boşlukları altındaki duvarlarda 1 cm mertebelerinde düşey çatlaklar ve derz boşlukları bulunmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Çan kulesi pencere altlarında oluşan derz boşlukları ve çatlaklar.

Ayrıca yapının güneybatı tarafında kalan Şapel bölümüne ait y doğrultusundaki duvarların güney duvarıyla birleşme bölgelerinde yapı temelinden başlayarak yapı yüksekliği boyunca aralıklı olarak devam eden derin ayrılmalar meydana gelmiştir. Bu ayrılmaların en geniş olduğu bölgenin uzunluğu yaklaşık 2 m olarak ölçülmüştür (Şekil 11). Aynı duvarın zemine yakın bölgelerinde ileri düzeyde derz boşalması bulunmaktadır. Ek olarak Şekil 11'de görülen pencere boşluğu duvarda düzensizlik oluşturduğu ve bunun sonucunda bu bölgelerde duvar gerilmelerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 11. Şapel bölümü duvarında meydana gelen ayrılma.

Yapıya ait beden duvarlarının dış cephesindeki taşlarda yer yer derz boşalması, kararma, malzeme yapısının bozulması ve buna bağlı olarak eksilmeler bulunmaktadır.

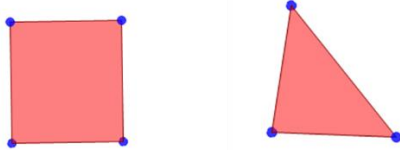
Yapısal Modelleme ve Malzeme Kabulü Seçimleri

Modelleme Yöntemi Seçimi

Lefkoşa Selimiye Camii'nin modellenmesi ve analizlerinin yapılabilmesi için çok sayıda modelleme ve analiz teknikleri olmasına rağmen, gelişmiş sayısal yöntemler kullanılarak karmaşık analizlerin yapılmasına olanak sağlayan, bu yüzden de en yaygın olarak tercih edilen yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlamda yapısal analizler SAP2000 v22 [21] yazılımı kullanılarak mod birleştirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapının sonlu elemanlar modeli makro modelleme yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Makro modelleme yaklaşımında, yığma malzemeye ait yığma birimi ve harç homojenleştirilmekte ve beden duvarlarının bütün doğrultularda tek bir malzeme özelliği gösterdiği kabul edilmektedir. Yapılan analizlerin sonucunda ortaya çıkan kritik bölgeler için makro modelleme yaklaşımı yeterli görülmez ise, yalnızca o bölgeye özgü olarak mikro modelleme yaklaşımı kullanılabilir [7,8].

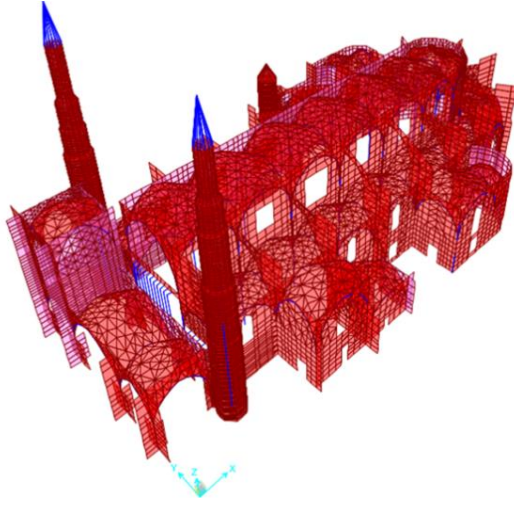
Yapının numerik modellemeleri oluştururken sütunlar çubuk (frame) elemanlarla, tonoz ve duvarlar kabuk (shell) elemanlarla modellenmiştir. Yapı modeli, toplam 1452 adet çubuk ve 26163 adet kabuk eleman ile oluşturulmuştur. Yapıda bulunan kemerlerin formu, yaklaşık 1.6 m olacak şekilde ayrılmış çubuk elemanlar ile gerçeğe en uygun şekilde verilmiştir. Tüm kabuk elemanlar, sınırlı ve benzer büyüklükteki, üç ya da dört düğüm noktasına sahip sonlu elemanlar parçalarına ayrılmıştır (Şekil 12). Her bir düğüm noktası üç eksende deformasyon ve dönme serbestliği olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Kabuk elemanların

alanları 1 ile 2 m² arasında oluşturulmuştur. Elemanlar kareye yakın ve üçgen formda oluşturulmuş olup maksimum kenar uzunluğu 1.5 m olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 12. Modelde oluşturulan kabuk eleman formları

Farklı kalınlıklardaki beden duvarlarının bulunduğu çevre mesnetlere göre oldukça zayıf olduğu düşünülen tonozların rijit bir diyafram şeklinde çalışmayacağı öngörülmüş, rijit diyafram kabulü yapılmamıştır. Yapının üst örtüsü üzerindeki yer yer değişen dolgu kalınlıklarının sebep olduğu farklı dolgu yükleri gerçeğe uygun şekilde bölgelere göre hesaplanıp sabit yük olarak etkilmiştir. Yapının oluşturulan numerik modeline ait 3D görünüş Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Yapı için oluşturulan makro model.

Malzeme Kabulü

Lefkoşa Selimiye Camii'nin tüm yapısında yalnızca kesme taş kullanılmıştır. Yapısal analizler ve tahkikler esnasında gerekli olan yığma malzemesinin elastisite modülü, basınç, çekme ve kayma dayanımları gibi mekanik özellikleri Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'ndaki malzeme tablolarındaki düzgün kesme taş özellikleri göz önünde bulundurularak öngörülmüştür. Buna göre, mevcut durumda düzgün kesme taşlardan yapılan yığma duvarlar için elastisite modülü 2580 MPa, basınç dayanımı 3.5 MPa, başlangıç kayma dayanımı da 0.088 MPa alınmıştır. Kabul edilen malzeme dayanımları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yığma duvar malzemelerinin mekanik özellikleri [9]

Duvar Türü	Basınç Dayanımı f _m (MPa)	Kayma Dayanımı τ ₀ (kPa)	Elastisite Modülü E (MPa)	Kayma Modülü G (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)
Düzgün Kesme Taşlı, Sıvalı Yığma Duvar	3.0~4.0	78~98	2340~2820	390~470	22

Kayma gerilmesi için yapılan tahkiklerde malzemenin başlangıç kayma dayanımına ilave olarak elemanlarda meydana gelen normal kuvvetin kayma dayanımına yapacağı katkı da dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, elemanlarda meydana gelen kayma gerilmesi aşağıdaki bağıntı (1) ile hesaplanan kayma dayanımı ile karşılaştırılmıştır.

$$\tau = \tau_0 + 0.4\sigma \quad (1)$$

τ : Kayma dayanımı

τ₀ : Başlangıç kayma dayanımı

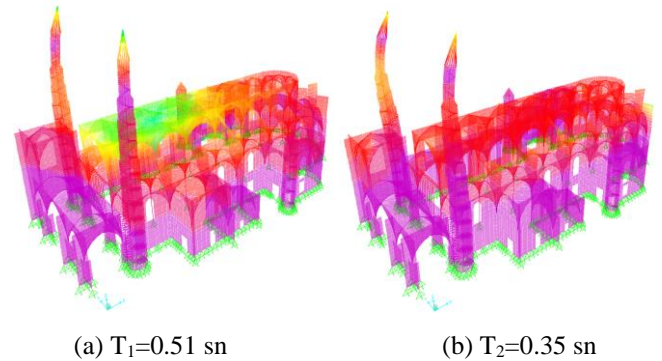
σ : Gerilme

Yapının Modal Analizi ve Modelde Yapılan Güncellemeler

Modal Analiz

Modal analiz ile yapı sisteminin kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak, mod şekilleri ve periyotlar elde edilmektedir. Yapının modal analizi için Özdeğer yöntemi kullanılmıştır. Lefkoşa Selimiye Cami'ye ait sonlu eleman modelinin Sap2000 programında modal analizi yapılmış ve %95 mertebelerindeki kütle katılım oranına 400 mod şekli ve serbest titreşim periyodu ile ulaşılmıştır.

Yapının ilk modlarında minarelerin karakteristikleri etkili olmuştur. Minarelere ait en yüksek periyot 1.16 saniye olarak elde edilmiştir. Ana yapıda etkili olan ilk modlarda, uçan payandalar ile desteklenen orta nef beden duvarların karakteristikleri etkili olmuştur. Ana yapı için kısa doğrultuda (Y doğrultusu) %45 kütle katılımı ile periyot 0.51 saniye olarak elde edilirken uzun doğrultuda (X doğrultusu) %30 kütle katılım ile 0.35 saniye olarak elde edilmiştir. Ana yapıda hakim olan ilk iki mod şekli Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Yapı için oluşturulan makro model.

Yapı Sağlığı İzleme Çalışmaları ve Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi

Yapı sağlığı izleme(YSİ) sistemi ile yapıda yerel ölçümler gerçekleştirilerek yapının doğal titreşim modları elde edilmeye çalışılmıştır. Yapının çeşitli bölgelerinde yaygın hasar bulunması sebebiyle yapı sağlığı izleme sisteminden elde edilecek dinamik özelliklerin sonlu elemanlar modelinde elde edilecek dinamik özelliklerden farklılık gösterebileceği düşünülmüştür. Buna göre sonlu elemanlar modelinde elde edilen frekans değerleri ile yapının bazı noktalarında ihmal edilebilir form değişiklikleri sonucunda

oluşan dinamik özelliklerin olabildiğince yakın olması amaçlanmıştır ve numerik modelde yığma duvar malzemesine ait elastisite modülünün 2500 MPa değerinden 3500 MPa değerine getirilmesi uygun bulunmuştur.

Tarihi Yapılarda Yapısal Değerlendirme ve Performans Hedefleri

Lefkoşa Selimiye Camii'nin yapısal değerlendirmesinde, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda yer alan esaslar dikkate alınmıştır. Bu bölümde deprem yer hareketi düzeyleri ve hedef performans düzeylerinden bahsedilecektir.

Söz konusu kılavuzda [9], tarihi yapıların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi için 3 farklı deprem yer hareketi düzeyi ve 3 farklı performans düzeyi belirtilmiştir. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem güvenliğinin değerlendirilmesi için Tablo 2'de verilen deprem düzeyleri öngörülmektedir.

Tablo 2. Deprem yer hareketi düzeyleri [9].

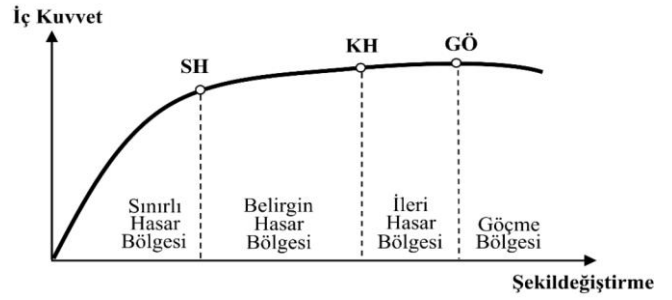
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	50 Yılda Aşılma Olasılığı	Tekrarlanma Periyodu	Deprem Yer Hareketi ve İsimlendirme
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)	2%	2475	Çok seyrek/ En Büyük Deprem
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)	10%	475	Seyrek/ Tasarım Depremi
Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3)	50%	72	Sık/ Sık Deprem

Değerlendirmesi yapılacak tarihi yapının önemi, kullanıcı, ziyaretçi sayısı ve işlevselliği göz önünde bulundurularak performans düzeyi belirlenmektedir.

Belirli bir deprem etkisi altındaki tarihi yapılar için 'Yapısal Performans Düzeyleri' Tablo 3'te tanımlanmış olup, şematik bir iç kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 15'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Deprem performans düzeyleri [9].

Performans Düzeyi	50 Yılda Aşılma Olasılığı
Sınırlı Hasar (SH)	Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği hasar düzeyi
Kontrollü Hasar (KH)	Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında çoğunlukla onarılması mümkün olan hasarların meydana geldiği hasar düzeyi
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği hasar düzeyi



Şekil 15. Şematik iç kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi ve hasar sınır durumları [17].

Tarihi yapılarda yapı önemine bağlı olarak tanımlanan "Hedef Performans Düzeyleri" Çizelgesine [9] göre, Lefkoşa Selimiye Camii "Ulusal Öneme Sahip Tarihi Yapı" olarak sınıflandırılarak kılavuzda bu sınıftaki yapılar için öngörülen performans hedefini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Buna göre yapının 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (475 yıl dönüş periyodu olan deprem (DD-2)) deprem etkisi altında "Kontrollü Hasar" düzeyi performans seviyesini sağlaması hedeflenmiştir.

Bu bağlamda Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'na (2017) göre "Kontrollü Hasar" performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü için doğrusal hesap yaklaşımının (mod birleştirme yöntemi) kullanılması durumunda düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile azaltılmış deprem etkisi altında taşıyıcı sistem elemanlarının mevcut dayanımlarının aşılması gerekmektedir.

Sahaya Özel Depremsellik Çalışması

Bölgenin depremselliği sahaya özel sismik tehlike analizi ile belirlenmiştir. Bunun için SHARE (Seismic Hazard Harmonisation in Europe) projesi kapsamında oluşturulmuş tarihsel deprem katalogları, aletsel ölçüm katalogları, alansal ve çizgisel kaynak modelleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 3 farklı yer hareketi tahmin denklemi kullanılmıştır. Söz konusu ilişkiler ve katılım oranları Tablo 4'te sunulmuştur.

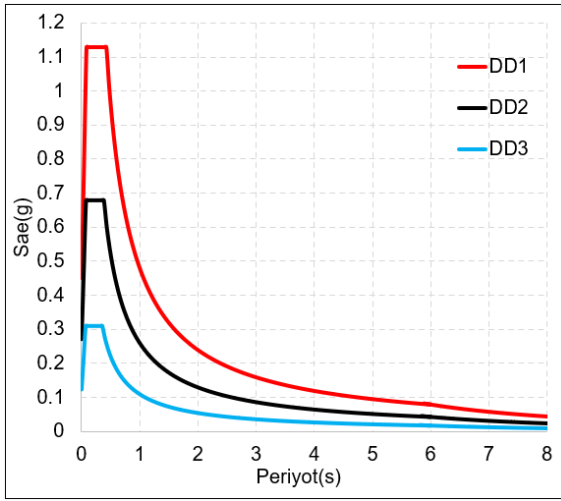
Tablo 4. Hesaplamalarda kullanılan 3 farklı azalım ilişkisi ve katılım oranları

Azalım İlişkisi	Katılım Oranı
Kale ve Diğ. 2015 [10]	%34
Boore ve Atkinson 2008 [11]	%33
Chiou ve Youngs 2008 [12]	%33

Sahaya özel sismik tehlike analizinden 72, 475 ve 2475 yıl dönüş periyoduna sahip deprem düzeyleri için elde edilen kısa periyot spektral ivme katsayısı S_s , 1 saniye periyot için spektral ivme katsayısı S_1 ve en büyük yer ivmesi (PGA) değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Çizelgedeki değerler 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tasarım spektrumu için belirtilen denklemlerde yerine konulduğunda elde edilen yatay elastik ivme spektrumları Şekil 16'da verilmiştir.

Tablo 5. Sahaya özel sismik tehlike analizi sonuçları

	72 yıl dönüş periyodu olan deprem	475 yıl dönüş periyodu olan deprem	2475 yıl dönüş periyodu olan deprem
PGV (cm/s)	9,52	21,98	40,28
PGA (g)	0,13	0,29	0,48
S_a (T=0.2)	0,31	0,68	1,13
S_a (T=1) (g)	0,11	0,26	0,48



Şekil 16. TBDY-2018 denklemleri kullanılarak elde edilen Yatay Elastik İvme Spektrumu.

Zemin Çalışmaları ve Yapı Temeli

Sondaj Çalışmaları

Yapının bulunduğu bölgenin zemin özelliklerinin belirlenmesi için derinlikleri 18 m ile 31.5 m arasında değişen 8 farklı noktada sondaj çalışması gerçekleştirilmiş olup açılan sondaj kuyularında Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapılmıştır [16]. 6 adet sondaj kuyusu açılarak presiyometre deneyleri yapılmış ve limit basınç (PL) değerleri belirlenmiştir.

Yapılan sondajlarda zemin kesitinin tek eksenli basınç direnci $q_u > 400$ kPa'dır. V_{s30} (m/sn) değerleri 300-334 m/s olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan kil tabakasının çok katı-sert kıvamda olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen V_{s30} (m/sn) değerleri ve zemin tipi göz önüne alındığında zemin sınıfı TBDY 2018' e göre ZD olarak bulunmuştur [13] (Tablo 6).

Tablo 6. Elde edilen zemin sınıfı

Yerel Zemin Sınıfı	$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZD	180-360	15-50	70-250

Zemin Yapısı Değerlendirmesi

Yapı boyutları ve temel derinliği dikkate alınarak taşıma gücü analizleri Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'ye göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre zemin emniyet gerilmesi değeri 374 kPa olarak belirtilmiştir. Düşey Yatak Katsayısı ise 37000 kN/m^3 olarak verilmiştir. Söz konusu zemin emniyet gerilmesi değeri emniyet faktörü 3 kabul edilerek elde edilmiştir. Buna göre 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre karakteristik zemin taşıma gücü değeri 1122 kPa, tasarım güvenli taşıma gücü değeri ise 800 kPa olarak elde edilmiştir [13].

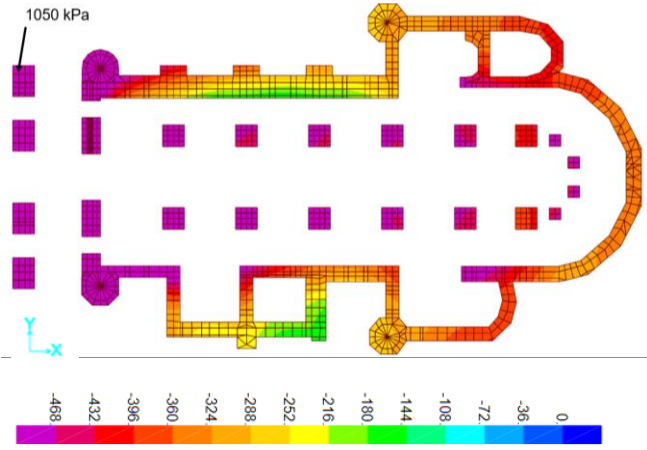
Yapının yüklerinin aktarıldığı kesme taş, moloz dolgu temel sistemi ile çok katı-sert kıvamdaki çakıllı kil tabakasının taşıma gücü ve yapı oturmaları yönünden uygun bir temel zemini olduğu, açılan muayene kuyularında, üst yapıda görülen ayrılma, çatlak vb hasarların yapının temel sisteminde devam etmediği, yapının zamana bağlı konsolidasyon oturmasını tamamlamış durumda olduğu, temel zemininde mevcut koşullarda ilave bir oturma ya da deprem anında zemin sıvılaşması beklenmediği, saha çalışmaları sırasında yer yer duvar/sütun altında bulunan malzemede bozulmalar, moloz dolguda kısmi boşluklar gözlemlendiği, bu tür hasarların gözlemlendiği bölgelerde malzeme onarımı ile birlikte temellerin oturduğu çakıllı malzemede, düşük basınçlarda emdirme enjeksiyonu yapılarak bölgesel bir iyileştirmenin yararlı olacağı bilgi ve görüşlerine yer verilmiştir [13].

Zemin Gerilmelerinin Tahkiki

Selimiye Camii zemin incelemeleri kapsamında yapılan çalışmalar doğrultusunda, toplam 11 adet muayene kuyusu açılarak temel boyutları net bir şekilde elde edilmiştir. Buna göre yapının kuzey kısmındaki beden duvarlarının altında kalan temel boyutları y doğrultusunda 2.9 m ve temel yüksekliği 1.2 m, güney kısmındaki beden duvarlarının altında kalan temel boyutları y doğrultusunda 1.5 m ve temel yüksekliği 1 m olarak alınmıştır. İç hacimde yapılan tek kazı sonucunda ise sütunların altında 2.2 m yüksekliğinde, 2.8 m x 2.8 m boyutlarında kare temel kabul edilmiştir. Yapı temelinin üst yapıda olduğu gibi düzgün kesme taş ile teşkil edildiği görülmüştür.

Yapı temeli üst yapıda olduğu gibi gerçeğe en uygun şekilde SAP2000 v22 [21] yapısal analiz programı kullanılarak makro modelleme yaklaşımı ile doğrusal analiz yapılmıştır. Temele ait mesnet koşulları yalnızca z ekseninde ötelenebilir ve yalnızca z ekseninde dönemez olarak tanımlanmıştır.

Buna göre deprem etkilerini içeren yük kombinasyonları içerisinde temel tabanında oluşan en büyük zemin gerilmesi değeri 1050 kPa olarak elde edilmiştir. Söz konusu bu değer yalnızca Narteks kısmının altında meydana gelmiştir. Gerilme değeri tasarım güvenli taşıma gücü değerinin üstünde kalmakla beraber karakteristik taşıma gücü değeri olan 1122 kPa değerinin altında kalmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17. Yapıya ait mevcut temelde oluşan zemin gerilmeleri (kPa) (X ve Y doğrultusundaki deprem etkileri için en elverişsiz durum).

Yapının Deprem Etkileri Altında Davranışının Değerlendirilmesi

Makro modelleme yöntemi kullanılarak modellenen Selimiye Cami yapısının düşey yükler ve deprem etkileri altında doğrusal analizi yapılmıştır. Analizlerde deprem etkilerinin düşey bileşeni $\frac{2}{3}S_{ds}$ olarak dikkate alınmıştır.

X doğrultusundaki deprem etkileri $G+Q+Eq_x+Eq_z$, Y doğrultusundaki deprem etkileri $G+Q+Eq_y+Eq_z$ olarak dikkate alınmıştır. Modelin taban noktaları sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Her bir analiz durumu, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu [9]'na göre değerlendirilmiştir. İlgili yapı elemanlarının XTRACT yazılımıyla moment ve eğrilik bilgileri elde edilmiştir. Duvarlar ve payandalar için düşey eğilme momenti kapasitesi (M22), düşey yükler (G+Q) altında oluşan aksel yük etkisinde, yatay eğilme momenti kapasitesi (M11) aksel yükün sıfır olduğu durumda elde edilmiştir. Tonzlardaki yatay eğilme momenti kapasiteleri (M11 ve M22) ise düşey yükler (G+Q) altında oluşan aksel yük etkisinde elde edilmiştir.

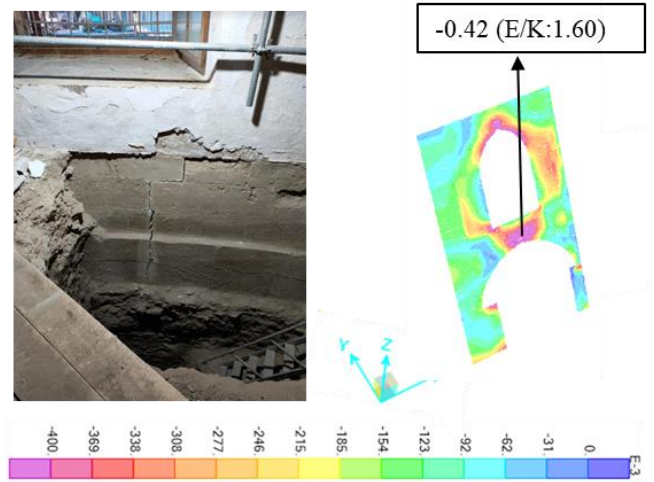
Düşey Yükler Altında Doğrusal Analiz ve Sonuçları

Yığma yapılarda düşey yükler, yapının ölü yükleri, hareketli yükler ve kar yükleri olarak tanımlanabilir. Selimiye Cami yapısının düşey yükler (G+Q) altında yapılan doğrusal analiz sonucunda sınır değerleri aşan sonuçlara rastlanmamıştır. Beden duvarlarındaki aksel yük seviyesi Etki/Kapasite (E/K) 0.24, sütunlarda 0.52 mertebelerindedir. Maksimum kayma gerilmesi değeri E/K 0.62, orta nef beden duvarlarında düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 2.00, maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise 1.75'tir. Payandalarda oluşan düşey basınç gerilmeleri 0.44 Mpa mertebelerindedir. Maksimum kayma gerilmesi E/K oranı 1.29 olup, düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 0.53 ve düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı 0.20 olarak bulunmuştur. Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri 0.97 MPa'dır. Ayrıca

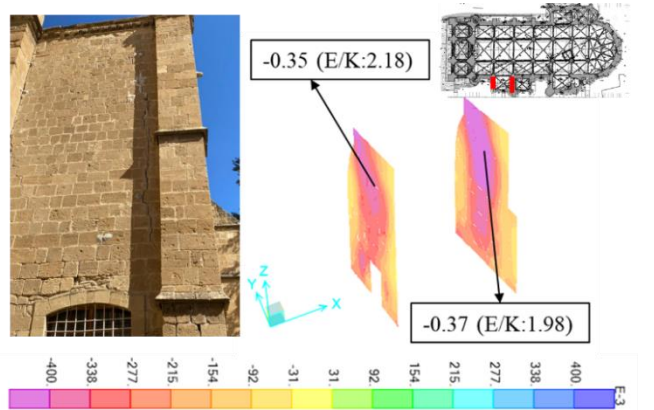
düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı 0.58 olarak bulunmuştur.

Deprem Etkileri Altında Doğrusal Analiz ve Sonuçları

Düşey yük etkisi altında yapının beden duvarlarında görülen maksimum düşey basınç gerilmesi değeri 0.85 MPa iken, X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.52 MPa, Y doğrultusunda deprem etkisi altında 1.38 MPa'dır. Yapının beden duvarlarında oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilmesi E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında maksimum 2.00, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.18'dir. Yapının Çan kulesi ve Şapel bölümlerine ait beden duvarlarında gözlemlenen ileri düzeydeki çatlak, ayrılma hasarları, sonlu elemanlar modelinde ilgili bölgelerde elde edilen E/K oranlarıyla örtüşmektedir (Şekil 18,19).



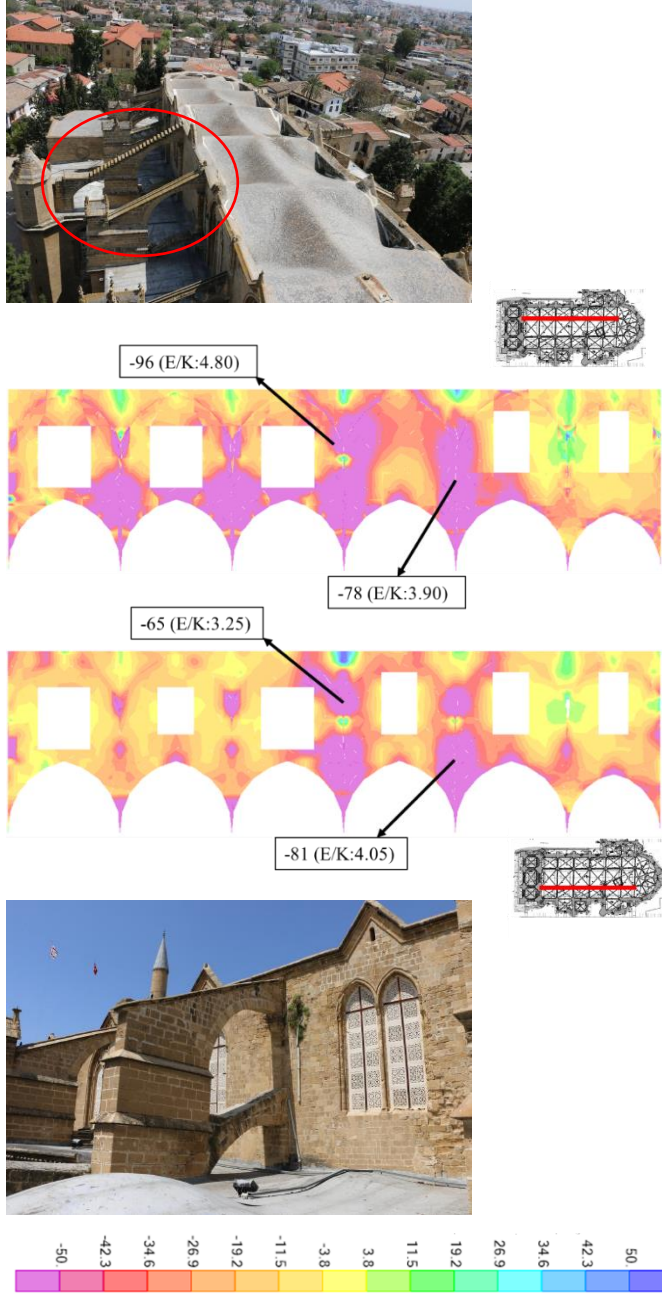
Şekil 18. Çan kulesi bölümündeki ayrılma ve modelden alınan X doğrultusundaki deprem etkisi altında elde edilen kayma gerilmesi sonuçları. (kPa)



Şekil 19. Şapel bölümündeki ayrılma ve modelden alınan Y doğrultusundaki deprem etkisi altında elde edilen kayma gerilmesi sonuçları. (kPa)

Yapının beden duvarlarında oluşan düzlem dışı eğilme momenti dağılımları düşey yükler ve her iki doğrultudaki deprem etkileri altında olacak şekilde sunulmuştur. Düzlem dışı doğrultuda yapının beden duvarlarında oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.10, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 4.80'dir. Maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise X doğrultusundaki deprem etkisi altında 0.85, Y

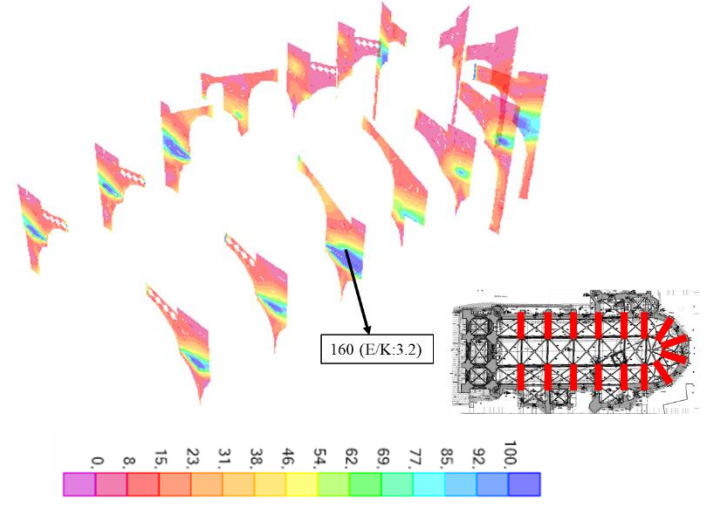
doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.18'dir. Y doğrultusundaki deprem etkisi altında oluşan maksimum düzlemdışı eğilme momenti dağılımı Şekil 20'de verilmiştir. Elde edilen en olumsuz sonuçların, orta nef beden duvarları ile uçan payandaların kesişim bölgelerinde meydana geldiği görülmüştür.



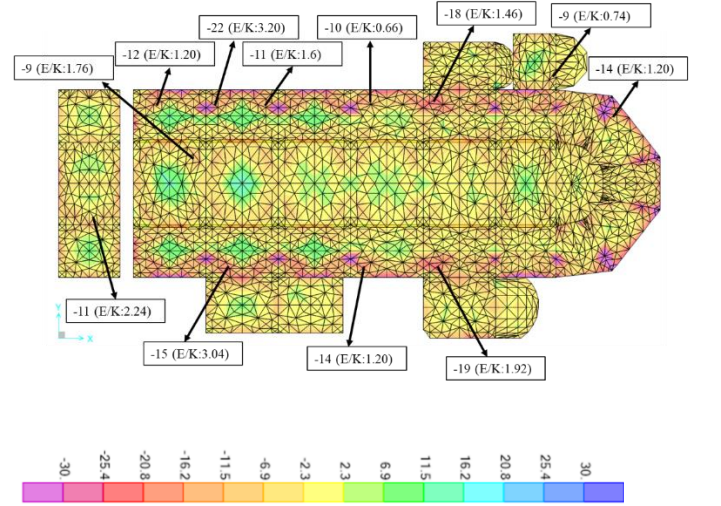
Yapıya ait uçan payandalarda elde edilen maksimum düşey basınç gerilmesi değeri Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.08 MPa'dır. Maksimum kayma gerilmesi E/K oranı 2.32 olup, düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum düşey eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkileri altında 3.20 olarak bulunmuştur (Şekil 21).

Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.55 MPa, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.65

MPa'dır. Ayrıca yapıda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.20, Y doğrultusundaki deprem etkisi 2.56 olarak bulunmuştur. Gerilmelerin yoğunlaştığı ve kapasitenin aşıldığı bölgeler mevcut hasarlar ile önemli ölçüde örtüşmektedir (Şekil 22).

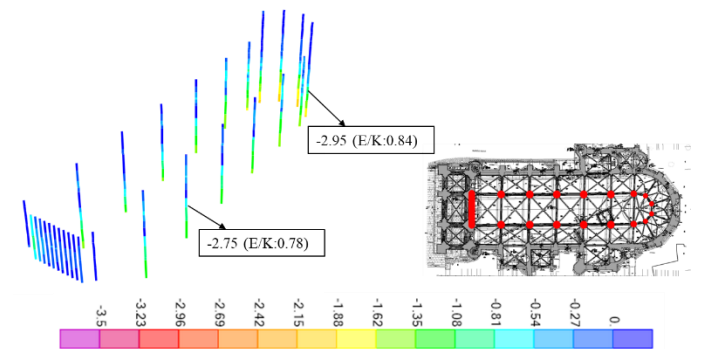


Şekil 21. Payanalarda Düzlem Dışı Moment Etkileri (kNm)- M22.



Şekil 22. X doğrultusundaki deprem etkileri altında Tonozlardaki İç Kuvvetler (kNm)- M11.

Yapıya ait ayaklarda elde edilen eksenel gerilmelerin her iki doğrultudaki deprem etkisi altında da kapasitenin altında kaldığı görülmüştür (Şekil 23).



Şekil 23. Ayaklarda Basınç Gerilmeleri (mPa)-S11.

Bu sonuçlar doğrultusunda yapının yalnızca düşey yükler altında elde edilen etki değerlerinin kapasite değerlerinden düşük olduğu görülmüştür. Düşey yükler ve deprem etkileri altında elde edilen gerilme ve iç kuvvet değerleri, elemanların mevcut dayanımlarından yüksektir. Elde edilen maksimum E/K oranları özellikle orta nef beden duvarlarında oluşmaktadır. Düzlem dışı doğrultuda, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında elde edilen maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 4.80, maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise 3.18'dir. Ayrıca yapı üst örtüsünde oluşan maksimum yatay eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.20, Y doğrultusundaki deprem etkisi 2.56 olarak bulunmuştur.

Müdahale Önerileri

Lefkoşa Selimiye Camii'nin yapılan doğrusal analiz sonuçlarına göre mevcut haliyle Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu'nda (2017) belirlenen hedef deprem performansını yeterli düzeyde sağlamadığının tespit edilmesi nedeniyle aşağıda belirtilen müdahaleler önerilmiştir. Önerilen müdahaleler yapısal performansı iyileştirmeyi hedeflemekte olup, tarihi ve kültürel önemi yüksek olan bu yapının beden duvarlarında yer alan sütun başlıkları, sütunlar, süslemeler ve dekoratif unsurlar nedeniyle sınırlı düzeyde tutulmuştur.

Yapının mevcut durumu için yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda yapılması gerektiği düşünülen müdahale önerileri aşağıda verilmiştir.

- Orta Nef Üst Örtüsü Üzerindeki Dolguların Azaltılması
- Yapıya Gergi ve Basınç Çubuğu Sistemi Eklenmesi
- Şapel Bölümü Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması
- Çan Kulesi Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması
- Tonzlar İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması
- Beden Duvarları İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması
- Mevcut Hasarların Onarımı için Enjeksiyon Uygulamaları Yapılması

Orta Nef Üst Örtüsü Üzerindeki Dolguların Azaltılması

Selimiye Camii yapısının deprem etkilerine karşı güçlendirilmesi için müdahale önerileri düşünüldüğünde akıllara gelen ilk unsur, orta nef üst örtüsü üzerindeki gereğinden fazla yükseklikteki dolgu tabakası olmaktadır. Bu dolgu tabakası tüm yapının üzerinde işlevsiz şekilde yük olmakta ve orta nef beden duvarlarındaki düzlem dışı moment değerlerini arttırmaktadır.

Yapının orta nef beden duvarlarında oluşan ileri düzeyde düzlemdışı yatay ve düşey eğilme momenti etki/ kapasite oranları nedeniyle, yapı üzerindeki ölü yükü azaltmak amacıyla orta nef üst örtüsünde bulunan dolgu kalınlığının 10 cm mertebelerine indirilmesine karar verilmiştir.

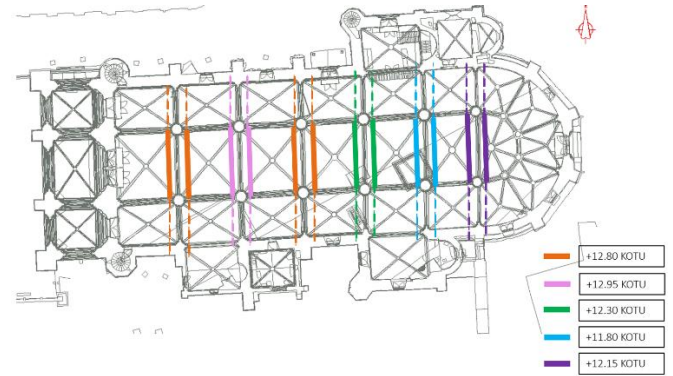
Yapıya Gergi ve Basınç Çubuğu Sistemi Eklenmesi

Orta nef beden duvarlarının düzlem dışı hareketini sınırlandırmak amacıyla yapının söz konusu beden duvarlarını bağlayacak bir gergi ve basınç çubuğu sistemi

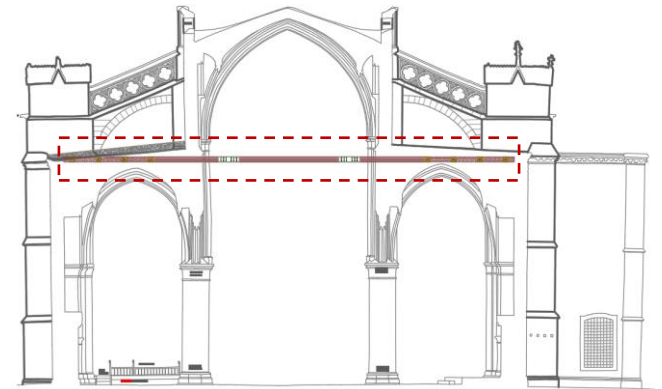
oluşturulmasına karar verilmiştir. Yapıda orta nef kısmındaki her iki taraftaki beden duvarlarının birlikte çalışmasına katkı sağlayacak bir gergi ve basınç çubuğu sistemi oluşturulmasının deprem etkileri altında elemanlarda meydana gelecek kesit zorlanmalarının sağlıklı şekilde yeniden dağıtılmasına katkı sağlayacağı ve deprem davranışını iyileştireceği düşünülmektedir.

Sistemin plandaki ve kesitteki yerleşimi Şekil 24 ve Şekil 25'te verilmiştir. Sistem, aralarındaki net açıklık 1 m mertebelerinde olan, harim bölgesindeki tüm ayakların sağ ve sol tarafında olmak üzere duvar doğrultusuna dik yerleştirilen toplam 12 adet 30x30 cmxcm boyutlarında ahşap gergilerden oluşmaktadır.

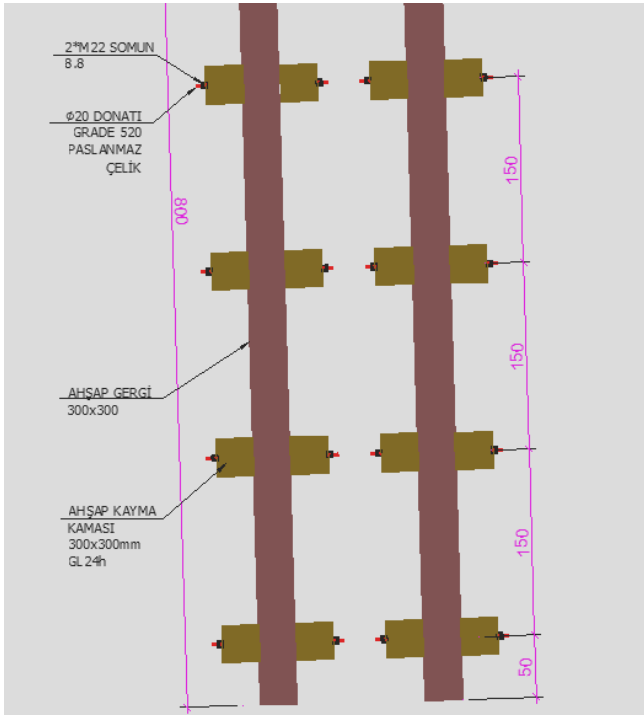
Gergiler, uygulanabilirlik açısından sorun yaşanmaması adına açıklık bölgesinde 2 adet bağlantı yapılarak 3 parça halinde yapılacaktır. Her bir gergi elemanı, açıklık bölgesinde kalan ek uzunluğu 7 m, duvarlardan geçip yan nef tonoz dolgularının içinde kalan eklerin uzunluğu 9.5 metre olmak üzere toplamda 26 m olacaktır. Ahşap gergilerin tonoz dolgusu içinde kalan kısmında merkezden merkeze açıklık 1.5 m olacak şekilde, gerginin iki yüzeyinde toplamda 8 adet 30x30 cmxcm kesitlerinde ahşap kayma kaması eklenmesi uygun bulunmuştur (Şekil 26).



Şekil 24. Gergi sisteminin planda yerleşimi ve kotları.

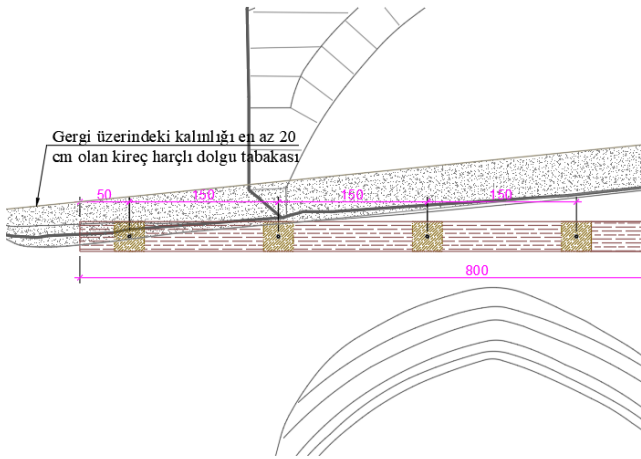


Şekil 25. Gergi sisteminin kesit görünüşü.



Şekil 26. Tonzol dolgusu içinde kalan gergi sistemi detayları.

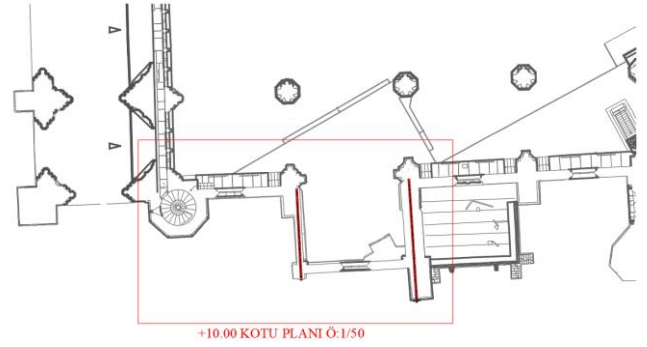
Gergi imalatı öncesinde yan nef tonozların mevcut dolgu tabakasının kaldırılması, gergi yerleşimi ve imalatı tamamlandıktan sonra gergi üzerinde kalacak minimum dolgu yüksekliği 20 cm olacak şekilde dolgu tabakası tekrar oluşturulması öngörülmüştür (Şekil 27).



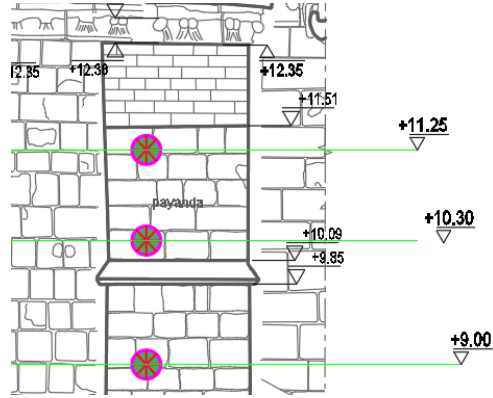
Şekil 27. Gergi sisteminin yan nef tonoz dolgusu içinde kalan kısmına ait detayı

Şapel Bölümü Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması

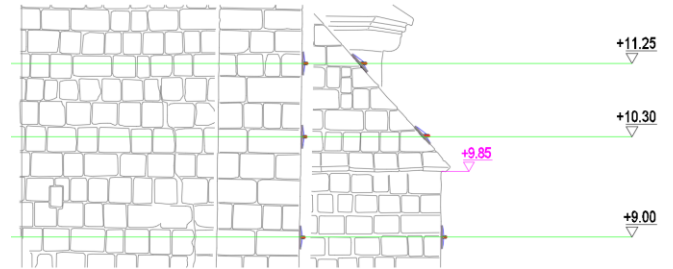
Şapel kısmında bulunan X ve Y doğrultusundaki beden duvarlarının birleşim bölgelerinde X doğrultusundaki duvarın yapıdan ayrılmaya çalıştığını gösteren düşey doğrultuda derin yapısal çatlaklar gözlemlenmiştir. Buna göre her iki doğrultudaki beden duvarlarının birlikte çalışmasına katkı sağlayacak bir çelik ankraj uygulaması yapılmıştır. Ankrajların çapı 20 mm ve AISI 316 sınıfı paslanmaz çelik özelliklerinde imal edilmesi gerekmektedir. Ankrajların plandaki yerleşimi Şekil 28'de, cephe görüşleri Şekil 29 ve Şekil 30'da gösterilmiştir.



Şekil 28. Ankrajların +10.00 kotu için planda gösterimi.



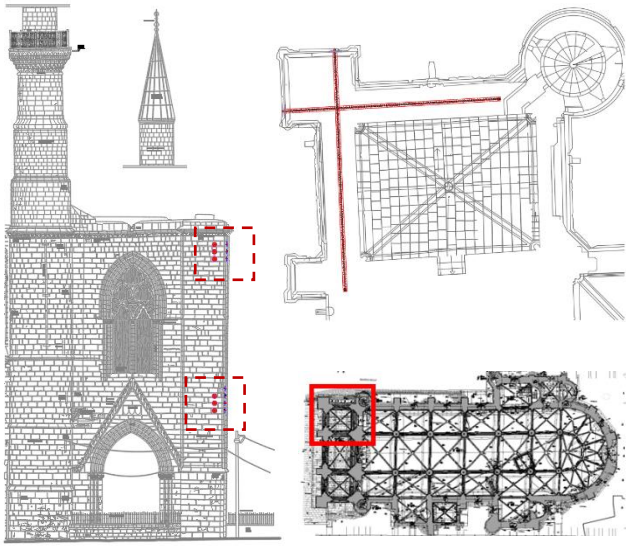
Şekil 29. Ankrajların güney cephe görünüşü.



Şekil 30. Ankrajların batı cephe görünüşü.

Çan Kulesi Yatay Ankraj Uygulaması Yapılması

Yapının kuzeybatı bölgesindeki çan kulesi olarak bilinen kısmında +10.00 m ve +20.00 m mertebelerindeki kotlarda düşey doğrultuda derin çatlaklar gözlemlenmiştir. Buna göre her iki mertebedeki kotlarda, beden duvarlarındaki ayrılmayı engelleyecek bir çelik ankraj uygulaması yapılması öngörülmüştür. Bu ankraj sistemi +9.00 m ve +19.50 m kotlarından başlayarak yukarı doğru merkezden merkeze 50 cm arayla 3'er adet olmak üzere toplamda 7 adet ankrajdan oluşmaktadır. Ankrajların çapı 20 mm ve AISI 316 sınıfı paslanmaz çelik olarak kullanılmıştır. Ankrajların plandaki ve kuzey cephesindeki yerleşimi Şekil 31'de gösterilmiştir.



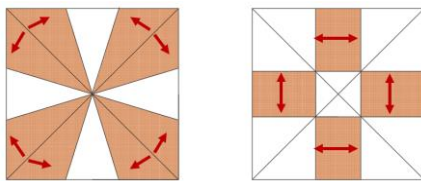
Şekil 31. Ankrājların cephe ve plan görünüşü.

Tonozlar İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması

Gerçekleştirilen performans analizleri doğrultusunda yapının üst örtüsünde meydana gelen moment değerlerinin yer yer eğilme kapasitesinden yüksek olması nedeniyle, olası bir deprem esnasındaki yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla tonozların üst yüzeylerine karbon hasır donatılı sıva (KHDS) uygulanması uygun bulunmuştur. 1 kat karbon hasır donatılı sıva uygulaması, 5-7 mm mertebelerinde yapısal tamir harcı ve 1 kat karbon hasır donatıdan oluşmaktadır. Eklenen her katta 1 kat tamir harcı ve karbon hasır donatı ilave edilmektedir.

Gereken KHDS kat sayısının belirlenmesi için öncelikle 1 m uzunluğunda ve mevcut kalınlıkta (35 cm) tonoz kesiti XTRACT yazılımıyla modellenmiş, kesitin tek yüzeyine, tek kat için 1 cm KHDS eklenmiştir. Çekme etkisi altındaki mekanik özellikleri kompozit malzeme olarak dikkate alınmıştır. Buna göre, ulaşılabilecek yatay eğilme momenti kapasiteleri elde edilmiştir.

Uygulama bölgesi ve yönleri şekil 32'de şematize edilmiştir.



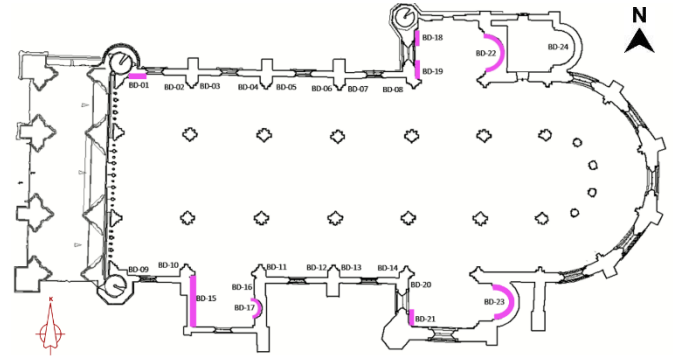
Şekil 32. KHDS uygulama bölgeleri ve yönleri

Karbon lifli polimer (kuru lif) mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir. Hidrolik kireç esaslı tamir harcı ile oluşturulmuş 1 cm kalınlığa sahip kompozit elemanın elastisite modülü hesaplarda 60 GPa olarak dikkate alınmıştır.

Çekme Dayanımı	≥	4900 MPa
Kopma Uzaması	≥	0.0017
Elastisite Modülü	≥	240 GPa
Ağırlık	:	200 gr/m ²
Kesit Alanı	:	55 mm ² /m

Beden Duvarları İçin Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) Uygulaması Yapılması

Selimiye camii alt kotundaki 60 cm ile 165 cm arası olmak üzere farklı kalınlıklara sahip beden duvarlarının maruz kaldığı düzlem içi kayma gerilmeleri, yer yer kayma kapasitelerini aşmaktadır. Bu bağlamda, kayma dayanımı değerleri, kapasitesini aşan duvarlarda düzlem içi kayma kapasitelerini arttırmak ve yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla KHDS uygulanmasının gerekli olduğu düşünülmektedir. Uygulama yapılacak duvarlar Lefkoşa Selimiye Camii +7.60 m kotu planında gösterilmiştir (Şekil 33).



Şekil 33. Beden Duvarlarının KHDS ile Güçlendirilmesi.

Mevcut Hasarların Onarımı için Enjeksiyon Uygulamaları Yapılması

Özellikle orta nef duvarlarının düzlem dışında 2 derece mertebelerinde dönme yapması (Şekil 8) sonucunda oluşmuş farklı düzeylerdeki çatlak ve deformasyonlara harç enjeksiyonu yapılarak boşlukların doldurulması ve duvar bütünlüğünün iyileştirilmesi uygun bulunmuştur. Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu'nda (2017) tanımlanan, enjeksiyon uygulamasının yapılması neticesinde iyileştirilmiş malzeme özellikleri dikkate alındığında, düşey yükler ve deprem etkileri altında kayma gerilmeleri için hesaplanan E/K oranlarında yaklaşık %15 mertebesinde bir azalma görülmüştür.

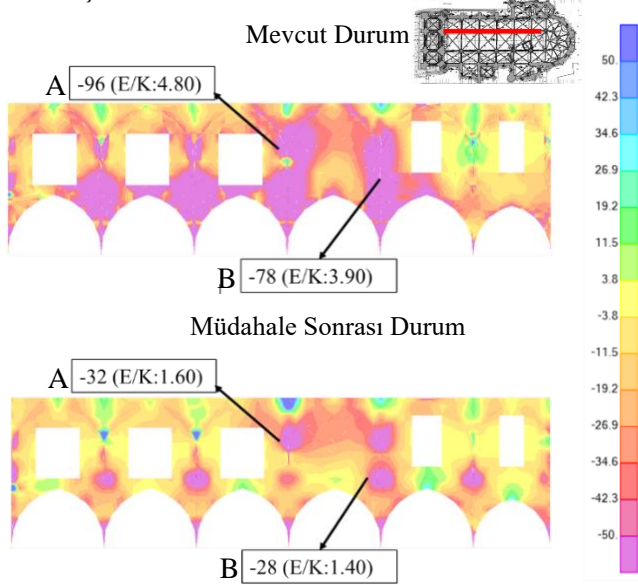
Beden duvarlarında ve hasarların yoğunlaştığı diğer bölgelerde, çürütme yapılarak duvar örgüsünün tekrar teşkil edilmesi gerekli bulunmuştur. Bu bölgelerde, duvar örgüsü için kullanılacak malzemenin özgün duvar malzemesi ile mekanik, fiziksel ve kimyasal açılarından uyumuna, yığma elemanın örgüsü esnasında geleneksel yapım tekniğinin korunmasına dikkat edilmesi önemlidir. Yeniden örülecek bölge için mekanik özellikleri görece yüksek bir örgü harcı (Puzolanik veya Hidrolik Kireç Esaslı, Lif Takviyeli, Çimento İçermeyen Tarihi Yapı Onarım Harcı) kullanılması gerekmektedir.

Söz konusu Puzolanik veya Hidrolik Kireç Esaslı, Lif Takviyeli, Çimento İçermeyen Tarihi Yapı Onarım Harcı Özellikleri:

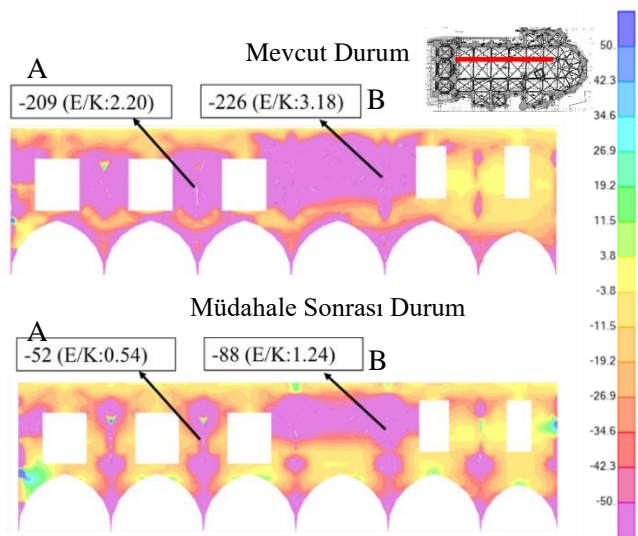
Basınç Dayanımı	≥	15-20 MPa
Elastisite Modülü	≥	16 MPa
Eğilmede Çekme Dayanımı	≥	2 MPa

Müdahale Önerilerinin Yapısal Davranışa Katkısının Araştırılması

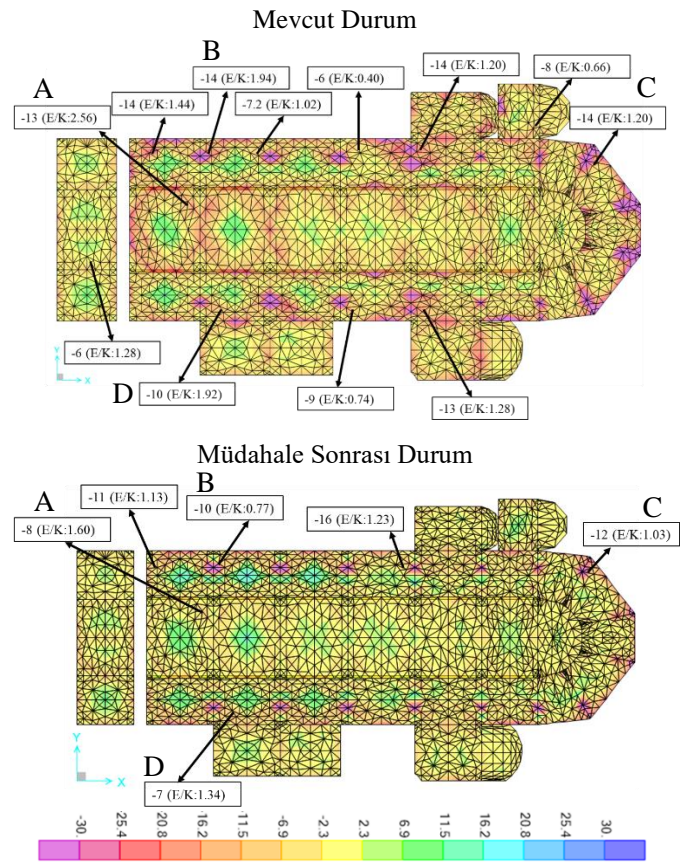
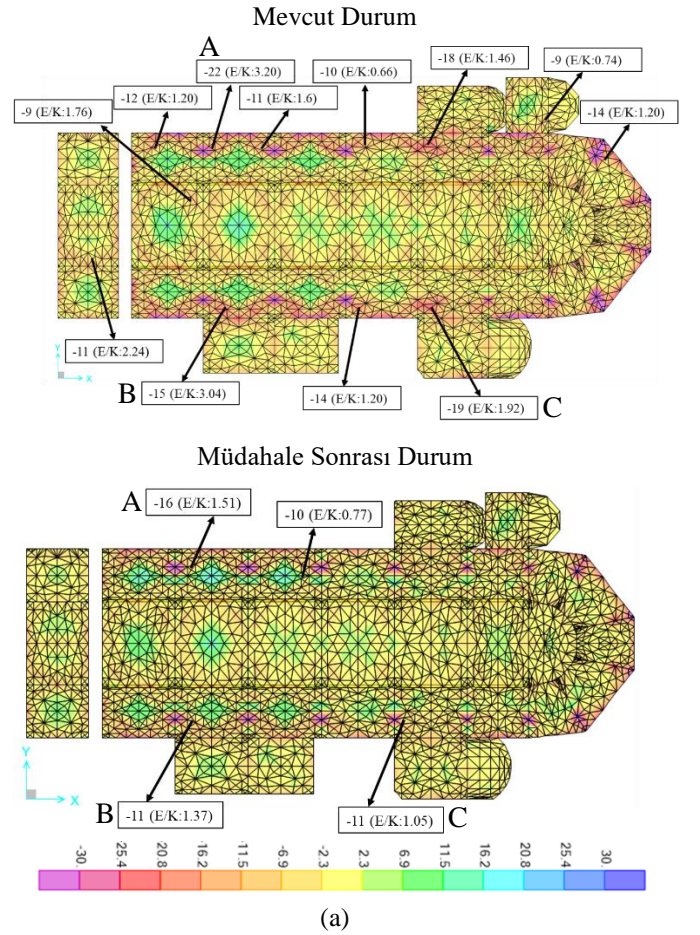
Mevcut durumun incelendiği modelde müdahale önerilerinde belirtilen “Orta nef tonozları üzerindeki dolgunun 10 cm mertebelerine indirilmesi” ve “Ahşap gergi ve basınç çubuğu sistemi” müdahale uygulamaları modele dahil edilip doğrusal analiz tekrar edilmiştir. Öncelikle orta nef tonozlar üzerindeki dolguların yapı davranışındaki etkisi hakkında bilgi edinebilmek adına yalnızca orta nef tonozları üzerindeki dolgu kalınlığı 10 cm mertebelerine indirilerek kontrol edilmiştir. Bu müdahale sonucunda yapının orta nef beden duvarlarındaki ileri düzeyde düzlemdışı yatay ve düşey eğilme momenti E/K oranları ile, tonozlardaki çekme gerilmelerinin de düştüğü görülmüştür. Müdahale öncesi ve sonrası Y doğrultusundaki deprem etkileri altında orta nef duvarlarda oluşan yatay eğilme momenti (M11) ve yatay eğilme momenti (M22) değerleri Şekil 34 ve Şekil 35’te, X ve Y doğrultusundaki deprem etkileri altında tonozlarda oluşan yatay eğilme momenti değerleri Şekil 36’da verilmiştir.



Şekil 34. Duvarlarda oluşan M11 momenti değerleri (kNm).



Şekil 35. Duvarlarda oluşan M22 momenti değerleri (kNm).



Şekil 36. Tonozlarda oluşan M11 momenti değerleri (kNm)
(a) X doğrultusundaki deprem, (b) Y doğrultusundaki deprem

Ahşap gergilerin yan nef bölgelerindeki tonoz dolgusu içinde kalan kısmında, herhangi bir sıyrılma, kayma problemi yaşamadan sağlıklı bir şekilde yapıdan gelen etkileri karşılayabilmesi amacıyla gergilerin dolgu içinde kalacak bölümlerine belirli aralıklarda ahşap kayma kaması eklenmesi uygun bulunmuştur. Kayma kamaları için numerik hesaplamalar aşağıda sunulmuştur.

30 cm kenar uzunluğuna sahip bir adet kayma kamasının ve bağlantı elemanının karşılayabileceği kesme kuvveti ACI 530-05/530R-05 (3.1.6.3) [14] bölümünde verilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Bağıntı (2)'de verilen formül tonozlar üzerindeki dolgunun ezilmesi, Bağıntı (3)'te verilen formül kayma kaması ile ahşap gergi birleşiminde kullanılan bağlantı çeliğinin kesilmesi durumları içindir.

Hesaplamalarda ahşap kayma kamasının görünen alanı, A_{pv} (3.1.6.3.1) bölümündeki Bağıntı (4) formülü ile hesaplanmıştır. Güvenli tarafta kalınması amacıyla elde edilen kesme kuvvetlerinden küçük olan değer dikkate alınmıştır.

$$B_{vn} = 4A_{pv} \sqrt{f'_m} \quad (2)$$

$$B_{vn} = 0.6A_b f_y \quad (3)$$

$$A_{pv} = \frac{\pi l_{be}^2}{2} \quad (4)$$

B_{vn} : Karşılanabilecek kesme kuvveti

A_{pv} : Ahşap elemanın alanı

f'_m : Dolgunun basınç dayanımı

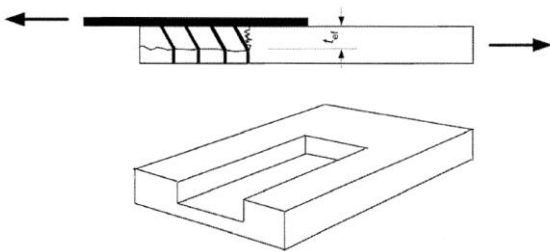
A_b : Bulon kesit alanı

f_y : Çeliğin akma dayanımı

l_{be} : Ahşap kenarı ile bulon arası mesafe

Buna göre her bir ahşap gerginin uç kısmından başlayacak şekilde 4 sıra, toplamda 8 adet ahşap kayma kamasının (Şekil 27) karşılayabileceği toplam kesme kuvvetinin, yapının numerik modelinden alınmış ahşap gergilerde meydana gelen en büyük eksenel kuvvet değerinden büyük olduğu görülmüştür.

Ahşap kayma kamaları ile çelik bağlantı elemanları arasındaki çekme ve kayma güvenliği kontrolü EN 1995-1-1:2004+A1:2008'e [15] göre yapılmıştır (Şekil 37).



Şekil 37. Çelik bağlantı elemanının ahşap elemandan sıyrılması [15].

$$A_{net,t} = L_{net,t} t_1 \quad (5)$$

$$A_{net,v} = L_{net,v} t_1 \quad (6)$$

$$F_{bs,Rk} = \max \begin{cases} 1.5A_{net,t} f_{t,0,k} \\ 0.7A_{net,v} f_{v,k} \end{cases} \quad (7)$$

$A_{net,t}$: Ahşap yönüne dik net kesit alanı

$L_{net,t}$: Ahşap yönüne dik net kesit uzunluğu

t_1 : Ahşap kalınlığı

$A_{net,v}$: Ahşap yönüne paralel net kesit alanı

$L_{net,v}$: Ahşap yönüne paralel net kesit uzunluğu

$F_{bs,Rk}$: Karakteristik kesme kapasitesi

Yapıya eklenen basınç çubuklarının orta açıklıkta kalan kısmı için burkulma kontrolü yapılmıştır. Bu bağlamda, elemanların burkulma oluşmadan karşılayabileceği kritik P kuvveti için Euler yaklaşımından faydalanılmıştır. Euler formülü Bağıntı (8)'de verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan L boyu, elemanın tutulu olmayan, burkulmaya çalışacak uzunluğunu temsil etmektedir.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (8)$$

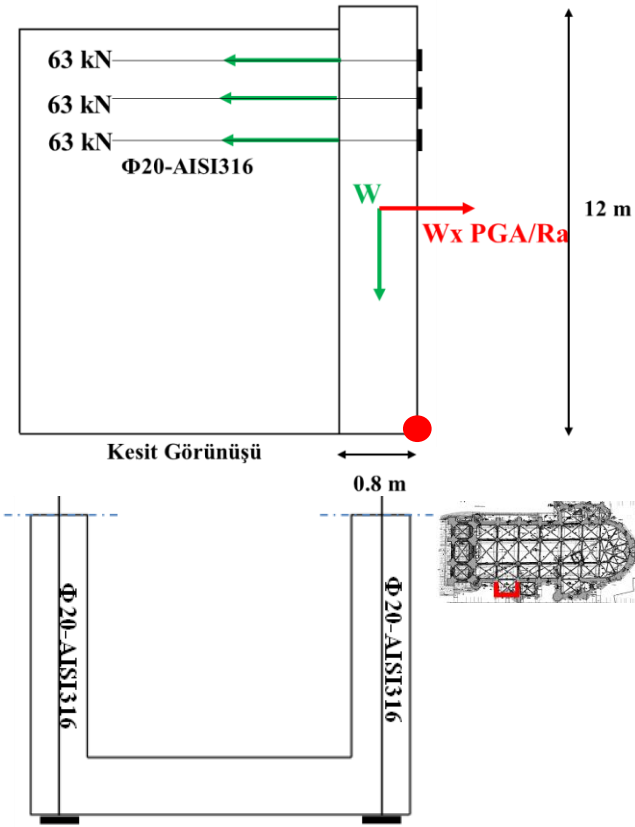
E : Elastisite modülü

I : Atalet momenti

L : Net uzunluk

Buna göre elemanın P_{cr} değeri 585 kN olarak hesaplanmıştır. Basınç çubuklarına tesir eden maksimum P kuvveti ise 355 kN olarak elde edilmiştir. Numerik modelden elde edilen P kuvveti, P_{cr} değerinden küçük olduğundan basınç çubukları burkulmaya karşı dayanıklıdır denilebilir.

Yapının şapel bölümünde, yapıya sonradan eklenmiş olan x doğrultusundaki duvarın dışa doğru dönmesini engellemek ve her iki doğrultudaki beden duvarlarının birlikte çalışmasına katkı sağlayacak çelik ankraj tasarımı deneme-yanılma yöntemi ile kararlaştırılmıştır. Buna göre, 20 mm çapında ve AISI 316 sınıfı paslanmaz çelik olmak üzere 3'er adet, toplamda 6 adet ankraj kullanılması öngörülmüştür. Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (2017) Bölüm 6.5.5'te belirtilen "Mekanizma Durumunu Esas Alan Analiz Yöntemi" uyarınca ilk olarak ankraj sistemi müdahalesiyle devrilmeye karşı konulabilecek toplam kuvvet hesaplanmış, olası deprem anında devrilmeye neden olacak kuvvetler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplama şeması Şekil 38'de verilmiştir.



Şekil 38. Şapel bölgesine yapılacak ankraj sistemi.

. AISI 316 çeliği karakteristik akma dayanımı 200 MPa olarak alınarak ankrajların olası bir deprem sonucunda, x doğrultusundaki duvarın dışa doğru dönmesi sırasında oluşacak moment etkisine karşı konulabilecek maksimum moment değeri hesaplanmıştır. Hacmi ve birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak 65 m^3 ve 22 kN/m^3 olarak hesaplanan duvarın toplam ağırlığı 1430 kN olarak elde edilmiştir. Hesaplarda kullanılan PGA değeri, sahaya özel sismik tehlike analizi ile elde edilen 475 yıl dönüş periyotlu pik yer ivmesi 0.34 g 'dir. Buna göre ankraj sisteminin duvar üzerinde oluşturduğu moment kapasitesinin yeterli düzeyde olduğu görülmüştür.

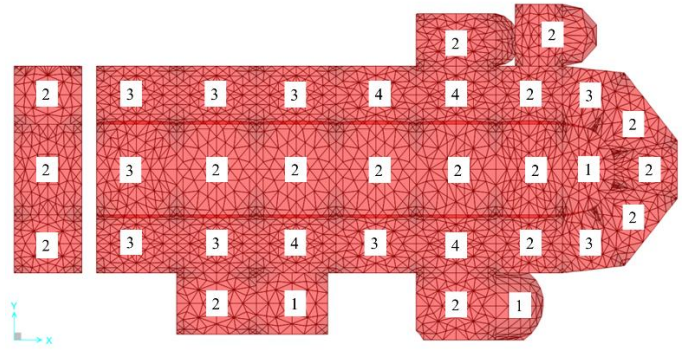
Bu yöntem yapının çan kulesi bölümünde uygulanacak ankraj sistemi için de kullanılmıştır. Hacmi ve birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak 370 m^3 ve 22 kN/m^3 olarak hesaplanan duvarların ağırlığı 8161.6 kN olarak elde edilmiştir. Hesaplarda kullanılan PGA değeri yine 0.34 g 'dir. Buna göre ankraj sisteminin duvar üzerinde oluşturduğu moment kapasitesinin yeterli düzeyde olduğu görülmüştür.

Yapının üst örtüsünde eğilme kapasitesinin artırılması amacıyla gerekli görülen karbon hasır donatılı sıva uygulanması için oluşturulması gereken karbon hasır donatılı sıva kat sayıları, tonozlarda düşey yükler ve deprem etkileri altında oluşan moment değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. 1 kat karbon hasır donatılı sıva uygulaması, 5-7 mm mertebelerinde yapısal tamir harcı ve 1 kat karbon hasır donatıdan oluşmaktadır. Eklenen her katta 1 kat daha tamir harcı ve karbon hasır donatı ilave edilmektedir. Bu aşamada üst örtü elemanlarının mevcut kalınlıkları dikkate alınarak karbon hasır donatılı sıva uygulamaları ile elde edilebilecek moment kapasiteleri hesaplanmıştır. Tonoz kesitlerinde 35

cm kalınlığındaki kesme taşın mevcut eğilme momenti kapasitesi 6 kNm/m bulunmuş olup farklı kat sayıları ile karbon hasır donatılı sıva uygulaması sonucu elde edilen eğilme momenti kapasiteleri Tablo 7'de gösterilmiştir. Buna göre gereken kat sayıları Şekil 39'da verilmiştir.

Tablo 7. Farklı kat sayıları ile ulaşılabilecek eğilme momenti kapasiteleri.

KHDS Katsayısı ve Ulaşılan Kapasite (kNm/m)			
1 Kat	2 Kat	3 Kat	4 Kat
7.3	13.2	17.9	20.3

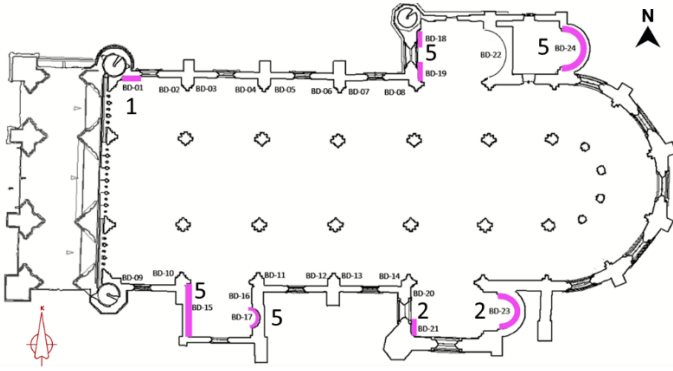


Şekil 39. Tonozlarda gereken karbon hasır donatılı sıva kat sayısı.

Yapının $+13.00 \text{ m}$ kotuna kadar olan, yan nef beden duvarlarında kayma dayanımı aşılın duvarlarda düzlem içi kayma kapasitelerini arttırmak ve yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla karbon hasır donatılı sıva uygulanmasının gerekli bulunmuştur.

Duvarların mevcut kayma kapasiteleri $\tau = (\tau_0 + 0.4N) \times t_d$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Burada τ_0 başlangıç kayma dayanımı (kPa), kullanılan eksenel yük değeri N (kN/m), ölü yük ile kütle katılım katsayısı (n) ile azaltılmış hareketli yük etkisinde, numerik modelden elde edilen maksimum eksenel yük değeridir. t_d duvar kalınlığı (m) olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Karbon hasır donatılı sıvanın kayma dayanımına katkısı, kompozit elemanın kesit alanı (mm^2/m), elastisite modülü (Gpa), kopma uzaması, azaltma katsayısı (0.75 alınmıştır.) ve KHDS kat sayısı çarpılarak hesaplanmıştır. Buna göre KHDS gerektiren duvarlar gereken kat sayıları ile birlikte Şekil 40'ta verilmiştir. Her KHDS katı için yapısal tamir harcı 5-7 mm mertebelerinde düzgün bir yüzey oluşturacak şekilde uygulanacak, karbon hasır çift doğrultuda gerilerek yapısal tamir harcı içerisine düzgünce yerleştirilecektir.

Kopma Uzaması	\geq	0.0017
Elastisite Modülü	\geq	240 GPa
Ağırlık	:	200 gr/m ²
Kesit Alanı	:	55 mm ² /m



Şekil 40. Beden duvarlarında gereken karbon hasır donatılı sıva kat sayısı.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne ait ülkenin en önemli tarihi yapılarından biri olan Lefkoşa Selimiye Camii taşıyıcı sistemi yapısal davranışının doğrusal analiz yöntemi ile değerlendirilmesi ele alınmıştır. Buna göre yapının düşey yükler altında elde edilen etki değerlerinin kapasite değerlerini aşmadığı görülmüştür. Düşey yükler ve deprem etkileri altında yapının beden duvarlarında oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilmesi E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında maksimum 2.00, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.18'dir. Düzlem dışı doğrultuda yapının beden duvarlarında oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.10, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 4.80'dir. Maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise X doğrultusundaki deprem etkisi altında 0.85, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.18'dir. Yapıya ait uçan payandalarda elde edilen maksimum düşey basınç gerilmesi değeri Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.08 MPa'dır. Maksimum kayma gerilmesi E/K oranı 2.32 olup, düzlem dışı doğrultuda oluşan maksimum düşey eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkileri altında 3.20 olarak bulunmuştur. Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.55 MPa, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.65 MPa'dır. Ayrıca yapıda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 3.20, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 2.56 olarak bulunmuştur.

Kültürel mirasımız olan tarihi yapıların gelecek nesillere aktarılabilmesi için gerekli yapısal değerlendirme çalışmalarının yapılması ve gerekli olması durumunda, koruma ilkelerine uygun şekilde deprem performansının iyileştirilmesi oldukça önemlidir. Elde edilen sonuçların, benzer deprem etkileri altında, benzer mimariye sahip tüm tarihi yapılar için kılavuz niteliğinde olduğu söylenebilir.

Yürütülmüş olan analiz çalışmalarının sonucunda orta nef üst örtüsü üzerindeki dolguların azaltılmasına ve bir gergi ve basınç çubuğu sistemi oluşturulmasına karar verilmiştir. Mevcut durumda oluşan gerilme ve iç kuvvetler, müdahale sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırılmış, tüm değerlerde azalma görülmüştür.

Söz konusu müdahaleler sonrasında, yapının beden duvarlarında oluşan maksimum düzlem içi kayma gerilmesi E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında

maksimum 1.32, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.44 olarak elde edilmiştir. Düzlem dışı doğrultuda (Y doğrultusundaki deprem etkisi altında) yapının beden duvarlarında oluşan maksimum yatay eğilme momenti (M11) E/K oranı 1.60, maksimum düşey eğilme momenti (M22) E/K oranı ise 1.24 olarak ölçülmüştür. Yapının üst örtüsünde elde edilen maksimum çekme gerilmesi değeri X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.25 MPa, Y doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.65 MPa'dır. Ayrıca yapıda oluşan maksimum eğilme momenti E/K oranı X doğrultusundaki deprem etkisi altında 1.51, Y doğrultusundaki deprem etkisi 1.15 olarak elde edilmiştir.

Müdahalelere rağmen, deprem etkileri altında tonozlarda oluşan eğilme momenti E/K oranlarının 1'den fazla elde edildiği bölgelerde eğilme kapasitesinin artırılabilmesi için Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) uygulaması uygun bulunmuştur. Aynı zamanda, +13.00 m kotuna kadar olan yan nef beden duvarlarında oluşan düzlem içi kayma gerilmesi E/K değerlerinin azaltılması için Karbon Hasır Donatılı Sıva (Tekstil Donatılı Harç) uygulaması öngörülmüştür. Mevcut durumdaki maksimum E/K oranı 2.29 iken, müdahale sonrası durumda 1.45 olarak elde edilmiştir. Yapının şapel ve çan kulesi bölümlerinde duvarlardaki çatlama ve ayrılmaların sınırlandırılması, duvarların yapı dışına doğru düzlem dışı dönmelerinin ilerlemesinin engellenmesi ve yapısal davranışın iyileştirilmesi için paslanmaz çelik ankraj uygulamaları öngörülmüştür. Yapıda gerekli görülen ve incelenen tüm müdahaleler mimari açıdan değerlendirilmiş, herhangi bir engel yaratmayacak şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca orta nef duvarlarının üstten dışarı, alttan içeri doğru 2 derece mertebelerinde dönme yapması sonucunda orta nef tonozlarında oluşmuş farklı düzeylerdeki çatlak ve deformasyonlar ve yapı genelinde oluşmuş tüm hasarlı bölgelerde mekanik özellikleri görece yüksek bir örgü harcı (Puzolanik veya Hidrolik Kireç Esaslı, Lif Takviyeli, Çimento İçermeyen Tarihi Yapı Onarım Harcı) ile enjeksiyon yapılarak boşlukların doldurulması ve duvar bütünlüğünün iyileştirilmesi önerilmiştir. Yapı minareleri tez kapsamı içinde tutulmamıştır.

Verilen müdahale önerileri sonucunda, koruma ilkelerine uyumlu, minimum düzeyde ve büyük ölçüde geri dönüştürülebilir müdahaleler ile yapının deprem performansı kayda değer düzeyde iyileştirilmiştir. Fakat tarihi yapılarda yapısal değerlendirmenin, incelenen yapıya ait birçok farklı durum içerebileceği ve her farklı yaklaşım ya da yapıya ait her unsurun sonucu değiştirebileceği unutulmamalıdır. Modelleme, analiz ve öneriler sadece tez çalışması kapsamında yapılmış olup, yapı üzerinde gerçekleştirilmekte olan restorasyon çalışmalarında farklı modelleme, analizler ve müdahaleler yapılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın tamamlanması için değerli bilgi ve deneyimlerini paylaşan İnş. Yük. Müh. Ali Naki Şanver'e çok teşekkür ederiz. Ayrıca çalışmanın ilerlemesi ve yayınlanmasına imkan sağlayan T.C Kültür ve Turizm Bakanlığı Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne teşekkürü borç biliriz.

Kaynaklar

- [1] Arslangazi H. (2007). Lefkoşa Kent Dokusunda Mimari Üsluplar, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- [2] Enlart, C., Hunt, D. (1987). Gothic Art and The Renaissance in Cyprus, s.83-87.
- [3] Jeffery, G. (1931). Cyprus Monuments, Historical and Architectural Buildings, New Illustrated Series, No.3, Nicosia, s.5.
- [4] Önge, Y. (1989). Kıbrıs Eserlerinde Yaşatılan Türk Sanat Ve Mimarlık Gelenekleri, s.103.
- [5] Musso, C.M. (1972). St. Sophia (Selimiye Mosque) Project of Restoration, Unesco Mission in Cyprus, 1971-1972.
- [6] Smith, A., L. (1887). Through Cyprus... Illustrated, with map. British Library.
- [7] Lourenço P.B. (1998). "Experimental and Numerical Issues in The Modelling of The Mechanical Behaviour of Masonry", Sturctural Analysis of Historical Constructions II, Barcelona.
- [8] Mistler, M., Butenweg, C., Meskouris, K. (2006) Modelling methods of historic masonry buildings under seismic excitation. J Seismol 10: 497-510, 664.
- [9] Vakıflar Genel Müdürlüğü. (2017). "Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu".
- [10] Kale, Ö., Akkar, S. Anooshivaran, A., Hamzehloo, H. (2015). A Ground Motion Predictive Model for Iran and Turkey for Horizontal PGA, PGV and %5 Damped Response Spectrum: Investigation of Possible Regional Effects. Bulletin of the Seismological Society of America 105(2), 963-980.
- [11] Boore, D.M., Atkinson, G. (2008). "Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s." Earthquake Spectra 24(1), 99-138.
- [12] Chiou, BS-J., Youngs, RR. (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. Earthquake Spectra 24(1), 173-215.
- [13] İyisan, R., Akbaş, M. (2022). Lefkoşa Selimiye Camii, Geoteknik ön değerlendirme.
- [14] ACI 530-05. (2005). Building Code Requirements for Masonry Structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.
- [15] EN 1995-1-1. (2008) Eurocode 5, Design of timber structures.
- [16] Geotest (2021). KKTC/ Lefkoşa Selimiye Camii Restorasyon Çalışması.
- [17] TBDY (2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [18] Turkan, Z., Özburak, Ç. (2018). Lefkoşa Tarihi Kent Dokusunda Selimiye Meydanı.
- [19] Limbouri, E. (2011). The restorations of ancient monuments of Cyprus from the establishment of the Department of Antiquities of Cyprus in 1935 until 2005.
- [20] Öztürk, C., Gürdallı, H. (2021). Lefkoşa ve Mağusa'da Gotik Yapıların Mimari Elemanlara Göre Analizi. YDÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi, 3(1), 1-20.
- [21] SAP2000 (Version 22.2.0) [Computer Software]. Integrated software for structural analysis and design program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.



Van-Süphan Dağı bölgesinde bulunan bazalt kayaçlarının demiryolunda balast malzemesi olarak kullanımının değerlendirilmesi

Evaluation of the use of basalt rocks in Van-Süphan mountain region as ballast material in railway

Fırat KIPÇAK

Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Bölümü, firatkipcak@yyu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3849-7545>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 28 Eylül 2023
Revizyon 16 Ocak 2024
Kabul 7 Haziran 2024
Online 30 Haziran 2024

Anahtar Kelimeler:

Arazi Kullanımı,
Bazalt,
Balast,
Demiryolu,
Süphan Dağı

ÖZ

Bazalt, doğada çok yaygın bulunan volkanik bir kayaç türüdür. Volkanik olay sonucu sıcaklık ve basınç altında eriyen kayaçlar soğuyarak bazalt kayaçlarını oluşturmaktadır. Yüksek dayanımlı ve aşınmaya karşı dirençli olması nedeniyle demiryolu, alt ve üst yapılar, tarihi yapılar gibi birçok alanda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Anadolu bölgesinde bulunan Van-Süphan Dağı arasında yer alan bazalt kayaçlarının araştırılması amaçlanmıştır. Bölge ile ilgili literatürde yeterli veri bulunmaması nedeniyle bu çalışmanın bilgi açıklığını gidereceği görülmüştür. Bu bağlamda bazaltın hızlı ve yüksek hızlı tren hatlarında balast malzemesi olarak kullanımı ve arazi durumu değerlendirilmiştir. Çalışmanın kapsadığı bölgede bazalt gelişigüzel dağılmış ve Süphan Dağının bulunduğu coğrafyada çok geniş alanları kaplamıştır. Bölgede incelemeler yapılmış ve kaya örnekleri alınmıştır. Bu amaçla bazalt kayaçlarının tek eksenli basınç, Los Angeles parçalanma, donma-çözülme, su emme oranı ve özgül kütle deneyleri yapılmıştır. Deneysel ve gözlemsel çalışmalar bölgede bulunan bazaltın demiryolu yapımında balast malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Bölgenin Süphan Dağı dışında dağlık arazi olmaması ve uygun rezerv barındırması nedeniyle değerlendirilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca bazalt kayaçlarının araziler üzerinden kaldırılmasıyla arazilerin daha verimli kullanılmasına imkân sağlayacağı konusu değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 September 2023
Received in revised form 16 January 2024
Accepted 7 June 2024
Available online 30 June 2024

Keywords:

Ballast,
Basalt,
Land Use,
Railway,
Süphan Mountain

ABSTRACT

Basalt is a widely found type of volcanic rock in nature. As a result of volcanic event, rocks melting under temperature and pressure cool down and form basalt rocks. Due to its high strength and resistance to abrasion that is used as building material in many areas such as railway, infrastructure and structures, historical buildings. This study aims to investigate the basalt rocks between Van-Süphan Mountain in the Eastern Anatolia region of Turkey. Since there is not enough data in the literature about the region, it is seen that this study will fill the information gap. In this context, the use of basalt as ballast material in speed and high-speed railway lines and the land situation were evaluated. In the region covered by the study, basalt is randomly distributed and covers very large areas in the geography of Mount Süphan. Investigations were made in the region and rock samples were taken. For this purpose, uniaxial compression, Los Angeles abrasion, freeze-thaw, water absorption rate and specific mass tests of basalt material were carried out. Experimental and observational studies have shown that basalt in the region can be used as ballast material in railway construction. It was concluded that the region can be utilized since there is no mountainous terrain except Süphan Mountain and it contains suitable reserves. In addition, it was evaluated that the removal of basalt material from the lands would allow more efficient use of the lands.

Doi: 10.24012/dumf.1367888

Giriş

Balast malzemesi demiryolu ile zemin arasında bulunan temel tabakasının yapımı için kullanılmaktadır. Balast 22.4-63 mm büyüklüğünde kırmataş malzemesinden oluşan ve köşeli yapıda bulunan malzemedir [1]-[3]. Balast malzemesi granit, bazalt, gabro, diyabaz, siyenit, granodiyorit, diyorit, porfir gibi malzemelerin kırılması ile elde edilmektedir [1], [3]-[6]. Demiryolu yapımında kullanılacak malzeme çoğunlukla yakın agrega ocaklarından elde edilmektedir. Balast malzemesi irili yapıya sahip oluşu için çevresel etkilere karşı daha dirençlidir. Bu sayede demiryolu servis ömrü uzamaktadır. Ayrıca irili yapıya sahip olduğundan su drenajı doğal olarak sağlanmaktadır [5]. Bu durumda donma-çözülme ile tabakanın ayrışma durumu daha düşüktür. Türkiye Alp-Himalaya deprem kuşağında yer aldığından çok sayıda deprem olmaktadır. 2007 deprem yönetmeliğine göre değerlendirmede Türkiye yüz ölçümünün %42'si birinci derece deprem kuşağında yer almaktadır [7]. Son zamanlarda yaşanan 2011 Van depremi ($M_w=7.2$), 2020 Elazığ depremi ($M_w=6.8$) ve 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w=7.7$) ve Elbistan ($M_w=7.6$) depremleri sonrası deprem önemi gittikçe artmış ve deprem tehlike haritası değişmiştir. Bu nedenle yapılan yolların deprem direncinin yüksek olması gerekmektedir. Demiryolu servis ömrü boyunca hareketli ve titreşim yükleri ile çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu bağlamda demiryolunda kullanılacak balast agregasının (TCDD) Balast Teknik Şartnamesi (2020), TS 7043 EN 13450 ile TS 699 standartlarına uygun olması gerekir [2], [3], [8]-[12]. Standartlara göre balastın yüksek dayanımlı, sürtünmeye, aşınmaya ve atmosferik koşullara karşı dirençli, uygun agrega dağılımlı, drenaj kabiliyeti yüksek ve homojen dağılımlı olması gerekir [5]. Ayrıca malzemenin yuvarlak ve pürüzsüz dere çakılı tipinde olmaması, ince malzeme ve zararlı bileşen içermemesi gerekir. Balast malzemesi sert, dayanıklı, köşeli ve uygun tane dağılımlı olmalıdır [13], [14]. Volkanik kayalar yüksek sıcaklık ve basınç altında başkalaşım geçirerek dayanım kazandıklarından demiryolu yapımında balast malzemesi olarak kullanımı oldukça tercih edilmektedir [11], [12], [15]. Demiryolu üzerine etkiyen raylı sistem yükleri, temele temelden zemine iletilir. Temel malzemesinin karakteristik özellikleri, standartlara uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle balast malzemesi yeterli kalınlıkta uygun bir şekilde yerleştirilmeli ve sıkıştırılmalıdır [13]. Balast içinde aşırı ince agreganın bulunması ve balastın aşırı sıkıştırılması nedeniyle su drenajı engellenebilir. Bu nedenle uygun olan optimum granülometrinin kullanılması önem taşımaktadır [13], [16]. Balast zaman geçtikçe parçalanmakta, aşınmakta veya çevresel etkilerle ince taneli olmaktadır. Böylelikle granülometri değişmekte ve yapısal bütünlük bozulmaktadır. Bu durumda demiryolu üst yapısı zarar görmekte ve demiryolu hattının bozulmasına neden olmaktadır [17]-[19]. Her geçen gün yol yapım maliyetleri artmakta ve malzeme temini zorlaşmaktadır. Birçok çalışmada bu kapsamda karayolu ve demiryolunda kullanılan malzeme ocaklarının durumları ve ekonomik etkinlikleri araştırılmıştır [3], [11], [16].

Çalışma kapsamında Van-Süphan Dağı arasında bulunan bölgede bazalt kayalarının Van-Erciş güzergahından Vana yapılacak olan hızlı tren hattı için balast olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada Van Gölünün batı ve kuzeybatı bölgesinde volkanik kayaların yoğunlukta

bulunması nedeniyle bölgede yapılacak demiryolları için temel malzemelerinin kolay temin edilebileceği değerlendirilmiştir. Bu bağlamda teknik standartlar dikkate alınarak bazalt kayaları üzerinde bir dizi deney yapılmış ve uygun standartlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yörede bulunan bazalt rezervinin toplanması ve demiryolunda kullanılması ile verimli tarım arazilerinin temizlenmesi konu edilmiştir. Aynı zamanda demiryolu için uygun malzeme temin edilerek demiryolunun ülke ekonomisine katkısı değerlendirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Süphan Volkanik Dağı Bazaltı

Süphan Dağı, Holosen döneminden kalan volkanik bir dağdır. Van Gölünün kuzeybatı bölgesinde bulunmaktadır ve yüksekliği 4058 m'dir [20]. Pearce (1990) kaynağın göre 4434 m yüksekliğindedir [21]. Dağ kütlesi merkezden çıkan lav akıntılarında oluşmuştur. Geniş alana yayılımı ile Van Gölünün kuzey batı şeklini oluşturmuş ve verimli tarım arazilerini kaplamıştır. Son patlaması kaynaklarda kesin olarak belirlenmemesi ile birlikte MÖ 5800 yılında gerçekleşmiştir. Volkanizma çok akıcı bir yapıya sahip olmamış üst üste birikerek yükselmiştir [21]. Dağın tepesindeki düzlüklerde buzul gölleriyle birlikte çanak (kaldera) bulunmaktadır. Süphan Dağının kısa kenarı yaklaşık 20 km, uzun kenarı ise 50 km'dir (Şekil 1). Volkanik faaliyetler sonucu kraterden dışarı çıkan konsolide olmuş volkan külü veya tozundan tüf, cüruf ve pomzanın zamanla oluştuğu farklı çalışmalarda ifade edilmiştir [22]. Lav akıntıları zamanla soğuyarak bazalt, granit, tüf ve pomza gibi kayaları oluşturmuştur. Bu kayaların mekanik ve fiziksel özellikleri karstik kayalara oranla yüksek olduğundan zamanla erime ve çözülme etkileri daha düşüktür. Bu nedenle bölgede çok miktarda bazalt kayaları ilk halini korumaktadır. Ayrıca bölgede yapılan gözlemler ile farklı noktalarda pomza rezervleri tespit edilmiştir. Bu pomza rezervleri işlenerek bölgeye yakın il ve ilçelerde üst yapıda kullanılmak üzere hafif dolgu malzemesi olan bims blok yapımında kullanılmaktadır.



Şekil 1. Süphan Volkanik Dağı (Google Earth)

Bazalt, volkanik olayların bulunduğu bölgelerde yaygın bulunan bir kayadır. Gabronun yüzey kayacı olup magmatik kayac grubuna giren bazik kayadır. Lav akıntılarının yer yüzeyine çıkıp hızla soğuması ile oluşur [21]. Bazalt camsı, kristal yapıda ve koyu renklidir [23]. Kimyasal bileşiminde

plajiyoklaz (labrador, andezin, oligoklaz veya albit), ojit, olivin, kuvars, manyetit ve ilmenit bulunmaktadır [11], [23], [24]. Mekanik ve fiziksel özellikleri oldukça yüksektir. Türkiye'deki birçok bazalt yatağı Miyosen dönemi sonrası oluşmuştur [25]. Bazalt kayaları betonarme yapılarda, tarihi yapılarda, karayolu ve demiryolu yapılarında agrega malzemesi olarak oldukça kullanılmaktadır [24]. Ayrıca yol yapımında bazalt karışımı agregalardan elde edilen bitümlü karışımların kalker karışımı olanlardan daha yüksek esneklik modülüne sahip olduğu ve dayanımın arttığı farklı çalışmalarda ifade edilmiştir [26]. Van ili ve Süphan Dağı arasındaki bölgede bazalt kayalarının yanı sıra kireçtaşı, pomza, trakit gibi SiO_2 içeriği %45-60 arasında değişen kayalar bulunmaktadır [27]. Bölge de bulunan pomza taşı birçok çalışmada değerlendirilmiştir. Pomzanın beton veya dolgu malzemesi olan bims blok yapımında kullanımı farklı çalışmalarda araştırılmıştır [27], [28]. Ancak Süphan Dağı bölgesinde bulunan volkanik kayalar geçmişten günümüze yeteri düzeyde değerlendirilmemiştir. Dağın eteklerinde kayaların bulunmadığı veya temizlendiği verimli araziler üzerinde tarım yapılmaktadır (Şekil 2). Bu araziler sulanabilir imkanlara sahiptir ancak bazalt yığınları nedeniyle tarım zorlukla yapılmaktadır. Bu yığınların temizlenmesi ile oldukça geniş alanların tarıma kazandırılacağı ön görülmektedir.

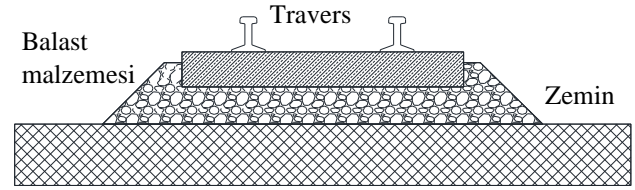


Şekil 2. Süphan Dağı bölgesinde bulunan bazalt kayaları

Demiryolu Balast Malzemesi

Demiryolu, üzerine gelen tren dinamik yüklerini zemine güvenle aktarabilmek için yüksek dayanımlı olmalıdır. Ayrıca aşınmaya karşı dirençli ve doğal drenaja sahip malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Yük aktarımının doğru ve sürekli olması gerektiğinden çok miktarda bulunan volkanik kayalar granit ve bazaltlar ideal bir malzeme olarak bu ihtiyacı karşılamaktadır. Bu nedenle balast malzemesi üst yapı yüklerini zemine doğru bir şekilde dağıtarak azaltma

görevini üstlenmektedir. Demiryolu üst yapısı yükü alana dağıtmak amacıyla tabakalı yapılıdır. Bu tabakalar demiryolu rayları, travers, balast, alt balast ve zeminden oluşmaktadır. Şekil 3'te tipik demiryolu üst yapısının enkesiti verilmiştir. Zamanla yolda oturma oluşabileceğinden tabaklar arası kaynaşmayı sağlamak için yol malzemesi yeterli düzeyde sıkıştırılır. Balast tabakası traverslerin üzerine oturduğu kırmataş tabakasından meydana gelmektedir [29]. Yolun çökmesi ve kaymasını engellemek amacıyla traversler bir miktar balast malzemesinin içine gömülür. Balast malzemesi yolun bazı kısımlarında dolgu malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Düzgün bir yük dağılımı ile yol stabilitesini sağlamak için uygun granülometride balast malzemesi kullanılır. Balastlı temel, traversler için yeterli düşey ve yanal mesnedi oluşturmaktadır. Balast temelinin agregalı olması ve betonlanmaması nedeniyle bakım ve onarımı oldukça kolaydır. Balastın irili yapısı nedeniyle yağmur ve kar suları için doğal drenaj sağlanmış olur. Yan yüzeyleri eğimli yapıldığı için yağmur suları yan yüzeylerden drene edilebilir özelliğindedir. Balast malzemesinin aşırı sıkıştırılması ile drenaj engellenebilir. Ayrıca yolun kullanılması ile zamanla balast malzemesi kırılarak küçük tanelere dönüşmekte ve malzemenin granülometrisini değiştirmektedir. Bu durumda da yolun drenajı engellenebilmektedir. Bu nedenle optimum düzeyde sıkıştırma gerekir.



Şekil 3. Tipik demiryolu üst yapısının enkesiti

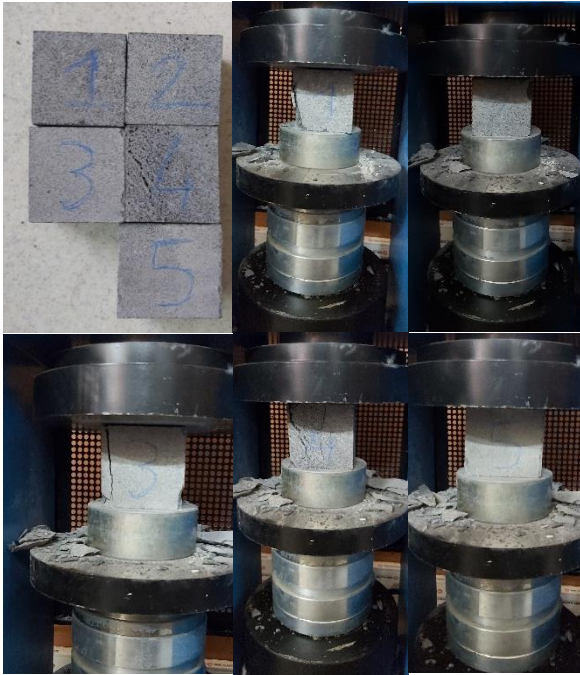
Balast malzemesinin kırıcılarda ufalanması ve yol hattına döşenip sıkıştırılması ile üst yapı oldukça hızlı bir şekilde yapılmaktadır. Yolun böylece hızlı yapılması ile erken hat döşenebilmekte ve hızlı ulaşım sağlanabilmektedir. Yol geometrisinin değiştirilmesi veya tren yüklerinin artırılması durumunda hızlı bir şekilde üst yapıda değişiklikler yapılmaktadır. Demiryolu kullanım ömrü balast malzemesinin kalitesine, granülometrisine ve yeterli düzeyde sıkıştırılmasına bağlıdır. Eğer balastlı malzeme ihtiyaç duyulan özelliklere sahip değil ise yol stabilitesi sağlanmamış olur yolda çökme, kayma vs. meydana gelebilir.

Bazalt Deneyleri ve Standartlar

Tek eksenli basınç deneyi

Demiryollarında balast malzemesi olarak bazalt kayacının kullanılması için detaylı fiziksel, mekanik, petrografik ve indeks parametreleri "TCDD Balast Teknik Şartnamesinde (2020)" verilmiştir [8]. Bu çalışmada yapılması gerekli olan deneylerden tek eksenli basınç deneyi, Los Angeles parçalanma direnci, su emme oranı, özgül kütle, donma-çözülme oranı, özgül ağırlık tayini deneyleri dikkate alınmıştır. Laboratuvar eksiklikleri nedeniyle diğer deneyler (Mikro-deval aşınma, $MgSO_4$, Noktasal yük, Brezilya yarma deneyleri) yapılmamıştır. Yönetmelikte önem verilen çalışmada en önemli iki deney belirleyici faktör olmaktadır. Bunlar malzemenin doğrudan mukavemetini belirlemek için

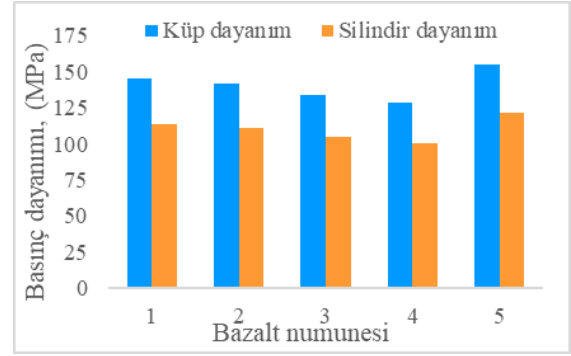
kullanılan tek eksenli basınç deneyi ve Los Angeles parçalanma deneyidir. Bazalt yüksek dayanımlı olduğu için beton gibi davranış göstermektedir. Tek eksenli basınç deneyi ile beton gibi malzemelerin temel mekanik özelliği belirlenebilir [30], [31]. Basınç deneyi ile balast malzemesi doğru bir şekilde sınıflandırılabilir ve türüne karar verilebilir [32], [33]. Tek eksenli basınç deneylerinde TS EN 1926 ve TS EN 13791 standartları esas alınmıştır [34], [35]. Beton gibi malzemelerin basınç dayanımının hesaplanmasında çoğunlukla küp numune, elastisite modülünün hesaplanmasında silindir numune kullanılmaktadır [30], [31]. Ayrıca küp ve silindir numuneler genel standartlara uygun ölçülerde olduğundan karşılaştırılabilir özelliktedir [36]. Bu nedenle çalışmada 5 adet 100 mm'lik küp bazalt numune araziden alınan bloklardan kesilmiş ve tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 4). Numune yüzeyleri pürüzsüz ve eğimsiz kesildiği için ek başlık yapılmamıştır. Basınç yükleme hızı 1.0 MPa/s ile ayarlanmıştır. Küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 140.93 MPa ölçülmüştür. Sonuçlar Tablo 1 ve Şekil 5'te verilmiştir. Standart silindir basınç dayanımını (150-300 mm) elde etmek için Demirel ve Gökdemir (2014) çalışmasına göre dönüşüm katsayısı 1/1.28 ile çarpılarak 110.10 MPa bulunmuştur [37]. Standart sapma değeri ise 8.15 olarak elde edilmiştir. Bazalt kayacının basınç mukavemeti hesaplanmış ve TS 7043 EN 13450 standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir [9].



Şekil 4. Bazalt numuneleri ve tek eksenli basınç deneyi

Tablo 1. Tek eksenli basınç dayanımı

Deney No	Küp dayanım (MPa)	Silindir dayanım (MPa)
1	145.42	113.61
2	141.74	110.73
3	133.86	104.58
4	128.34	100.27
5	155.28	121.31
Ortalama	140.93	110.10



Şekil 5. Tek eksenli basınç dayanım değişimi

Los Angeles parçalanma deneyi

Balast malzemesi dinamik yükler altında zamanla parçalanmakta ve aşınmaktadır. Kayaç türüne göre parçalanma ve aşınma süresi değişmektedir. TCDD balast teknik şartnamesine (2020) göre malzemenin parçalanma direncini ölçmek için Los Angeles deneyi yapılmalıdır [8]. Bu doğrultuda TS EN 1097-2 standardına göre Los Angeles deneyi yapılmıştır (Şekil 6) [33]. Standart gereği çelikten yapılmış tambur içerisine 12 adet çelik bilye konulmuştur. 10-14 mm elek aralığındaki 5000 g bazalt malzemesi tambura konularak 30-33 devir/dakika ile toplam 500 devir yapılmıştır. Devir sırasında çelik bilyeler bazalt agregalarına çarparak malzemeyi kırmıştır. Toplam malzeme 1.6 mm'lik göz açıklıklı elekten elenmiş ve kayıp oranı LA değeri hesaplanmıştır. TS 7043 EN 13450'ye göre HT/YHT (Hızlı Tren/ Yüksek Hızlı Tren Hatları) LA değeri %14'ün altında bulunmuştur [9].



Şekil 6. Bazalt agregası ve Los Angeles deneyi

Tablo 2. Los Angeles parçalanma dayanımı

Numune	Malzeme boyutu (mm)	Malzeme miktarı (g)	1.7 mm üstü malzeme miktarı (g)	Los Angeles parçalanma değeri, LA (%)
Bazalt	10-14	5000	4584	8.32

Su emme oranı ve birim hacim kütle deneyi

Bazaltın su emme oranı tayini TS EN 1097-6 Ek-B'ye uygun olarak yapılmıştır (Şekil 7) [38]. Deney standardına uygun olarak 10 ve 14 mm göz açıklıklı elek aralığındaki malzeme etüvde 105 ± 2 C° sıcaklıkta 24 saat kadar bekletilip tamamen kurutulmuştur. Tamamen kuru 4000 g malzeme suya doygun hale 3 gün bırakılmıştır. Yön ve Karataş 2022 çalışmasında benzer şekilde küp numuneler 2 gün suya doygun hale getirilmiş ve ardından yüzeyi kurutulmuştur [39]. Doygun su, kuru yüzey ağırlığı 4054 g olarak ölçülmüştür. Su emme oranı %1.35 olarak bulunmuş ve HT/YHT için TS 7043 EN 13450'de verilen sınır değer ile karşılaştırılmıştır [9]. Ayrıca birim hacim kütlelerinin belirlenmesi için küp numuneler kullanılmıştır. TS EN 1097-6 Ek-B'ye uygun olarak bazalt birim hacim kütleleri 2.834 t/m^3 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7) [38].



Şekil 7. Bazalt, su emme oranı ve birim hacim kütle deneyi

Donma-çözülme deneyi

Malzemenin donma-çözülme direnci mekanik davranışını gösteren ayrı bir parametredir. Donma-çözülme iklimsel koşullar altında malzemenin durabilitesi hakkında bilgi edinmek için oldukça önemlidir [39], [40]. Durabilitenin harç ve benzeri malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği ifade edilmiştir [39]. Li ve diğ. 2022 çalışmasında donma-çözülme döngüsü ile kılcal boşlukların genişlediği bu durumda mikro çatlakların makro özellikleri etkilediği ve yapısal sorunlara neden olduğu ifade edilmiştir [41]. Bu bağlamda bazalt kayaçlarının donma-çözülme tepkisinin öğrenilmesi gerekmektedir. Çalışmada bazalt agregasının donma-çözülme direncini ölçmek için TS EN 1367-1 standardı kullanılmıştır [42]. Ancak laboratuvar koşulları nedeniyle magnezyum sülfat deneyi yerine su ile donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Hamzah ve diğ. 2021, Moodi ve diğ. 2021 ve Mermerdaş ve diğ. 2021 çalışmalarında 300 donma-çözülme döngü ile beton numunelerinin deneyleri yapılmış ve tek eksenli basınç değişimi gözlenmiştir [43]-[45]. Her 50 döngüde ağırlık kaybı, yüzey bozulması ve ultrasonik ses dalga hızı (UPV) değerleri ölçülerek kayıp gözlenmiştir. Yön ve Karataş 2022 çalışmasında harç ve beton numunelerinin 100 döngüde donma-çözülme deneyi yapılmıştır [39]. Her 25 döngüde ağırlık kaybı, yüzey bozulması ve ultrasonik ses dalga hızı (UPV) değerleri ölçülmüştür. Bu çalışmada ise yüksek döngü sayısına ihtiyaç duyulmadığından daha az donma-çözülme döngüsü yapılmıştır. Etüvde 24 saat kadar tamamen kurutulan ve 8-16 mm açıklıklı elek arasında kalan Şekil 8'de verilen 2000 g'lık malzeme deneye tabi tutulmuştur. -17.5 ± 2.5 C° ile $+20 \pm 3$ C° arasında 10 döngü yapılarak donma-çözülme uygulanmıştır.

Her döngü bir gün içerisinde yapılmıştır. Donan agregalar $+20$ C°'da sıcaklığında 24 saat içinde çözülmüş ve tekrar bir sonraki çevrim için dondurulmuştur. Döngüyü tamamlayan agregalar etüvde 105 ± 2 C° sıcaklıkta 24 saat bekletilerek tamamen kuru hale getirilmiştir. Ardından TS EN 1367-1 standardına uygun olarak kayıp malzemenin hesaplanması için 4 mm açıklıklı elekten elenmiştir [42]. 4 mm göz açıklıklı elekten geçen malzeme ince agrega olarak sınıflandırıldığından ve balast malzemesi olarak kullanımı uygun olmadığından donma-çözülme kayıp ölçümünde bu elek kullanılmıştır. Tablo 3'te detaylar verilmiştir. Donma-çözülme sonrası elde edilen malzeme kaybı %1.1 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Donma-çözülme kaybı

Numune	Malzeme boyutu (mm)	Malzeme miktarı (g)	4 mm üstü malzeme miktarı (g)	Donma-çözülme kaybı (%)
Bazalt	8-16	2000	1978	1.1



Şekil 8. Bazalt agregasının donma çözülme deneyi

Bazalt kayacının kimyasal analizi

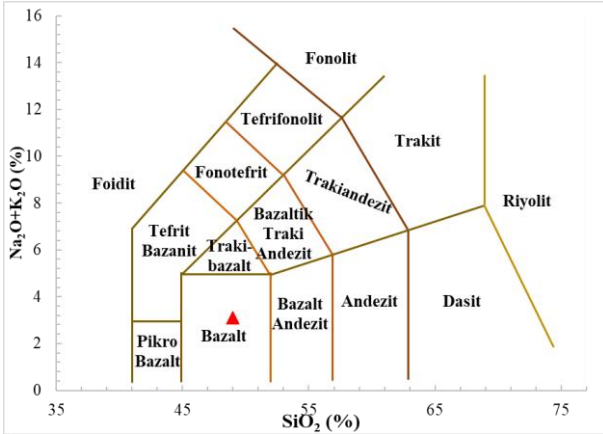
Le Maitre, 1989 çalışmasına göre volkanik kayaçlar kimyasal içeriğindeki SiO_2 ile $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ yüzdeleri oranına göre 15 ayrı sınıfa ayrılmıştır [46], [47]. Sınıflandırmada koordinat takımı kullanılmış ve toplam alkali-silika (TAS) diyagramı oluşturulmuştur. Bu diyagram ile bazalt, andezit, dasit, riyolit, foidit, fonolit, trakit ve bunların birleşimleri sınıflandırılabilir. Bu bağlamda günümüze kadar volkanik kayaçların kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılmasında temelde bu yöntem uygulanmıştır.

Tablo 4. İncelenen bazalt kayacının kimyasal analiz sonuçları

SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na_2O (%)
49.0	17.2	10.0	7.3	10.7	2.5
K_2O (%)	TiO_2 (%)	P_2O_5 (%)	MnO (%)	A.Za (%)	
0.6	1.4	0.2	0.2	0.45	

Literatürde bulunan birçok çalışmaya benzer şekilde bazalt kayacının sınıfı belirlenmeye çalışılmıştır [46]. Bu amaçla bazalt kayacının XRF (X-ışını Floresan) analizi gerçekleştirilerek kimyasal özellikleri Tablo 4'te verildiği

gibi belirlenmiştir. Bazalt kayacında SiO_2 ile $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ değerleri sırasıyla 49.0 ve 3.1 bulunmuştur. Bu oranlara göre bazalt kayacının TAS diyagramındaki yeri Şekil 9'daki gibi üçgen sembolü ile işaretlenmiştir.



Şekil 9. Toplam alkali-silika (TAS) diyagramı volkanik kayaç sınıflandırılması [47]

Bulgular ve Tartışma

Süphan Dağı bazaltının demiryolunda balast malzemesi olarak kullanılması için TCDD balast teknik şartnamesine (2020) göre dikkate alınan deneyler standartlara uygun olarak yapılmış ve Tablo 5'te verilmiştir [8]. Tek eksenli basınç dayanımı, Los Angeles parçalanma direnci, su emme tayini, özgül kütle ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Bulgulara göre tüm sınır değerleri karşıladığı ve demiryolu yapımında balast olarak kullanımına uygun olduğu görülmüştür. Kenan vd., (2012) ile Kahraman ve Yapıcı (2022) çalışmalarında da kullanılan bazaltların için benzer sonuçlar bulunmuştur [3], [11]. Çalışmada dikkate alınan bazalt kayaçları Van-Erciş doğrultusunda, Van ili ile batı illeri arasında daha az engebe ve dağların bulunduğu güzergâhta bulunmaktadır. Deney bulguları ile malzeme temininin kolay olduğu görülmüştür. Bu bağlamda Van iline yapılacak hızlı ve yüksek hızlı tren hattının ülke ekonomisine katkı sağlayacağı söylenebilir. Bölgeler arası ulaşımı hızlandıracağı ve Van bölgesinin kalkınmasını hızlandıracağı söylenebilir.

Tablo 5. Süphan Dağı bazaltının sonuçları ve uygun standart değerleri

Deney Türü	Uygulanan Standart	Deney Sonucu	Standart Değeri	Değerlendirme
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	100 mm küp TS EN 1926 (2007), TS EN 13791 (2019) [34], [35]	110.10 MPa	Sert kayaç grubu	Uygun tayini
Los Angeles Parçalanma Kaybı	TS EN 1097-2 (2020) [33]	%8.32	LA<%20	Uygun
Su Emme Oranı	10-14 mm TS EN 1097-6 (2022) [38]	%1.35	Maks. %1.5	Uygun
Özgül Kütle	TS EN 1367-1 (2009) [42]	2.834 t/m ³	Min. 2.60 t/m ³	Uygun
Donma Çözülme		%1.1	Maks. %3	Uygun

Sonuç

Türkiye'de Doğu Anadolu Bölgesinde volkanik faaliyetler sonucu bazalt kayalarları oldukça yer kaplamaktadır. Volkanik bir kayaç olan bazalt yüksek dayanımlı, dirençli ve ağır bir malzemedir. Van-Süphan Dağı arasında bulunan bazalt kayalarının TCDD balast teknik şartnamesine (2020) uygun olarak hızlı ve yüksek hızlı tren hatlarında balast olarak kullanımı değerlendirilmiştir [8]. Deneylerde özetle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tek eksenli basınç, Los Angeles parçalanma, su emme oranı, özgül kütle ve donma çözülme deneylerine göre bazalt kayacının uygun olduğu görülmüştür.
- Bölgede bulunan bazalt kayalarının yüksek dayanımlı olması nedeniyle demiryolu yapımına olanak vereceği sonucuna varılmıştır.
- Alt ve üst yapıların inşası için bazalt agregasının temin edilebileceği gözlenmiştir.
- Oldukça geniş alana yayılan bazaltın temizlenmesi ile yeni tarım arazilerinin ortaya çıkarılacağı söylenebilir.

- Yüksek hızlı tren hattının yapımı ile hızlı ulaşım sağlanmış olacaktır. Doğu-batı etkileşimi artarak bölgenin kalkınması hızlanacaktır.
- Hızlı tren hattının yapılması ile yeni üretim alanlarının ve istihdamın sağlanacağı söylenebilir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Yazar Katkıları

Kıpçak: Çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması, taslağın oluşturulması, revizyon,

Teşekkür

Yazar: Van yüzüncü yıl üniversitesi ve Dicle üniversitesi yapı ve geoteknik laboratuvar sorumlularına teşekkürlerini sunmaktadır.

Kaynaklar

- [1] M. Kozak, "Demiryolunda rayların birleşim noktaları ve özelliklerinin araştırılması," *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(2), 40-49, 2011.
- [2] T. Koray, İ. Çobanoğlu ve M. Demir, "Ofiyolitler içerisindeki gabro dayklarının balast malzemesi olarak kullanılabilirliği: inceler (Bozkurt-Denizli) örneği," *KSU Mühendislik Dergisi*, 17(2), 2014.
- [3] E. Kahraman ve N. Yapıcı, "Kurtpınar (Ceyhan) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanımının değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 14-22. doi: 10.47072/demiryolu.1082366, 2022.
- [4] M. Ç. Bayrak, "Altyapı özelliklerinin demiryolu üstyapısının performansına etkisi," *Yayınlanmamış doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 176s, 2018.*
- [5] W. L. Lim, "Mechanics of railway ballast behaviour," *Yayınlanmamış doktora tezi, University of Nottingham, 2004.*
- [6] R. Roberts, J. Rudy, I. A. Qadi, E. Tutumluer ve J. Boyle, "Railroad Ballast Fouling Detection Using Ground Penetrating Radar-A New Approach Based on Scatte-ring from Voids," *ECNDT 2006 Symposium, Berlin, 2006.*
- [7] K. V. Çelik and H. Karaşin, "Karbon elyaf ile betonun güçlendirilmesi", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 5, no. 1, pp. 1-11, Jun. 2014
- [8] TCDD Balast Teknik Şartnamesi, TCDD 2020, Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Devlet Demir Yolları İşletmesi Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 22s, 2020.
- [9] Demiryolu Balastları için Agregalar, TS 7043 EN 13450, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [10] Doğal yapı taşları- inceleme ve laboratuvar deney yöntemleri, TS 699, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [11] O. Kenan, İ. Topal ve E. Poşluk, "Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren demiryolunda balast hammaddesi olarak granit ve bazaltın birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması ve aşınma dayanımlarına etkisi," *MT Bilimsel*, (1), 81-89, 2012.
- [12] A. Yılmaz, "Demiryolu üstyapısında balast kirliliği," *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 6(1): 11-17, 2015.
- [13] M. Bozkurt, "Demiryolu I," *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1989.*
- [14] Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small- Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, AASHTO T 96-02, 2019.
- [15] M. Saltan ve A. A. EL, "Farklı bölgelerden temin edilen bazalt agregasının temel ve alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 28(3), 346-353, 2022.
- [16] M. Kozak, "Demiryolu balastının ve özelliklerin araştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 13, pp. 86-96, doi: 10.47072/demiryolu.831684, 2021.
- [17] A. Binal, K. E. Kasapoglu, ve C. Gokceoglu, "The surficial physical deterioration behaviour of Neogene volcano-sedimentary rocks of Eskiehir-Yazihkaya, NW Turkey," *Proc. Int. Symp. On Engineering Geology and Environment, Athens, Greece, A.A. Balkema, Rotterdam, V3, 3065-3069, 1997.*
- [18] K. Oğul, İ. Topal ve E. Poşluk, "Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren demiryolunda balast hammaddesi olarak granit ve bazaltın birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması ve aşınma dayanımlarına etkisi," *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, s:1, 2012.
- [19] M. T. Şengün ve M. Siler, "Harput Platosu'ndaki Genç Volkanik Alanlar ve Bu Arazilerin Kullanımı" *Fırat Üniversitesi Harput Araştırmaları Dergisi Cilt: I, Sayı:1, Elâzığ, 2014.*
- [20] Wikipedia, Süphan dağı, (08.2023). https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCphan_Da%C4%9F%C4%B1.
- [21] J. A. Pearce, J. F. Bender, S. E. De Long, W. S. F. Kidd, P. J. Low, Y. Güner, F. Şaroğlu, Y. Yılmaz, S. Moorbath ve J. J. Mitchell, "Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia Turkey," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44, 189-229, 1990.
- [22] S. Kılıçaltan and U. Demir, "Hafif Blok Üretiminde Çanakkale Ayyvacık Volkanik Tüfünün Agregata Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 12, no. 5, pp. 821-828, Dec. 2021. doi:10.24012/dumf.1051469.
- [23] M. Derman, Ö. Adıgüzel, E. Zengin ve Z. A. Ergüler, "Sabuncular-Kütahya arasındaki demiryollarında balast malzemesi olarak kullanılan volkanik kayacın fiziksel mineralojik ve aşınma özellikleri üzerinde bozunma süreçlerinin etkisi," *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, ISSN-1302-3055, 2012.
- [24] M. Akatay, "Diyarbakır bazaltlarının bazı önemli malzeme özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle belirlenebilirliğinin araştırılması," *Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.*
- [25] J. A. Hudson, "Engineering properties of rocks," volume 4, Elsevier, 2005.
- [26] İ. Güzel and A. Benli, "Bazalt Agregalı Bitümlü Sıcak Karışım Tabakalarının Dinamik Rijitlik Modülünün Hesaplanması Ve Marshall Tasarım Kriterleriyle Karşılaştırılması", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 11, no. 3, pp. 1373-1384, Sep. 2020, doi:10.24012/dumf.712090.
- [27] O. O. Varol, M. Ayhan and V. Oyan, "Van İli Kuzeyinde Yer Alan Ortaç Volkanik Agregalarda ASR Etkilerinin İncelenmesi", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 817-827, Sep. 2018.
- [28] E. Işık, A. Karaşin ve Y. Kayan, "Pomzadan imal edilmiş çelik lif katkılı bims blokların mekanik özelliklerinin araştırılması", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 11, sayı. 2, ss. 723-730, Haz. 2020, doi:10.24012/dumf.493530.
- [29] M. Ozburan, "Kütahya ve Çevresinin Neotektonik İncelemesi," *Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 209s, 2009.*

- [30] V. Abdullah, E. Aydın and İ. Bedirhanoğlu, "Beton elasticsite modülünün ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 8, no. 3, pp. 475-484, Jul. 2017.
- [31] Z. Zebari, İ. Bedirhanoğlu and E. Aydın, "Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 8, no. 1, pp. 43-52, Mar. 2017.
- [32] J. C. Dixon, C. E. Thorn, R. G. Darmody ve P. Schlyter, "Weathering rates offine pebbles at the soil surface in Karkevagge," Swedish Lapland. Catena 45, 273-286, 2001.
- [33] Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar, TS EN 1097-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2020.
- [34] Doğal taşlar-Deney yöntemleri-Basınç dayanımı tayini, TS EN 1926, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [35] Basınç dayanımının yapılar ve öndökümlü beton bileşenlerde yerinde tayini, TS EN 13791, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [36] S. Yılmaz Çetin and R. İnce, "Küp numunelerin yarmada-çekme dayanımında agrega granülometrisinin boyut değişimi üzerine etkisi", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 8, no. 3, pp. 443-451, Jul. 2017
- [37] C. Demirel ve A. Gökdemir, "Çeper etkisi oluşmayan farklı biçim ve boyuttaki beton numunelerin basınç dayanımlarının deneysel karşılaştırılması," Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 6(3), 29-48, 2014.
- [38] Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, TS EN 1097-6, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2022.
- [39] M. Ş. Yön ve M. Karataş. "Evaluation of the mechanical properties and durability of self-compacting alkali-activated mortar made from boron waste and granulated blast furnace slag." Journal of Building Engineering 61, 105263, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105263>.
- [40] M. Ş. Yön, F. Arslan, M. Karatas & A. Benli, "High-temperature and abrasion resistance of self-compacting mortars incorporating binary and ternary blends of silica fume and slag". Construction and Building Materials, 355, 129244, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129244>.
- [41] F. Li, D. Chen, Y. Lu, H. Zhang ve S. Li, "Influence of mixed fibers on fly ash based geopolymer resistance against freeze-thaw cycles." Journal of Non-Crystalline Solids 584, 121517, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121517>.
- [42] Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Donmaya ve Çözölmeye Karşı Direncin Tayini, TS EN 1367-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [43] H. K. Hamzah, G. F. Huseien, M. A. Asaad, D. P. Georgescu, S. K. Ghoshal ve F. Alrshoudi, "Effect of waste glass bottles-derived nanopowder as slag replacement on mortars with alkali activation: Durability characteristics". Case Studies in Construction Materials, 15, e00775, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00775>.
- [44] F. Moodi, N. Sepehr ve D. Pooria. "Mechanical properties and durability of alkali-activated slag repair mortars containing silica fume against freeze-thaw cycles and salt scaling attack." Advances in concrete construction 11.6, 493-505. 2021. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.11.6.493>.
- [45] K. Mermerdaş, İ. Süleyman ve M. Zana "Visual inspection and mechanical testing of fly ash-based fibrous geopolymer composites under freeze-thaw cycles." Construction and Building Materials, 283, 122756, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122756>.
- [46] G. Saruışık, "Volkanik Kayaçların Endüstriyel Kullanımı Üzerine Bir Araştırma". MT Bilimsel (23), 1-14, 2023.
- [47] Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B, "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram". J Petrol. 27, 74-750, 1986.