



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdersi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdersi
Cilt: 15, Sayı: 3, Eylül 2024 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilege Owner
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Cafer BUDAK
Mehmet Emin ÖNCÜ
Muhammed Bahaddin KURT
İdris BEDİRHANOĞLU
Abdülkadir ALBAYRAK
Atilla Gencer DEVECİOĞLU
Fevzi SARITAŞ
Fevzi ÖNEN
Bilal GÜMÜŞ
Erkan BAHÇE
Fatma DENİZ ÖZTÜRK
Mehmet Salih KESKİN
Beyhan İPEKYÜZ

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.

Sıtkı Kocaoğlu (Yıldırım Beyazıt Üniversitesi)

İlhan Umut (Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi)

Kaplan Kaplan (Kocaeli Üniversitesi)

İhsan Tuğal (Muş Alparslan Üniversitesi)

Ahmet Yahya Teşneli (Sakarya Üniversitesi)

Selçuk Helhel (Akdeniz Üniversitesi)

Fevzi Sarıtaş (ITU)

Baki Öztürk (Hacettepe Üniversitesi)

Ahmet Elbir (YTU)

Faruk Bulut (İstanbul Esenyurt Üniversitesi)

Kadir Çavdar (Uludağ Üniversitesi)

Fatih Balıkoğlu (Balıkesir Üniversitesi)

Ahmet Saygılı (Namık Kemal Üniversitesi)

Ceren Kaya (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi)

Mesut Gör (Fırat Üniversitesi)

Ahmet Şenol (Cumhuriyet Üniversitesi)

Kurtuluş Soyluk (Gazi Üniversitesi)

Şahin Güneş (University of Birmingham)

Murat Batan (Batman Üniversitesi)

Ertuğrul Gül (Hakkâri Üniversitesi)

Gökmen Öztürkmen (Gaziantep Üniversitesi)

Mahmut Temel Özdemir (Fırat Üniversitesi)

Ömer Kazak (Necmettin Erbakan Üniversitesi)

Burçin Yıldız (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)

Hakan Çelebi (Aksaray Üniversitesi)

Ertuğrul Gül (Hakkâri Üniversitesi)

Süreyya Altın (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi)

Veysi Kartal (Siirt Üniversitesi)

Ender Emir (Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi)

Burak Özdemir (Malatya Turgut Özal Üniversitesi)

Taner Göktaş (Dokuz Eylül Üniversitesi)

Zeki Omaç (Munzur Üniversitesi)

Murat Erdemoğlu (İnönü Üniversitesi)

Nurullah Çalık (İstanbul Medeniyet Üniversitesi)

Eyyüb Karakan (Kilis 7 Aralık Üniversitesi)

Maksut Seloğlu (Fırat Üniversitesi)

Merve Şahin Yön (Munzur Üniversitesi)

Eyyup Ensar Başakın (ITU)

Şenol Emir (İstanbul Üniversitesi)

Derya Deniz (Özyeğin Üniversitesi)

Çağlar Göksu Akkaya (ITU)

Halil Görgün (DU)

Senem Yılmaz Çetin (DU)

Cem Haydaroglu (DU)

M. Zahir Düz (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

An Automatic Labeling Approach Towards Multi-class Sitting Posture Classification Based on Depth-Sensor Data (Research Article)

Hüseyin Coşkun 559

Design and implementation of multiband microstrip antenna for energy harvesting (Research Article)

Muhammed Süzgün, Mustafa Cansız 569

Beton çatlakların derin öğrenme tabanlı semantik segmentasyonunda kodlayıcı değişkenlerinin karşılaştırmalı analizi (Araştırma Makalesi)
Comparative analysis of encoder variants in deep learning-based semantic segmentation of concrete cracks (Research Article)

Hasan Polat, Serhat Alpergin, Mehmet Sıraç Özerdem 581

Görme Engelli Bireylerin Günlük Yaşamda Karşılaştıkları Zorluklara Yenilikçi Bir Çözüm: Derin Öğrenme Tabanlı Akıllı Asistan Tasarımı ve Geliştirilmesi (Araştırma Makalesi)
Innovative Solutions to the Challenges Faced by Visually Impaired Individuals in Daily Life: Design and Development of a Deep Learning-Based Smart Assistant (Research Article)

Mehmet Ali Yalçınkaya, Murat Işık, Elanur Kaşçıoğlu, Hatice Nur Kaya 595

Farklı rüzgâr hızı ve güneş radyasyon oranına sahip bölgeler için mikro şebeke tasarımı ve karşılaştırmalı analizi (Araştırma Makalesi)
Microgrid design and comparative analysis for regions with different wind speed and solar radiation rate (Research Article)

Mehmet Ali Köprü, Dursun Öztürk, Burak Yıldırım 607

Dynamic Model and Control of an Electric Vehicle with Four In-Wheel PMSMs (Research Article)

Merve Yıldırım, Eyyüp Öksüztepe, Hasan Kurum 615

Multi-scale Residual Segmentation Network for Histopathological Image (Research Article)

Zehra Bozdağ Karakeçi, Muhammed Fatih Talu 623

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

Çift-yönlü dokuma kumaş takviyeli kompozit levhalarda mekanik özelliklerin anizotropiye bağlı değişimi ve optimum laminasyon tasarımı önerisi (Araştırma Makalesi)
Variation in mechanical properties with anisotropy and proposal for optimal design of lamination in bidirectional woven fabric reinforced composite sheets (Research Article)

Raif Sakin 633

Investigation of Diffusion Welding With SX Steel Itself Using Different Interlayer Materials (Research Article)

Jiyan Güney, Selçuk Keskin, Haluk Kejanlı 641

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

- Aşırı öğütülmüş kalkopirit konsantresinden bakırın nitrik asit ve dikromat ortamında seçimli kazanımı (Araştırma Makalesi)
Selective recovery of copper from intensively milled chalcopyrite concentrate in nitric acid and dichromate medium (Research Article)
Zeynel Abidin Sarı, Mehmet Deniz Turan **653**

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- Betonarme Perde Duvarların Eğilme ve Kesme Etkilerine Karşı Güçlendirilmesi Üzerine Literatür Değerlendirmesi (Derleme Makalesi)
Literature Review on Retrofitting of Reinforced Concrete Shear Walls Against Flexural and Shear Effects (Review Article)
Yunus Efe, İdris Bedirhanoğlu **663**
- Yığma Kemerli Bir Köprünün Yapay Deprem Kayıtları Altında Sismik Analizi (Araştırma Makalesi)
Seismic Analysis of a Masonry Arch Bridge under Artificial Earthquake Records
Title of paper in English (Research Article)
Esra Adsız, Erkut Sayın, Alper Özmen **677**
- Siirt Aktaş heyelanının sonlu elemanlar ve limit denge yöntemi ile analizi (Araştırma Makalesi)
Analysis of Siirt Aktaş landslide finite element method and limit equilibrium method (Research Article)
M. Hayrullah Akyıldız, Sema Nasıroğlu, M. Salih Keskin **689**
- Sıvı sönümleyici ile tarihi minarelerin deprem tepkisinin iyileştirilmesinin lineer dinamik analizi (Araştırma Makalesi)
Linear dynamic analysis of improving earthquake response of historical minarets with liquid damper (Research Article)
Muhammed Enser Yiğit **701**
- Bir borudan çıkan çift fazlı jetin deneysel incelenmesi (Araştırma Makalesi)
Experimental investigation of a double-phase jet emerging from a pipe (Research Article)
Şeyhmus Tümmür, Arjin Ata, Tamer Bağatur **713**
- Investigation of the Adsorption Performance of Aqueous Solution of Malachite Green Dye on Kaolin Clay (Research Article)
Alper Solmaz **719**
- Hesko Kaynağı'nın Sulama ve İçme Suyu Kalitesinin Mevsimsel Analizi: Şirvan, Siirt Örneği (Araştırma Makalesi)
Seasonal Analysis of Irrigation and Drinking Water Quality of Hesko Spring: The Case of Şirvan, Siirt (Research Article)
Veysel Süleyman Yavuz **727**
- Evaluation of Pore Water Pressure Generation in Sands Containing Kaolin (Research Article)
İrem Bozyiğit **737**

Gradyan Güçlendirme Kullanarak Çelik Fiberli Geopolimerin Basınç Dayanımının Tahmini (Araştırma Makalesi) <i>Prediction of Compressive Strength of Geopolymers Reinforced with Steel Fiber Using Gradient Boosting (Research Article)</i> Necip Altay Eren	745
Estimating contract price using structural variables: a machine learning approach with data preprocessing (Research Article) Semi Emrah Aslay	755
Deprem yalıtımlı ve ankastre temelli betonarme yapıların performansının TBDY-2018 kapsamında kıyaslamalı olarak değerlendirmesi (Araştırma Makalesi) <i>Comparative evaluation of seismically isolated buildings and fixed base buildings in accordance with the TSDC-2018 (Research Article)</i> Cem Yenidoğan	767

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.



An Automatic Labeling Approach Towards Multi-class Sitting Posture Classification Based on Depth-Sensor Data

Hüseyin COŞKUN*

Kütahya Health Sciences University, Computer Engineering Department, huseyin.coskun@ksbu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-8380-245X

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 August 2023
Received in revised form 27 June 2024
Accepted 7 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

classification, automatic labeling, sitting posture, geometric features, depth-based sensor.

ABSTRACT

This study aims to create a non-contact system for recognizing the sitting postures of office workers, applicable to healthy sitting monitoring. Skeletal point data were obtained via a depth sensor-based Kinect device while subjects performed five different sitting postures. Five angles have been calculated that can differentiate these postures. A fuzzy rule-based automated approach using angle values is proposed to label the data. With this method, two different data sets were created using traditional time-based labeling methods. Angular and geometric features were used to classify the depth values, and 99.6% and 98.9% accuracy were obtained with KNN and Adaboost classifiers. The proposed labeling method outperformed the traditional time-based labeling method according to the classification results. This system offers a high-performance solution for promoting healthy sitting habits in office workers and has applications in health monitoring and robot vision.

Doi: 10.24012/dumf.1351801

* Corresponding author

Introduction

The impact of proper sitting postures on health is gaining significance in today's modern lifestyle, where computers and technological devices are extensively used. Musculoskeletal Disorders (MSDs) are a prominent concern, with around 60% of EU workers attributing work-related health complaints to Musculoskeletal Disorders (MSDs) as their most serious problem [1]. MSDs are responsible for a substantial portion of work-related illnesses, often stemming from prolonged incorrect sitting positions. Globally, MSD cases have risen by 25% in the past decade, constituting 2% of the overall disease burden [2]. Addressing this, the study aims to enhance awareness of ergonomics and health by identifying and defining various sitting postures. The research seeks to delineate distinctions between these postures through scientific literature analysis and propose suggestions, ultimately promoting healthier habits. The potential of an automated sitting posture tracking system in fostering a healthier work environment is highlighted as a solution to mitigate health-related costs. With the data obtained from the relevant scientific literature, it is aimed to understand the differences between sitting postures and to present suggestions for this.

Related Works

Ray et al. [3] proposed an automated approach to classify construction workers' postures as ergonomic or non-ergonomic. The dataset, which contains 22226 poses compiled from twelve joint body points, has been used to classify the four postures belonging to 8 subjects. According to the experimental results, the accuracy value 94.8 has been achieved using the linear discriminant analysis (LDA) method in real time. Patsadu et al. [4] proposed a human gesture recognition system. There are six subjects, equal numbers of males and females, of various heights and weights. Two Kinect cameras have been used. They collected 7,200 and 3,600 records in the training and testing data sets, respectively. They labeled the raw data manually. They utilized BPNN (Back Propagation Neural Network) to classify three human gesture positions: standing, sitting, and laying down. They achieved the classification of three postures with 100% accuracy. Xia et al. [5] present a human action recognition system based on a Kinect device depth sensor. The dataset, which contains 6220 poses compiled from twenty body skeleton points, has been used to classify the five postures belonging to 10 subjects. They labeled the raw data using histograms of 3D joint locations.

Linear discriminant analysis (LDA) has been used for feature extraction. According to the experimental results, the accuracy value of 91.5 has been achieved using the Hidden Markov Model (HMM) to recognize five postures, including walking, sitting down, standing up, picking up, and carrying. Paliyawan et al. [6] proposed classifying office workers' sitting on the real-time skeleton data stream captured by a Kinect camera in an office work area. To create the dataset, they collected 397800 poses compiled from 10 body skeleton points belonging to 28 different subjects. The performance of several classification methods such as Decision Tree, (DT) Neural Network (NN), Naive Bayes (NB), and k-Nearest Neighbors (KNN) have been compared. They achieved the classification of one posture with 98% accuracy. Thus, real-time feedback based on the three levels of health in ergonomics has been given to subjects. Pal et al. [7] researched occupational hazards from prolonged sitting in a particular employee posture. Sitting posture recognition has been achieved using seven similarity measures. Using city-block distance, they classified two sitting body posture types with a high accuracy of 94.29% in 3.83 milliseconds. Therefore, the 6500 sitting poses containing the 16 different body skeleton points from 20 subjects have been collected to create the dataset. Yao et al. [8] proposed a new method to separate unhealthy sitting postures from others based on neck angle and torso angle detection using a Kinect sensor. While the angles have been calculated, the ten body skeleton points have been used. They collected 66330 sitting postures from 10 subjects in the five different posture classes. The method includes using a threshold at specific angle values, and they achieved 86.65 accuracy in classifying different sitting postures according to angle calculation results. There is no validation of the angle values calculated by the Kinect device in the study. Li et al. [9] proposed a method involving BPNN. The BP network used the skeleton data captured by the Kinect depth sensor to classify postures. They utilized eight skeleton points to recognize the sitting posture of 100 subjects. While they recognized four types of body posture, they achieved 97.77 accuracy for sitting posture. Bei et al. [10] present a sitting posture classification method based on a Kinect device depth sensor. The dataset, which contains 16200 poses compiled from six body skeleton points, has been used to classify the nine postures belonging to 18 subjects. According to the experimental results, the accuracy value of 95.8 has been achieved using the fusion of the body skeleton point features and the KNN method.

Research Gap

The existing literature does not clearly explain how various sitting postures are identified or the medical studies and standards underpinning them. This study examined relevant medical and health literature to precisely define the standard sitting posture, incorporating specific expressions and angle values to address this gap. In addition to establishing four distinct sitting postures to differentiate the standard from others, this research also revealed disparities between the subjects' preferred comfortable and standard sitting postures through classification.

Some studies have relied on observational methods to categorize body postures. In contrast, this study introduces a Kinect-based angular features method to address the limitations associated with qualitative observations. Many studies in the literature have proposed a single method for data classification, which may hinder the generalizability of findings. To overcome this limitation, this study classified five different sitting postures using angular features obtained from the Kinect device with eight classifiers. The classification results were then compared with existing studies in the literature. The comparison indicated that higher accuracy values were achieved with fewer joint points.

Material and Method

Determination of Sitting Postures

The suggestions of the studies in the literature [11]–[15] and definitions in ISO 7250-1:2017 [16] have been referred to for the determination of sitting postures. One is a healthy and standard body posture defined according to suggestions in the literature and ISO 7250-1 standard. A sample drawing of a healthy and standard body posture determined according to these suggestions in [11], [15], [16] is given in Figure 1 [12]. The five different positions that were determined are given in Table 1.

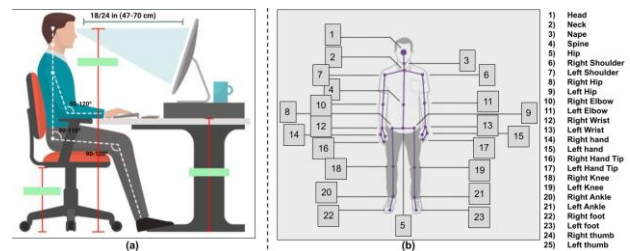


Figure 1. Standard sitting illustration (a), Kinect skeleton points (b)

In order to ensure that the sitting postures of the subjects are correctly changed during the experiment to apply the sitting positions specified in Table 1, a presentation containing the positions in Figure 4 was prepared. The subjects were asked to follow their sitting postures via this presentation throughout the experiment.

Experimental Setup and Software

Depth sensor-based data used for this study were collected with a Kinect camera. By using the depth camera, monitoring can be done without the user needing to install any equipment. An experimental setup was set up to create a depth sensor-based sitting posture database. In this setup, the subjects sit on a chair 1.5 meters from the Kinect device. They were requested to exhibit the postures defined in Table 1. Subjects waited for 30 seconds for each posture. The real-time data collection and recognition software (a) developed by Python, experimental setup (b), and presentation samples (c) are shown in Figure 2. The recognition software uses the TensorFlow machine learning library to create classification models.

Table 1. Definitions of sitting postures used in experiments

#	Name	Description	Ref.
1	Standard sitting	The hands were asked to sit on both armrests with the back fully leaned back and knees bent 90 degrees straight.	[11], [16], [17]
2	Leaning to the front side	They were asked to sit, so they bent forward as much as possible, avoiding contact with the back.	[11]–[14], [16]–[18]
3	Leaning to the left side	It was requested that the body be bent to the left by placing the right foot on the left foot and leaning the left arm on the armrest. The contact with the right sitting area was cut as much as possible.	[11]–[14], [16]–[18]
4	Leaning to the right side	The body was requested to be bent to the right by placing the left foot on the right foot and resting the right arm on the armrest. The contact with the left sitting area was cut as much as possible.	[11]–[14], [16]–[18]
5	Leaning to the backside	They were asked to sit and slide in the seat by creating a triangular gap in this area, in the form of cutting contact with the lower back and sitting back area.	[11]–[14], [16]–[18]

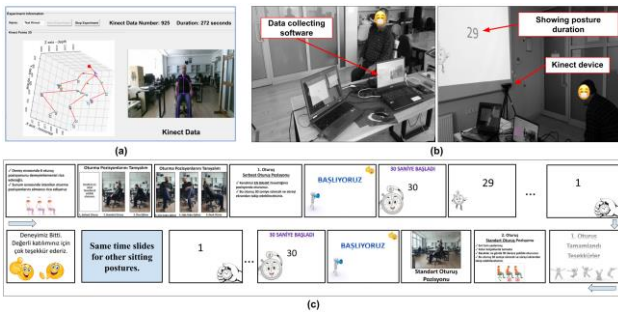


Figure 2. (a) Data collection software, (b) experimental setup, and (c) guide presentation

Labeling of Body Posture Data

Two approaches were used to label body posture. First, the traditional time-based approach was used. For this reason, the sitting posture signal of a subject was labeled by adding the start time of each subject to the duration of each sitting posture. Sample depth sensor signals of a subject are given in Figure 3. Dashed lines indicate signals of settling processes. When the time values are examined, it is seen that the subject does not take 30 seconds for each sitting position but more than 30 seconds for some postures. It was also observed in some other subjects.

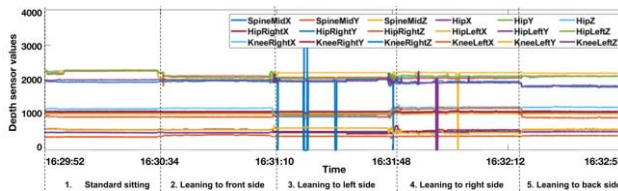


Figure 3. Example of a time-based depth sensor signal of sitting postures

The second approach is labeling sitting postures by using body limb angles in a fuzzy decision-making method while sitting. To apply the fuzzy-decision approach, the skeleton point positions were used to exclude body posture transition values from the data set and to label skeleton point data according to the definitions in Table 1.

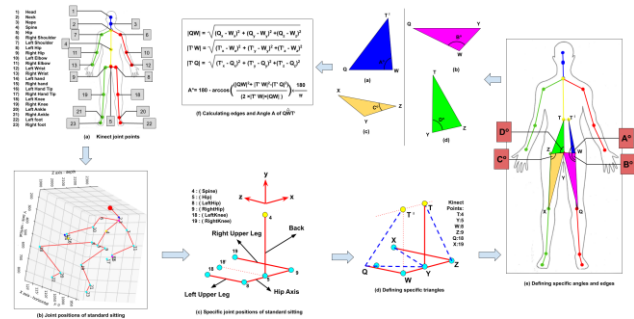


Figure 4. The skeleton points and the angles for standard posture

Each posture's specific angle values were selected to label using the skeleton points data. An example drawing and angle representation of skeleton point position data of standard sitting position is given in Figure 4. These angles have been defined respectively as the angle of the back with the left upper leg axis in the sitting position (A), the angle of the hip axis with the left upper leg (B), the angle of the hip axis with the right upper leg (C), and the left angle of the back with the hip axis (D). It was decided that these angles are the least number of angles that can represent incorrect sitting postures according to suggestions in [11], [15], [16]. Skeleton point location data is used as unit length, not actual length measures such as meters or inches. In order to calculate the angles A, B, C, and D, four triangles given in Figure 4 were formed, and the lengths of the sides forming these triangles were calculated. Since skeleton point coordinate information was obtained from the Kinect device in 3D space, the edge lengths of the triangles were calculated according to Equation 1 [19].

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \tag{1}$$

For a triangle whose sides are A, B, and C, respectively, and each side has interior angles with the same name, angle A is calculated by Equation 2 [19]. According to the example triangle (a) given in Figure 4, whose side lengths were calculated with Equation 1, the value of angle A was calculated with Equation 2. Likewise, Equation 2 calculates the angles B, C, and D.

$$A^\circ = 180 - \arccos\left(\frac{|AB|^2 + |AC|^2 - |BC|^2}{2 \times |AC| \times |AB|}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

During the experiment, raw data on the x (horizontal), y (vertical), and z (depth) axes of the 25 joint points of the subjects were obtained. The sample raw data of a subject and images of the skeletal pattern are presented in Figure 5.

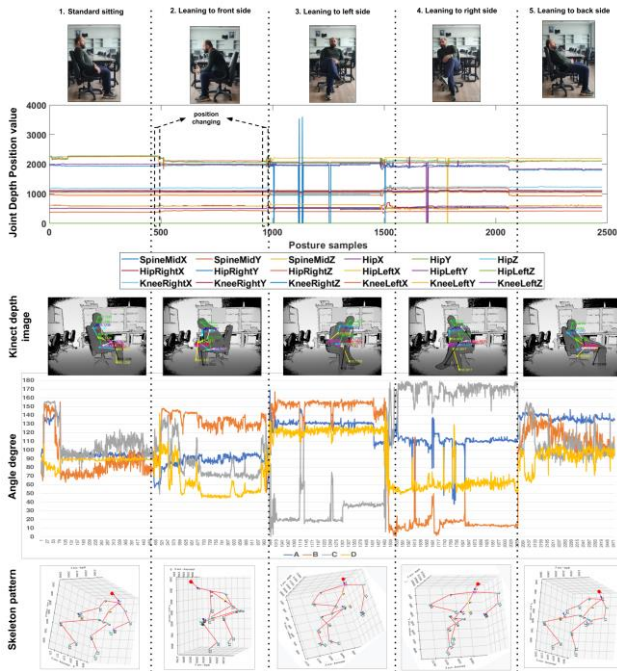


Figure 5. A subject's Kinect raw data as to sitting postures (between 1 and 2477 of supplementary data)

In Figure 5, the changes in the regions of the joint positions corresponding to the sitting positions for different axes values can be observed. The aim here is to determine the positions of the skeleton points of the subjects in the sitting position and to observe the proper sitting behavior with mathematical values instead of qualitative observation. The drawings were created as a result of axis rotation processes in order to make the skeleton point position drawings look more understandable in Figure 5. According to the angle range values determined by the recommendations in the literature in [11], [15], [16], the average angle values of the postures are given in Table 2; it is seen that angle values are suitable for the postures in Table 1.

Table 2. Angle values of sitting postures

Posture	1	2	3	4	5
Angle A	104.3	68.8	88.2	80.4	118.2
Angle A Range	95-105	65-90	85-90	85-90	110-120
Angle B	101.3	121.5	71.1	46.4	115.3
Angle B Range	95-105	110-125	65-80	40-60	110-125
Angle C	104.2	125.7	44.2	68.4	118.2
Angle C Range	95-105	110-125	40-60	65-80	110-125
Angle D	92.1	88.2	92.2	76.4	88.4

Angle D Range	95-105	85-100	85-100	70-80	80-90
---------------	--------	--------	--------	-------	-------

Since the sides forming the B and C angles represent the upper legs mutually, these values should be close to each other. When the values are examined in Table 2, it is seen that this situation is achieved. At the same time, angle A is an angle that should decrease when leaning forward and increase when leaning back. Therefore, when the values are examined, they are calculated correctly, especially in the second and fifth sitting postures. It is also seen that the D angle values should not change much since there is not much bending to the right and left in the second and fifth sitting postures. For each pose recorded in the dataset, the angle values were calculated using the joint points in Figure 4.

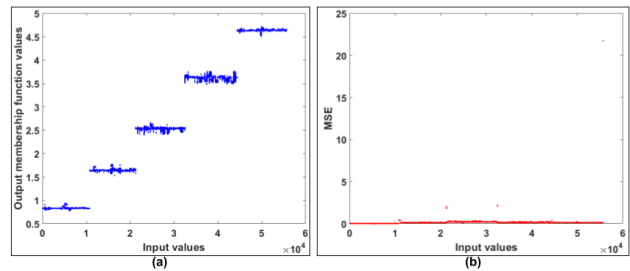


Figure 6. Fuzzy inference evaluation

Using SQL stored procedures, the sitting postures were labeled according to the angle ranges. Mamdani's fuzzy inference system is used in the fuzzy logic-based labeling approach. Four inputs are specified for each angle value. According to the angle ranges in Table 2, the Gaussian membership functions and the range of output variables for each class are defined as [0 5]. As the output variable membership function rules, range [0 1] for grade 1, range [1 2] for grade 2, range [2 3] for grade 3, range [3 4] for grade 4 and [4 5] range is determined for the 5th grade. The output results and MSE (Mean squared error) values after the designed fuzzy inference system's evaluation of the angle values are presented in Figure 6. When the charts are examined, it is seen that the classes are separated from each other due to the evaluation, and the MSE value is relatively low. Therefore, the fuzzy inference result labeled angle values clustered around their class as belonging to that class.

Selecting Features and Preparing the Dataset

After the fuzzy-rule-based labeling process, angular and geometric features from the upper body region were selected. This selection is because bottom body joint points like the hip can be unavailable due to office stuff like tables. Obtaining bottom body joint positions will be difficult when the study can be developed towards real-time application. Triangles were created using upper body joint points, and angle and distance attributes representing different seating positions were determined. The feature set is given in Figure 7.

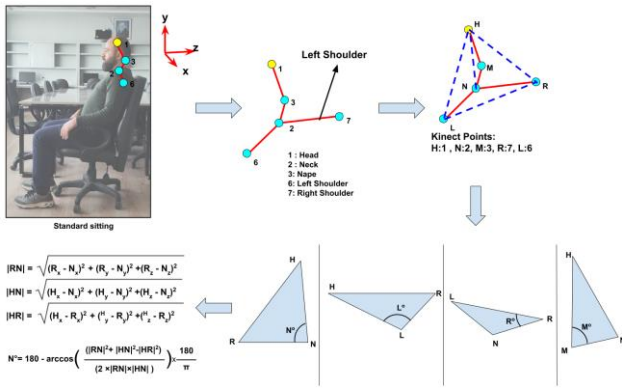


Figure 7. Calculation of angular and geometric features

The labeling and classification diagram is given in Figure 8. The depth sensor-based data of sitting body posture were obtained with an average 100 ms cycle (10 Hz). The field of view is 84.1 and 53.8 for horizontal and vertical, respectively. The depth distance is 3 meters.

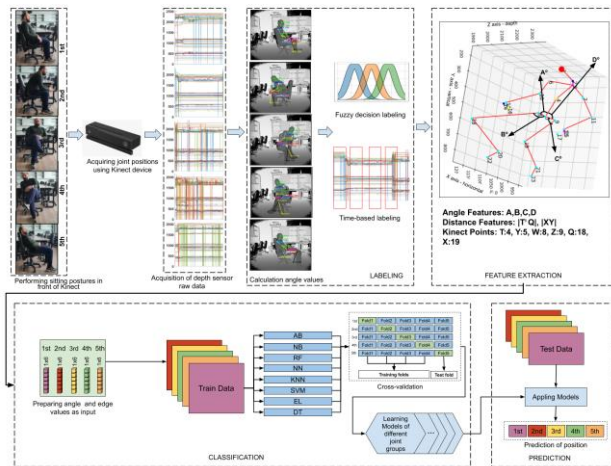


Figure 8. The general system diagram

It has been accepted that the lower body region meets the angle definitions made according to the standards and health recommendations in the literature given in Table 1. On the other hand, when the Kinect device is used in any office environment, access to the lower part of the body will inevitably be restricted due to office environment conditions. At the same time, it is clear that access to the upper part will be easier. For this reason, lower body angle values are used for labeling, while upper body angle features are used for feature extraction for classification. Since some subjects corrected their sitting positions during each sitting experiment, the angle values obtained from the skeleton point data were not at the desired values. Therefore, angle-based fuzzy decision labeling could not label these data for the determined sitting position. Different numbers of pose data were obtained for each class using time-based and fuzzy decision-based labeling. Time-based labeling is based on 30 seconds. Some subjects exhibited sitting behavior exceeding 30 seconds. Therefore, fuzzy decision-based tagging has more pose value than time-based tagging for each sitting class. 55649 and 33125 sitting body posture poses were obtained for 22 subjects in 5 classes by fuzzy decision labeling and time-based,

respectively. The fuzzy decision labeling data set has 11130, 10115, 11220, 11957, and 11227 records for the first, second, third, fourth, and fifth postures, respectively. The data set of time-based labeling has 6748, 6167, 6703, 6727, and 6760 records for the first, second, third, fourth, and fifth postures, respectively. For all classifiers, 15% of the data was used as validation and test data. The training model has been tested with data not previously used in training. Therefore, test data is entirely different from training data. To recognize sitting body posture, shallow machine learning algorithms, the most widely used in the related literature, were used, and results were evaluated with performance indicators. Although deep learning methods gradually become overwhelming, shallow classifiers remain preferred because training time is shorter than deep learning methods [20]–[22].

Classification

In order to avoid depending on the solution of a single classifier in multi-class classification problems and to optimize the classification value, more than one classifier was used in this study. KNN, AdaBoost (AB), NN, Gradient Boosting (GB), DT, Quadratic Discriminant Analysis (QDA), NB, and Random Forest (RF) classifiers were designed and used to classify sitting postures. The classification models with different parameters were optimized and evaluated for best performance. For the KNN, model flexibility parameters such as the number of neighbors, distance metric, and distance weight have been chosen as 10, Euclidean, and SquaredInverse, respectively. The number of estimators and the learning rate are 50 and 1.5, respectively, for the AB model. The classification algorithms have been selected as SAMME.R. The regression loss function has been used as exponential. The NN model has 6 inputs, 100 hidden layers, and five output layers. Data division features random training function scaled conjugate gradient (SCG), Levenberg-Marquardt optimization method, and cross-entropy are used in the networks. The activation function is tan-sig, and the error goal has been limited to 0.001 [23], [24]. The weights and biases are initialized using the Nguyen-Widrow method. The number of trees is 200, and the learning rate is 0,02 for the GB model. The depth of individual trees is 5, and subsampling instances are 1. The maximum split parameter for the DT is 100. A minimum number of instances is 4 and 6 for leaves and internal nodes, respectively. The Maximum depth is 100, and the Gini Impurity Index has been used as the splitting criterion. The covariance structure is the complete option for Quadratic Discriminant Analysis. Kernel distribution has been utilized for the NB. The number of trees and the depth of individual trees are 50 and 10 for the RF model. All models were validated through a 5-fold cross-validation process. The cross-validation was performed without data sharing between training and validation data to avoid overtraining. In order to measure the performances of each model, a multi-class confusion matrix is defined in [25]. In order to measure the performances of each model, a multi-class confusion matrix, which is defined in [25] and the ROC curve, is created, and Accuracy (A), Recall (R), precision (P), F1-

score (F), AUC (Area Under Curve), and Specificity (S) indicators are calculated to evaluate performance [25].

Results and Discussion

For the classification of body postures, confusion matrices for the models are presented in Figure 9. Both training and testing processes were performed on the same computer. When the confusion matrices are examined, it is seen that the samples are mainly classified according to their classes.

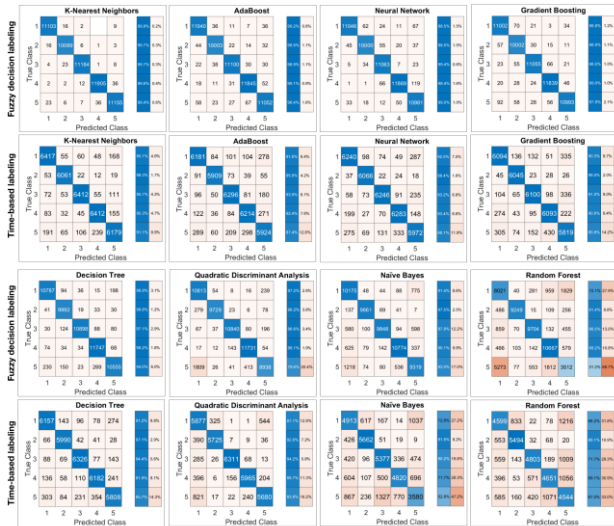


Figure 9. Confusion matrices of classifiers for datasets

It is seen that the first-class labeled samples are mainly classified as 5th class apart from their groups and vice versa for both datasets. Next, it is seen that the samples labeled as 3rd class are mainly classified as 2nd class and 5th for fuzzy decision labeling dataset, and 1st class and 5th for time-based labeling dataset, except for their groups.

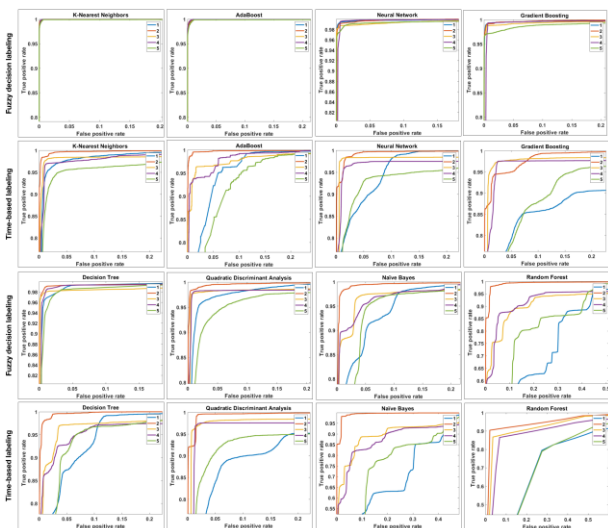


Figure 10. ROC curves of classifier

Except for their groups, the samples labeled as 4th class are mainly classified as 5th class for fuzzy decision and time-based labeling datasets. Finally, it is seen that the samples

labeled as 5th class are mainly classified as 1st and 4th class, except for their groups. The ROC curves belonging to the models with the highest accuracy values for interpreting the accuracy values are presented in Figure 10. When the ROC curves are examined, it is seen that they confirm the confusion matrix values. For example, in confusion matrices (percentage section), the RF classifier has the worst values for both data sets' first and fifth classes. Likewise, when the ROC graph is examined, it can be understood that the first (blue) and fifth (green) classes have the worst learning success for the RF classifier since these graphs are far from the (0,1) point. When the ROC graphs are examined, it is seen that the KNN, NN, AdaBoost, and GB models are very close to the upper left corner point (0,1); therefore, the ability of these models to diagnose classes fits quite well. The classifier accuracy values are given in Figure 11. The other classifier performance metrics are given in Table 3.

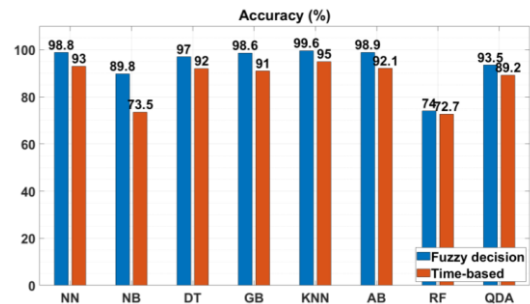


Figure 11. Classifier accuracies

When the performance of the classifiers is evaluated, if Figure 9, Figure 10, Figure 11, and Table 3 are examined, it is seen that the classification accuracy of the KNN classifier is higher than the other classifier for both two datasets. It is essential to visualize the decision-making rules of classifiers for multi-class classification problems in particular.

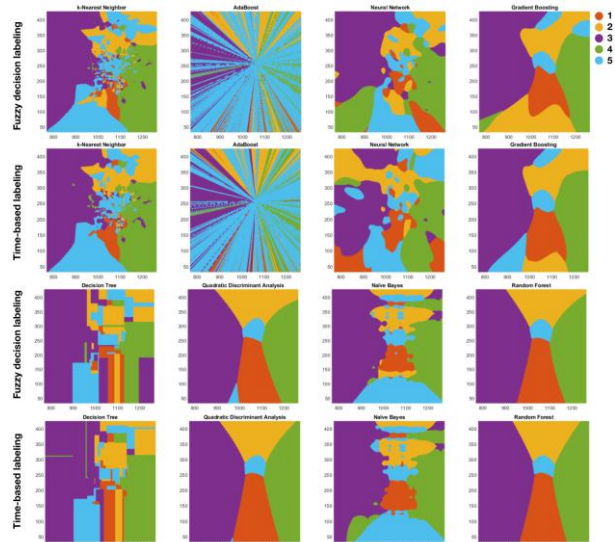


Figure 12. Classifier decision surfaces

Table 3. Classifier performance metrics

Dataset	Classifier	Accuracy	Precision	Recall	F-Score	Specificity	AUC	Train Time (seconds)	Test Time (seconds)
Fuzzy Decision	NN	98.760	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	446.94	0.235
	NB	89.808	0.89	0.89	0.97	0.93	0.89	0.452	0.078
	DT	96.999	0.97	0.97	0.97	0.99	0.98	2.014	0.009
	GB	98.638	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	416.44	0.6
	KNN	99.617	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.484	4.23
	AB	98.906	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	2.536	0.083
	RF	73.951	0.73	0.73	0.73	0.93	0.83	1.789	0.144
	QDA	93.534	0.93	0.93	0.93	0.98	0.95	2.41	0.034
Time-based	NN	93.002	0.93	0.93	0.93	0.98	0.95	56.809	0.077
	NB	73.515	0.73	0.73	0.73	0.93	0.83	0.1	0.011
	DT	91.964	0.91	0.91	0.91	0.97	0.94	1.633	0.004
	GB	91.022	0.91	0.91	0.91	0.97	0.94	109.656	0.237
	KNN	95.037	0.95	0.95	0.95	0.98	0.96	0.234	0.993
	AB	92.148	0.92	0.92	0.92	0.98	0.95	1.037	0.022
	RF	72.728	0.72	0.72	0.72	0.93	0.83	1.219	0.043
	QDA	89.232	0.89	0.89	0.89	0.97	0.93	1.35	0.014

*Green to red background: from the best to the worst

Therefore, to visualize the decision-making rules of the classifiers, artificial pose values were produced according to the minimum and maximum limits of the feature values of each class, and the models classified these. In this context, the classifiers with high classification accuracy values are expected to create more indented rule regions, and the lower ones will create less unindented rule regions. In this way, the decision surfaces presented in Figure 12 were created. When the rule areas given in Figure 12 are examined, it is seen that the most and least indented rule areas are formed by the KNN and RF classifiers for two datasets, respectively. In addition, the results of this study were compared with other studies in the literature and presented in Table 4. This study achieved a classification accuracy of over 99% and 95% by KNN for two datasets. In this context, classification accuracy values and other features obtained in studies in the relevant literature were compared with the results of this study and presented in Table 4. Dataset volume represents the total number of postures used as training and test data. The number of subjects indicates how many people were involved in experiments while the data set was created. The Joint Point is the skeleton point value used to create angular and geometric features to classify sitting positions. In Table 4, classification results and features using the datasets in this study are presented separately. When Table 4 is examined, it is seen that the highest accuracy value for the models used in both data sets was reached in this study. While there are studies in Paliyawan [6], Yao [8], and Li [9] with datasets more extensive than the dataset volume in this study, other studies used smaller-volume data. As a result, high accuracy values were obtained from studies in [6], Yao [8], and Li [9] with a larger volume than the dataset volume used. Although fewer joint points were used using the same labeling and classification method (KNN) than Bei's [10] study, higher performance was achieved. Better

classification success was achieved using fewer subjects and fewer joint points than Li's [9] study. Compared to the other study in Paliyawan [6] using the NB method, the feature set with fewer joint points and a less voluminous data set was used, and a higher accuracy value was obtained. According to the sitting posture class type, this study has more class types than studies in Paliyawan [6], Pal [7], Li [9], and Ray [3]. Therefore, higher accuracy values were obtained compared to studies with the same or lesser class types.

Conclusions and Recommendations

Developing new, low-cost, accessible technologies is an essential step towards facilitating the assessment of sitting postures as office workers sit for extended periods. In this direction, standard sitting posture has been determined within the scope of relevant medical and health studies and standards to carry out the tests of the proposed system. Using the Kinect device, the depth sensor-based 98735 sittings pose data was obtained from 22 subjects for five different sitting positions, including the standard sitting posture. A fuzzy-logic labeling and traditional time-based method with depth-based angular features for labeling the sitting pose has been proposed. After labeling, angular and geometric features were obtained in the upper body region. In order to obtain the best classification accuracy, the sitting poses dataset with the minor joint points was classified using eight classification methods. A high classification accuracy value was obtained in most of the methods. In order to determine the relationship between emotional states and sitting postures, simultaneous data can be obtained by methods such as EEG [26], [27] and emotion detection-recognition, and their similarities can be investigated.

Table 4. Comparison of studies in the related literature

Study	Accuracy	Labeling Method	Feature Method	Classifier	Joint Point	Position Classes	Dataset Volume	Subjects
Yao [8]	86.6	AC	AF	Threshold	10	5	66330	10
Xia [5]	91.5	Histogram	LDA	HMM	20	5	6220	10
Pal [7]	94.3	AC	AF	CBD	16	2	5600	20
Ray [3]	94.8	AC	Grayscale image	LDA	12	4	22226	8
This Study	95	Time-based	Angular - Geometric	KNN	5	5	33125	22
Bei [10]	95.8	AC	Local contour -topological	KNN	6	9	16200	18
Paliyawan [6]	98.2	Automatic Time-based	Statistics	NB	10	2	397800	28
Li [9]	99.1	Geometric shape calculator	Body physical features	BP NN	8	2	55080	100
This Study	99.6	Fuzzy Decision	Angular - Geometric	KNN	5	5	55649	22

LDA: Linear discriminant analysis, HMM: Hidden Markov models, CNN: Convolution Neural Network, CBD: City-Block Distance, AF: Angular Feature, AC: Angular calculation

The presentation of a depth sensor-based system prepares the infrastructure for a system that can be used in intelligent robot assistants, especially in robot vision. The system is thought to recognize sitting or other postures (bending, lifting, etc.) for those working in other fields. The proposed system is thought to be innovative and promising for detecting the sitting postures of office workers and presenting meaningful suggestions. The study proposes a new labeling process method to overcome the systems' shortcomings, which were proposed in previous studies involving joint points. The detailed results explain that this method is generalizable and can be used in joint point-based posture classification studies.

In terms of contributing to the literature, a comparison was made according to the features specified in Table 4, and it was revealed that this study is superior to other studies in the literature according to parameters such as accuracy, labeling method, feature method, classifier, joint point, position classes. Compared to the studies in the literature, it is thought that it contributes to the knowledge on the number of joint positions (provides low computational cost), the number of sitting postures class (proves the classification accuracy), and the labeling method (provides high accuracy). In addition, it is possible to mention some limitations of the system. Since the studies involving human subjects are limited to the number of volunteers participating in the experiments, it is planned to reach more people for data set expansion studies. In this direction, this study is considered a preliminary study. After the data set

expansion studies, real-time potential use and performance tests in different environments will be performed, and the results will be discussed. In this way, it will be ensured that the system can be generalized in future studies, and its effectiveness in practice will be better evaluated. Limitations of the study include the ability to classify four incorrect sitting postures other than the standard posture. In addition, as another limitation of the study, according to the trained models, other incorrect postures that are different from the incorrect postures in the study can be classified according to these incorrect postures in real-time application. In this case, a measure such as a standard sitting score can be calculated by comparing the standard sitting posture classification rate with the rate of other postures in the real-time application. Obstacles may be encountered in the natural office environment (computer, panel, light, etc.) when obtaining the joint positions used as attribute values in creating the dataset. In addition, it may be difficult to obtain joint positions for rear-facing users. This may cause the classification model created with both the algorithm and the dataset to obtain incorrect results.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

This work involved human subjects in its research. The ethics committee decision approved the methods and techniques used in this Uşak University Scientific Research and Publication Ethics Committee study dated 04.09.2020.

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

Acknowledgement

I special thank to Eren ÖNER for supporting the collect depth sensor-data of subjects during experiments.

References

- [1] "Health and safety statistics." <https://www.hse.gov.uk/statistics/> (accessed Mar. 12, 2023).
- [2] T. Borhany, E. Shahid, W. A. Siddique, and H. Ali, "Musculoskeletal problems in frequent computer and internet users," *J Family Med Prim Care*, vol. 7, no. 2, p. 337, 2018, doi: 10.4103/JFMPC.JFMPC_326_17.
- [3] S. J. Ray and J. Teizer, "Real-time construction worker posture analysis for ergonomics training," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 26, no. 2, pp. 439–455, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.AEI.2012.02.011.
- [4] O. Patsadu, C. Nukoolkit, and B. Watanapa, "Human gesture recognition using Kinect camera," *JCSSE 2012 - 9th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering*, pp. 28–32, 2012, doi: 10.1109/JCSSE.2012.6261920.
- [5] L. Xia, C. C. Chen, and J. K. Aggarwal, "View invariant human action recognition using histograms of 3D joints," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 20–27, 2012, doi: 10.1109/CVPRW.2012.6239233.
- [6] P. Paliyawan, C. Nukoolkit, and P. Mongkolnam, "Prolonged sitting detection for office workers syndrome prevention using Kinect," *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, ECTI-CON 2014*, 2014, doi: 10.1109/ECTICON.2014.6839785.
- [7] M. Pal, S. Saha, and A. Konar, "Distance matching based gesture recognition for healthcare using Microsoft's Kinect sensor," *International Conference on Microelectronics, Computing and Communication, MicroCom 2016*, Jul. 2016, doi: 10.1109/MICROCOM.2016.7522586.
- [8] L. Yao, W. Min, and H. Cui, "A new Kinect approach to judge unhealthy sitting posture based on neck angle and torso angle," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10666 LNCS, pp. 340–350, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-71607-7_30/TABLES/1.
- [9] B. Li, B. Bai, C. Han, H. Long, and L. Zhao, "Novel hybrid method for human posture recognition based on Kinect V2," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 771, pp. 331–342, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-7299-4_27/TABLES/5.
- [10] S. Bei, Z. Xing, L. Taocheng, and L. Qin, "Sitting posture detection using adaptively fused 3D features," *Proceedings of the 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, ITNEC 2017*, vol. 2018-January, pp. 1073–1077, Feb. 2018, doi: 10.1109/ITNEC.2017.8284904.
- [11] N. J. Delleman and J. Dul, "International standards on working postures and movements ISO 11226 and EN 1005-4," <https://doi.org/10.1080/00140130701674430>, vol. 50, no. 11, pp. 1809–1819, Nov. 2007, doi: 10.1080/00140130701674430.
- [12] J. Kelly, "Proper Height For Standing Desks," 2014. <https://notsitting.com/proper-height/>
- [13] J. Elliott, "How long should I stand at my standing desk? - HealthPostures," 2020. <https://healthpostures.com/how-long-should-i-stand-at-my-standing-desk/> (accessed Jun. 23, 2022).
- [14] Fondazione Ergo, "Ergonomic Assessment Worksheet," 2021. [Online]. Available: <https://www.eaws.it/>
- [15] Canadian Centre for Occupational Health & Safety, "Working in a Sitting Position -Good Body Position," 2022.
- [16] ISO, "ISO 7250-1:2017," *Basic human body measurements for technological design — Part 1: Body measurement definitions and landmarks*, 2017. <https://www.iso.org/standard/65246.html> (accessed Dec. 24, 2022).
- [17] CCOHS, "Working in a Sitting Position - Good Body Position," 2022. https://www.ccohs.ca/oshanswers/ergonomics/sitting/sitting_position.html (accessed Aug. 06, 2023).
- [18] Y.-K. Kong, S. Lee, K.-S. Lee, and D.-M. Kim, "Comparisons of ergonomic evaluation tools (ALLA, RULA, REBA and OWAS) for farm work," *International journal of occupational safety and ergonomics*, vol. 24, no. 2, pp. 218–223, 2018.
- [19] J. Vince, "Mathematics for Computer Graphics," 2022, doi: 10.1007/978-1-4471-7520-9.
- [20] J. Liu and Y. Zhang, "An Attribute-Weighted Bayes Classifier Based on Asymmetric Correlation Coefficient," *Intern J Pattern Recognit Artif Intell*, vol. 34, no. 10, Jan. 2020, doi: 10.1142/S0218001420500251.
- [21] R. K. Bania, "R-GEFS: Condorcet Rank Aggregation with Graph Theoretic Ensemble

- Feature Selection Algorithm for Classification," *Intern J Pattern Recognit Artif Intell*, vol. 36, no. 9, Jun. 2022, doi: 10.1142/S021800142250032X.
- [22] T. Hu *et al.*, "Rice Variety Identification Based on the Leaf Hyperspectral Feature via LPP-SVM," *Intern J Pattern Recognit Artif Intell*, vol. 36, no. 15, p. 2350001, Jan. 2023, doi: 10.1142/S0218001423500015.
- [23] H. Coskun and T. Yigit, "Artificial Intelligence Applications on Classification of Heart Sounds," in *Nature-Inspired Intelligent Techniques for Solving Biomedical Engineering Problems*, IGI Global, 2018, pp. 146–183.
- [24] H. Coskun, O. Deperlioglu, and T. Yigit, "Ekstra Sistol Kalp Seslerinin MFKK Öznelikleriyle Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Sınıflandırılması," *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2017*, Jun. 2017, doi: 10.1109/SIU.2017.7960252.
- [25] H. Coskun, T. Yiğit, İ. S. Üncü, M. Ersoy, and A. Topal, "An Industrial Application Towards Classification and Optimization of Multi-Class Tile Surface Defects Based on Geometric and Wavelet Features," *Traitement du Signal*, vol. 39, no. 6, pp. 2011–2022, Dec. 2022, doi: 10.18280/TS.390613.
- [26] F. Bozkurt, H. Coskun, and H. Aydogan, "Effectiveness of Classroom Lighting Colors Toward Students' Attention and Meditation Extracted from Brainwaves," *Journal of Educational And Instructional Studies*, vol. 4, no. 2, pp. 6–12, 2014.
- [27] H. Aydogan, F. Bozkurt, and H. Coskun, "An assessment of brain electrical activities of students toward teacher's specific emotions," *International Journal of Psychological and Behavioral Sciences*, vol. 9, no. 6, pp. 2037–2040, 2015.



Design and implementation of multiband microstrip antenna for energy harvesting

Muhammed SÜZGÜN¹, Mustafa CANSIZ^{2*}

¹ Dicle University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Diyarbakır, Turkey, msuzgun96@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6663-3920>

² Dicle University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Diyarbakır, Turkey, mustafa.cansiz@dicle.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2534-9770>

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 February 2024
Received in revised form 2 June 2024
Accepted 4 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Microstrip antenna, Antenna design, Multiband, RF signal, Energy harvesting

ABSTRACT

Antennas are of great importance in energy harvesting systems. It is possible to collect more energy with RF energy harvesting systems by using multiband antennas. In this study, a microstrip antenna was designed and fabricated for operation at 307 MHz, 1721 MHz, and 5447 MHz carrier frequencies. The designed multiband antenna with size of 82.05x104.76x1.60 mm³ was optimized for collecting more energy and then, implemented on FR4 substrate. Return loss, voltage standing wave ratio, and impedance of the manufactured multiband microstrip antenna were measured by vector network analyzer. The multiband antenna gain was calculated as 2.02 dBi. Furthermore, a good agreement was noted between the measurement and simulation results of the multiband microstrip antenna. As a result, it is determined that the produced multiband microstrip antenna is a useful and suitable antenna for RF energy harvesting circuits.

Doi: 10.24012/dumf.1440939

* Corresponding author

Introduction

Microstrip antenna is a type of antenna that can be produced simply, has a very low cost, suitable for planar and other surfaces, and generally used in wireless communication. Microstrip antennas are commonly utilized in radio reception and transmission systems. This can be attributed to the following reasons: They possess a low profile (their height is significantly less than the operating wavelength); their width and length are small (less than the operating wavelength). [1]-[2]. Due to the development of technology and the requirement for mobile electronic devices, the need for more compact antennas has increased. For this reason, microstrip antennas have started to come to the fore. When microstrip antennas are examined, they have proven to be very good radiators in many applications, but they have different disadvantages compared to other microwave antennas. Numerous research endeavors have focused on enhancing the bandwidth capabilities of microstrip antennas. Some modifications have been reported in the literature to improve and increase the bandwidth or gain of the

antennas. E. Levine and al. investigated radiation and losses in microstrip antennas equipped with a corporate feed network. A surface current approach is employed for the feed lines, similar to ideal transmission lines, while examining the free-field radiation and surface wave excitation of typical segments within the feed networks. An analysis was conducted on a four-element array antenna with a feed network, and the predicted radiation patterns, directivity, and gain were compared against simulation and experimental results. The gain and directivity of large arrays comprising 16, 64, 256, and 1024 elements were computed, with measurements reported in the 10-35 GHz frequency range [3]. A. Elhamraoui and al. introduced a compact dual-band and miniature microstrip antenna designed for Radio Frequency Identification (RFID) readers. This antenna was developed based on a straightforward defected ground structure employing slots in the ground plane, facilitating its fabrication significantly. The measured outcomes indicated that the achieved impedance bandwidth was 70 MHz and 490 MHz, respectively, which proved suitable for dual-band RFID applications. Furthermore, the

proposed antenna exhibited favorable radiation characteristics, offering a gain increase of 1.1 dBi at 2.45 GHz and 2.8 dBi at 5.8 GHz across two operational bands [4]. There have been several studies on the integration issues of multiband antennas, such as the Tri-band U-slot monopole antenna [5] and the Dual-band compact radiator planar antenna [6]. Modifications aimed at enhancing the antenna bandwidth have been documented in the literature. Examples of strategies explored in the literature to expand the bandwidth of microstrip antennas include the utilization of trapezoidal-shaped antennas [7], employing parasitic strips capacitively coupled to the non-radiating edges of square patch antennas [8], incorporating rectangular antennas with their radiating edges gap-coupled to quarter-wavelength short-circuited parasitic elements [9], experimenting with multilayer structures [10], implementing stagger-tuned resonators [11] as well as investigating log-periodic structures, quasi-log periodic structures, among others [12]. The coupled resonator model is an effective technique to increase antenna size, where patches can be aligned in a plane [13]-[14] or stacked vertically [15]-[16]. Currently, in addition to high-accuracy radar systems, multiband antennas are also required for the application of high data rate wireless communications, satellite navigation systems and similar systems. All these problems can be solved by designing multiband antennas. Microstrip patch antennas have become an excellent solution due to their many features and advantages such as low volume, lightness, low cost, and easy integration into systems. However, problems such as narrow bands of the antenna and low gain arise. Therefore, researchers are trying different ways to obtain a compact multiband, high-gain antenna with multiple resonant frequencies for operations in multiple frequency bands. The frequency response of the VSWR value of a microstrip antenna typically exhibits a resonance characteristic [17]. Expanding the operational bandwidth can be achieved through modifications to the antenna's design, such as altering its shape or employing complex emitter configurations. One approach involves incorporating additional passive radiators, which are excited by the current induced by the active radiator's field and connected to the coaxial line [18]. In this study, optimization was performed post the initial design phase of the microstrip antenna. This optimization process involved the modification of the patch by trimming its edges, reducing the ground plane, and puncturing holes in the antenna's patch. Producing a multiband antenna and adjusting the operating bands of this antenna according to the operating frequencies

of the RF energy harvesting circuit can enable this antenna to be used for RF energy harvesting.

RF energy harvesting

Electromagnetic energy within the vicinity of the harvesting antenna is dispersed across different spectral bands. The useful frequency band or bands are determined by spectral measurements. According to the measurement results, single-band, multi-band or wide-band antenna designs may be suitable for use in RF energy harvesting systems. Single-band antennas are easy to design and manufacture but may collect less energy than multi-band antennas. Moreover, in the scenario where the energy harvesting circuit is tailored to accommodate multiple frequency bands, it results in an elevation of the output DC voltage level of the RF energy harvester. While a wideband antenna proves to be efficient in collecting power across a broad frequency spectrum, it's noteworthy that antenna gain experiences a reduction as the distance from the central frequency increases [19].

Microstrip antennas

Microstrip antennas, which have become increasingly common recently, are used in many areas. Aircraft and planes, radar systems, satellite communications and remote technologies can be counted as some of these. Another reason why microstrip antennas are preferred is that they are especially suitable for printed circuit technology. These antennas possess a compact design, rendering them appropriate for application on both flat and curved surfaces. Additionally, their fabrication is straightforward and economical, leveraging contemporary printed circuit technology. Additionally, they exhibit mechanical robustness when mounted on hard surfaces and are compatible with MMIC designs. Moreover, the incorporation of structures such as pins and varactor diodes between the patch and the base conductor (ground) enables the design of adaptive elements with variable resonance frequency, impedance, polarization, and pattern [20]. In addition to their benefits, microstrip antennas exhibit several drawbacks. These include low efficiency, limited power handling capability, high quality factor, suboptimal polarization characteristics, inadequate scanning performance, and a notably narrow frequency bandwidth [20].

Microstrip antenna consists of two layers: a conductor, such as copper or gold, and an insulator, such as Rogers or FR4. The upper part is in the form of a patch with length L and width W , the lower part

represents the ground surface, and between them is the electrical insulator with a thickness.

Microstrip antenna patch geometries

When designing microstrip antennas, products with low dielectric conductivity and thick insulating base materials are preferred. These materials allow for high performance microstrip patch antennas. The radiation needed in the antenna is provided with high bandwidth and efficiency, but large patch sizes limit the radiated areas less. On the other hand, it is observed that as the relative permittivity increases, there is a decrease in the efficiency and radiation pattern of the antenna. For all these reasons, the dimensions of the antenna directly affect the performance and other parameters of the antenna [21].

Feeding methods of microstrip antenna

Microstrip patch antennas are fed using various feeding techniques [22]. Among the most common and frequently mentioned in the literature are coaxial feeding, feeding via microstrip transmission line (including inset feed, quarter wave transmission line, and edge feed), aperture coupled feeding, proximity coupled feeding, and coplanar waveguide feed. Suitability of the feeding method to the application method is also very important. Some feeding methods depend on many different parameters. Optimum selection of these parameters ensures optimum performance. Considering all these, feeding methods affect the input impedance and antenna characteristics and stand out as an important design parameter [22].

Analysis models of microstrip antenna

A microstrip antenna consists of a two-dimensional radiating conductive patch embedded in a thin insulating material, thus qualifying as a two-dimensional planar element for analytical purposes. Analysis of microstrip antennas typically involves models based on equal magnetic current distribution at the edges of the patch. There are various models available for analyzing microstrip antennas, with the most important and commonly utilized ones outlined below [23] :

- Transmission Line Model
- Cavity Model
- Full Wave Model

The simplest and therefore most widely used of these models is the transmission line model. This model

can also enable the analysis of the physical structure of the antenna. However, the standard error rate and accuracy are higher than other methods and this method may be incomplete in modeling coupling structures. Gap model has higher accuracy compared to transmission line model [23] but it is more complex. In addition to all these, it is more successful in physical analysis such as transmission line model, but this method is incomplete in modeling coupling structures. When all models are evaluated, the model with the most accuracy is the full wave model [23]. The full wave model can be applied to single-piece structures, as well as to finite and infinite antenna arrays, antennas of arbitrary shapes and coupling structures. However, this model is also complex and lacking in physical analysis [24].

Material and method

In this section, the required calculations for the antenna design were made and the HFSS Ansys program was used for simulation. Then, the designed antenna was produced. The parameters of the fabricated antenna were measured using a Vector Network Analyzer (VNA), followed by a detailed analysis of the obtained results.

Microstrip antenna design

The microstrip antenna configuration features two slits separated by a transmission line of length L , with open-circuited ends. Voltage across the width of the patch reaches its maximum, while current is minimized due to the open-ended structure.

To ensure operation in the fundamental mode, the patch length should be slightly less than $\lambda/2$, where λ represents the wavelength in the dielectric medium and is calculated as $\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{reff}}$, with λ_0 being the wavelength in the gap. Eq. 1 can be utilized to determine the patch width (W) [25].

$$W = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Here;

c : Speed of light in space

f_r : Operating frequency

ϵ_r : Relative permittivity

Since all the electric fields from the patch return to the insulator, some of these fields return to the insulator after passing through the air and hence, there will be a small difference in the relative permittivity. The effective relative permittivity (ϵ_{reff}) is the relative permittivity in an insulator that takes into account the relative permittivity of air.

The ϵ_{reff} equation is given as follows [26]

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right] \quad (2)$$

Here;

ϵ_r : Relative permittivity

W: Patch width

h: Insulating material thickness

As the electric field lines propagate through the air, the patch length elongates on both sides. This increase in length, represented by ΔL , can be calculated using the following equation:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

The effective length, denoted as L_{eff} can be computed using the following equation [24] :

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (4)$$

Consequently, the patch's precise length can be computed using Eq. 4 [24]:

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (5)$$

When designing a microstrip antenna with a rectangular patch shape, first the substrate material with relative permittivity ϵ_r , thickness h, and resonance frequency f_r in Hz is selected. In the next step, the dimensions of the antenna are determined according to the desired carrier frequency, that is, the width W and length L of the patch must be determined. At the same time, the feeding method to be used must also be selected. In this study, FR4 epoxy was used as a substrate with relative permittivity $\epsilon_r=4.3$ and thickness $h=1.55$ mm. On the other hand, copper was chosen as the conductive material to create the patch and soil surface and the microstrip line feeding method was used. In addition, the designed antenna is required to operate at the carrier frequency of 879.5 MHz. The dimensions of the antenna patch are calculated as follows:

Step 1: The following equation is used to determine the width of the patch on the antenna [25]

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Here, W is the width of the patch, c (3×10^{11} mm/s), f_r (879.5 MHz) is the operating frequency, and ϵ_r (4.3) is the relative permittivity. For these values, the width of the patch was calculated as ($W=104.76$ mm)

Step 2: The effective relative permittivity ϵ_{reff} was determined as ($\epsilon_{\text{reff}}=4.170$) by Eq. 2 [26]

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right] \quad (2)$$

Step 3: From Eq. 3 [26], the incremental length produced by the side fields was calculated as ($\Delta L=0.886$).

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

Step 4: L_{eff} the effective length of the patch was calculated with Eq. 4 [24], then the actual length of the patch was obtained as $L=82.05$ mm using Eq. 5 [24].

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (4)$$

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (5)$$

Bandwidth enhancement techniques

The most significant drawback of microstrip antennas is their narrow bandwidth, typically ranging from 2% to 5%. Consequently, extensive research has been conducted to develop various techniques aimed at expanding the bandwidth of microstrip antennas. The primary objective of these techniques is to address the inherent bandwidth limitation caused by the small electrical volume occupied by the antenna element. Most of these techniques fall into two categories: those utilizing an impedance matching network and those employing parasitic elements [21]. In both scenarios, the double-tuning effect is frequently employed. One method for enhancing the bandwidth of microstrip antennas involves using a thick patch with low dielectric constant in conjunction with a stub tuning network. However, when the matching network is situated in the same plane as the antenna structure, spurious radiation from the matching network can pose a

challenge. The bandwidth of the antenna element is typically governed by impedance variations. Consequently, designing a planar impedance matching network is often feasible to enhance the bandwidth. It's worth noting that the pattern bandwidth is generally much superior to impedance bandwidth. In this manner, bandwidths of 9% to 12% [27] and 15% [28] have been attained for probe-fed and microstrip line-fed elements. Furthermore, a bandwidth of 13% was achieved for the proximity-coupled patch element with the stub tuning network. If the matching network is in the same plane as the antenna element, spurious radiation from the matching network can be a problem. It has been said that when the matching network and the antenna element are in the same plane, radiation from the matching network may be a problem. Therefore, increased bandwidth can be produced by different technic, using a more complicated element shape and using parasitically coupled elements to create a double-tuned resonance. This is best achieved using two stacked patches. Bandwidths ranging from 10% to 20% have been successfully attained using probe-fed stacked patches [29], while aperture-fed stacked patches have demonstrated bandwidths between 18% and 23% [30], [31].

In line with the principles of broadband antenna design, the process of etching slots onto the radiation patch has been recognized as a viable method to broaden the bandwidth and improve matching characteristics. Consequently, the development of novel antenna designs often includes incorporating fractal slots onto the rectangular radiating patch [32].

In the study conducted by Yanyan Shi and colleagues, it was observed that the length of the ground plane (L_g) has a significant impact on the performance of the proposed antenna. An investigation into the variation of L_g was conducted in their microstrip antenna design. It was found that both the bandwidth and reflection coefficient of the proposed antenna are substantially affected by changes in L_g . As L_g increases, the antenna's bandwidth gradually decreases [32].

Modeling and simulation

In this study, the microstrip antenna design was carried out utilizing the HFSS program [33]. The dimensions of the microstrip antenna were set to $\epsilon_r = 4.3$ and $h = 1.55$ mm. The patch width was determined as 104.76 mm, and the patch length was set to 82.05 mm, optimized for the 879.5 MHz carrier frequency band. A rectangular microstrip antenna with line feeding method was designed. The final design of the antenna was made by optimizing the

dimensions of the patch, feed line and other parameters to find the best value. However, it was necessary to make some adjustments in order to achieve the best results and increase the number of bands and bandwidth of the antenna. As mentioned in previous studies, it was observed that opening slots on the patch and making different arrangements on the patch were effective in increasing the bandwidth and number of bands of the antenna. Based on this, in order to increase the number of bands and bandwidth of the antenna, two triangles were symmetrically cut from the upper right and left corners of the patch, and two triangles were symmetrically cut from the lower right and left edges. Then, a circle with a radius of 15 mm was cut in the middle of the patch. To further optimize the antenna, two more semicircular segments of 15.85 mm radius were cut from the lower right and left edges. All these were not sufficient for the optimization of the antenna, and then some changes were made in the design for optimization purposes by reducing the ground surface. The front and rear views of the antenna designed with the support of HFSS software are shown in Fig. 1 and Fig. 2, respectively. This has led to improving the return loss, increasing the frequency bandwidth and number of bands, and eliminating undesirable frequencies. Additionally, antenna efficiency has also increased.

The characteristics of the designed antenna are detailed in Table 1.

Table 1. Designed microstrip antenna parameters.

Parameter	Value
Operating Frequency (f_r)	879.5 MHz
Relative Permittivity (ϵ_r)	4.3
Insulating Material Thickness	1.55 mm
Patch Width (W_p)	104.76 mm
Patch Length (L_p)	82.05 mm
Width of Feed Line (W_f)	4.8 mm
Length of Feed Line (L_f)	28.98 mm
Width of Ground Surface (W_g, W_s)	116 mm
Length of Ground Surface (L_g)	9 mm

Length of Material (L_s)	100 mm
Radius of Central Circle (R_a)	15 mm
Radius of Side Circles (R_b)	15.85 mm
Distance Between Center Circle to L_p (x)	52.38 mm
Distance Between Center Circle to W_p (y)	21.25 mm
Length of (E_a)	33.26 mm
Length of (E_b)	20.51 mm
Length of (E_c, E_d)	15.85 mm
Length of (E_p)	52.38 mm

The front and back views of the microstrip antenna designed with the HFSS program are shown below in Fig. 1 and Fig. 2.

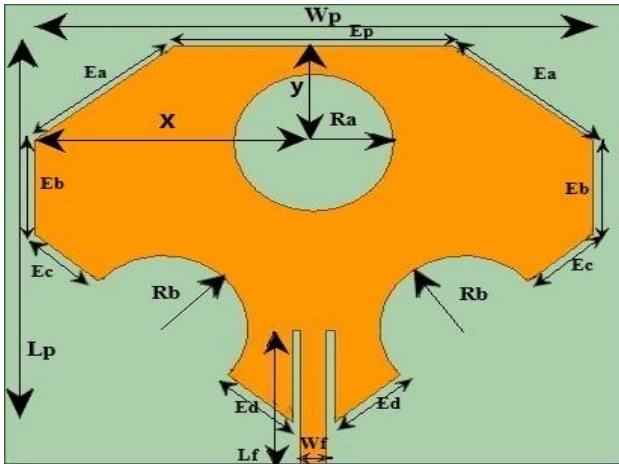


Fig. 1. Front view of the designed antenna

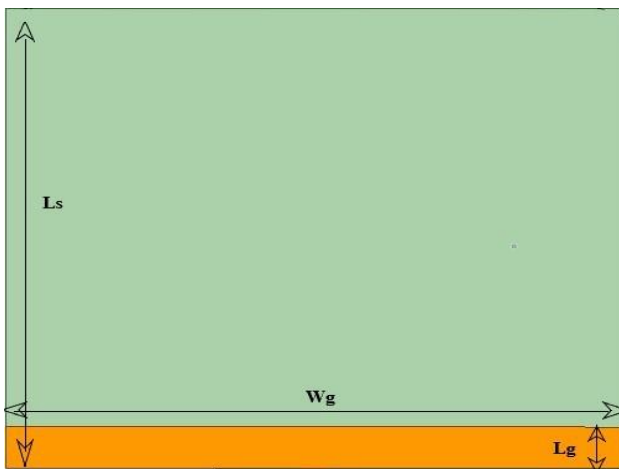


Fig. 2. Back view of the designed antenna

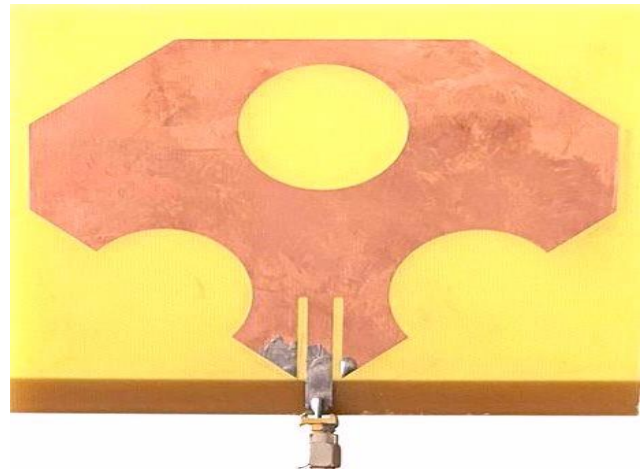


Fig. 3. Front view of the produced antenna

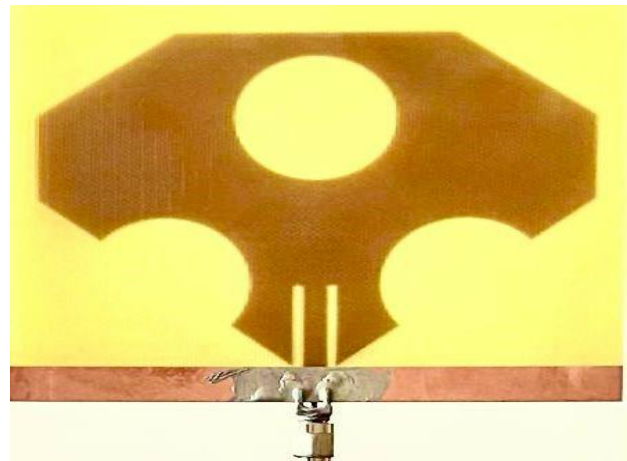


Fig. 4. Back view of the produced antenna

The rectangular microstrip antenna shown in Fig.1 and Fig. 2. was designed using the HFSS Ansys program [33]. Then, this antenna was printed in DFX format using the PCB layout program and produced as seen in Fig. 3. and Fig. 4. using FR4 substrate material.

In this study, VNA which measures in a wide spectrum, was used to measure the S parameters and other parameters. The VNA processes transmitted and reflected waves from a network to show input impedance, RL, VSWR and many other network characteristics. It uses a mathematical error correction/calibration technique. The offering unparalleled performance in a handheld solution for two-port, two-way measurements, this type of device can make very precise circuit measurements even at microwave frequencies [34].

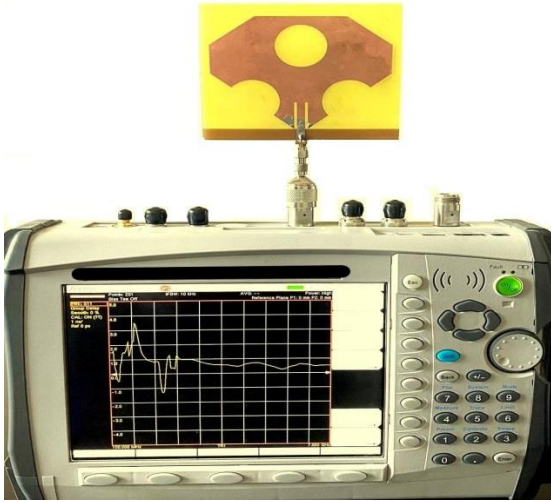


Fig. 5. Vector network analyzer

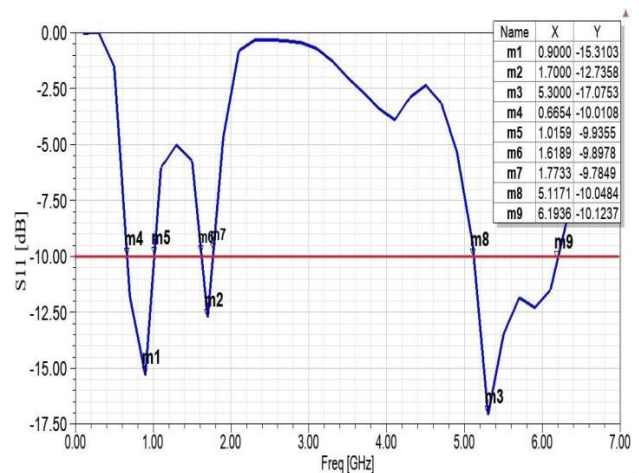


Fig. 6. S11 graph and bandwidths of the designed antenna

Results and discussion

In this study, a microstrip antenna intended to operate in more than one band was designed with the HFSS program. After the antenna design phase, it was manufactured on a low-profile FR4 substrate. The microstrip antenna underwent measurements using a Vector Network Analyzer (VNA), and these measured results were then compared against the simulated data.

Simulation results

S parameter (S11)

In this study, it is seen that the designed antenna operates in three different bands. Upon examining the graph, it is observed that the antenna operates at carrier frequencies of 900 MHz, 1700 MHz, and 5400 MHz. Fig.6. shows the operating frequencies and bandwidths of the antenna in detail. Accordingly, the bandwidth in the first operating band is seen as 350 MHz. When we look at the second bandwidth, it is seen as 154 MHz and finally, the bandwidth of the third band is 1.076 GHz.

The return loss graph of the antenna is seen below in Fig. 6. The return loss of the first band was measured as -15.31 dB at 900 MHz frequency, the return loss of the second band was measured as -12.73 dB at 1.7 GHz frequency band, and the return loss of the third band was measured as -17.07 dB at 5.3 GHz frequency band.

Voltage standing wave ratio (VSWR)

VSWR value is a very important parameter after the microstrip antenna design phase is completed. Looking at the VSWR graph in Fig. 7, the VSWR value is 3.01 at 0.90 GHz, which is the first operating band of the antenna. When we look at the 1.70 GHz frequency band, which is the second operating band of the antenna, the VSWR value is 4.08 and at the 5.3 GHz frequency band, it is 2.44.

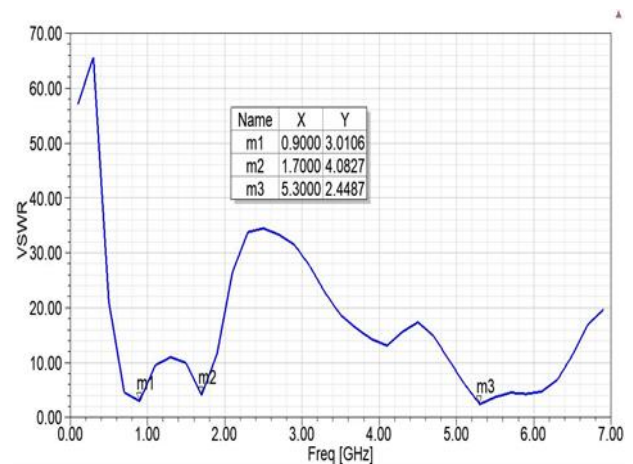


Fig. 7. VSWR graph of the designed antenna

Impedance

Fig. 8 shows the real and imaginary impedance values of the microstrip antenna. Considering the standard 50 Ω , it can be seen in the graph that there is 67.57 Ω at the 0.90 GHz frequency value at point m1, 37.66 Ω in the 1.7 GHz frequency band at point m2, and 47.91 Ω in the 5.3 GHz frequency band.

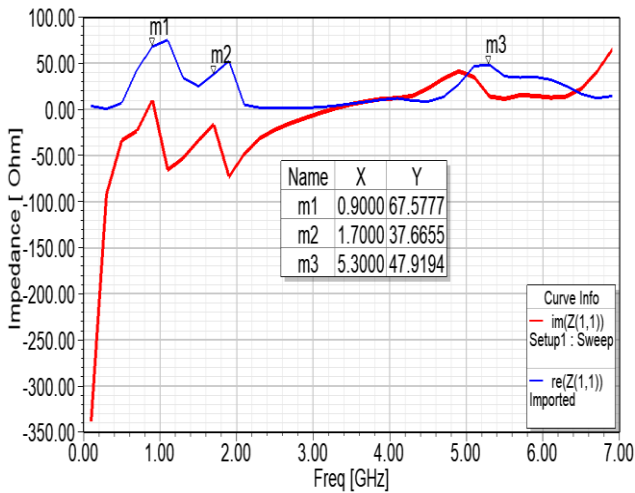


Fig. 8. Impedance graph of the designed antenna

Radiation pattern

Another important parameter of the microstrip antenna is the radiation pattern as shown in the graph below. The radiation pattern of the antenna is plotted at the initial frequency of 879.5 MHz, which is selected as the initial design frequency of the antenna. It is shown in the E plane in Fig. 9. and in the H plane in Fig. 10. The omnidirectional nature in the H-plane suggests that the antenna possesses effective reception capabilities, advantageous for gathering RF energy in space. Moreover, a symmetrical radiation pattern is formed both vertically and horizontally in the H-plane.

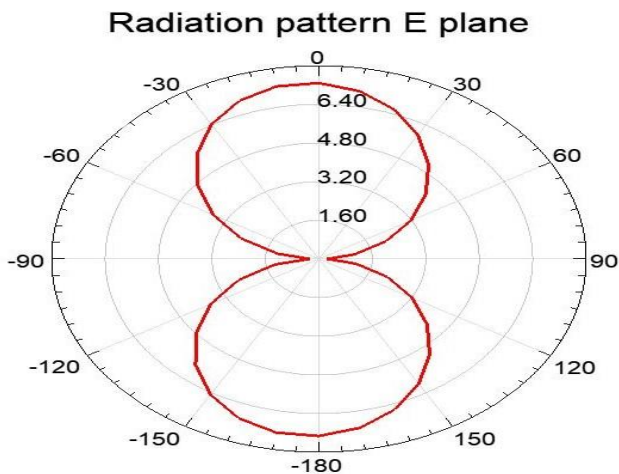


Fig. 9. Radiation pattern E plane

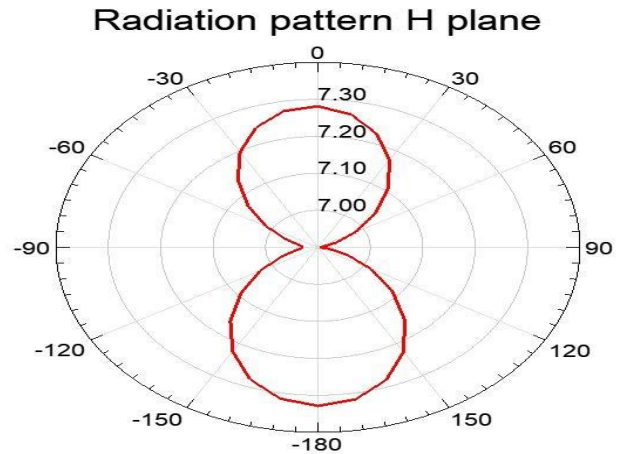


Fig. 10. Radiation pattern H plane

Directivity and gain

The gain and directivity graphs of the microstrip antenna are shown in Fig. 11. The maximum gain and directivity values of the antenna are obtained as 2.02 dBi and 2.33 dBi, respectively at 5300 MHz.

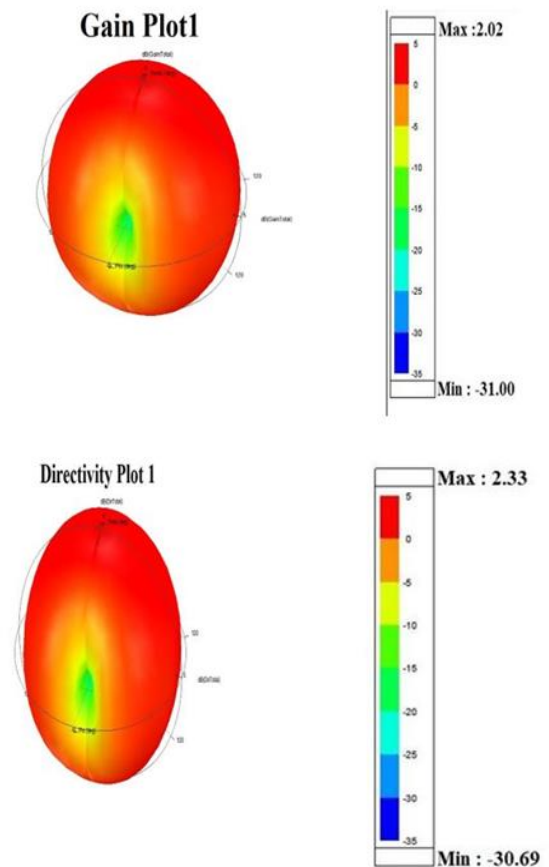


Fig. 11. 3D polar plot gain and directivity of the designed antenna

Comparison of simulation with measurement results

In this study, some parameters of the microstrip antenna were measured by VNA. Then, when the results obtained during the simulation process were compared with the measurement values, the following graphs were obtained.

S parameter

Fig. 12. shows the S parameter graph of the produced microstrip antenna. The m1, m2 and m3 values represent the lowest values of measured return loss. On the other hand, m1, m2 and m3 values are the lowest values of the simulation return loss. The return loss of the first band was simulated as -15.31 dB at 900 MHz frequency, the return loss of the second band was simulated as -12.73 dB at 1.7 GHz frequency band, and the return loss of the third band was simulated as -17.07 dB at 5.3 GHz frequency band.

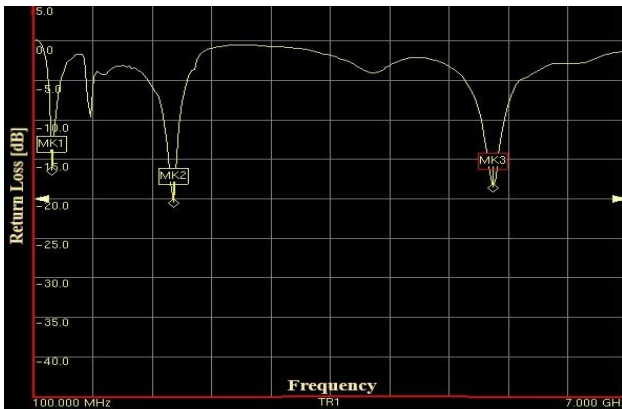


Fig. 12. Measurement result of return loss

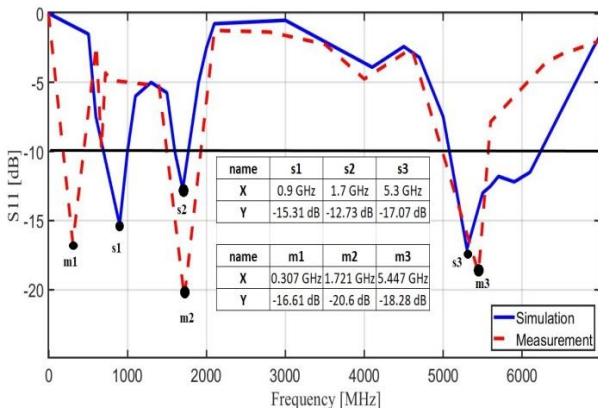


Fig. 13. Comparison of simulation with graphs

When the measurement results of the produced antenna are analyzed, it is seen that return loss values are -16.61 dB in the 307 MHz frequency band in the first marker (m1), -20.60 dB in the 1721 MHz frequency band in the second marker (m2), and -18.28 dB in the 5447 MHz frequency band in the third marker (m3), respectively.

First of all, when we look at the graphs, it can be seen that the curves are generally very similar to each other. Unlike the simulation results, it is seen that the produced antenna operates in four bands. The 307 MHz frequency band was not visible in the simulation results. On the other hand, the 900 MHz frequency band that appeared in the simulation could not fall below -10 dB according to the measurement results. But it is very close. In this respect, there is a difference between the simulation and measurement results. This difference may be due to various reasons, such as small changes in the relative permittivity of the material used, as well as small errors in antenna dimensions or simple manufacturing errors. But, in summary, with the addition of the 307 MHz frequency band, this can be considered a good result since we aim to design a multiband antenna.

Impedance

Below you can see the measurement results of the antenna's impedance values in Fig. 14.

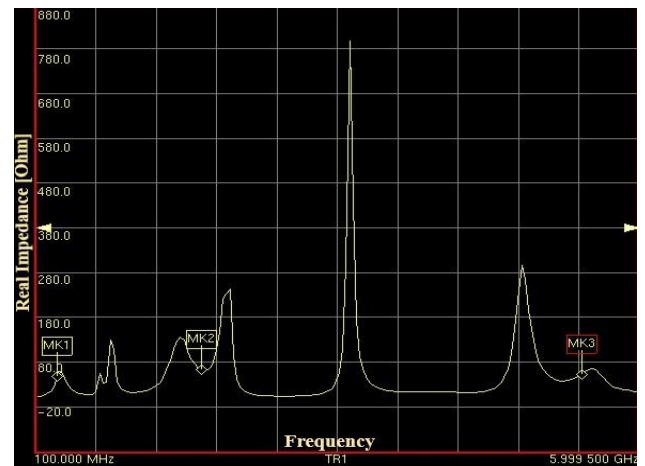


Fig. 14. Measurement result of the real impedance

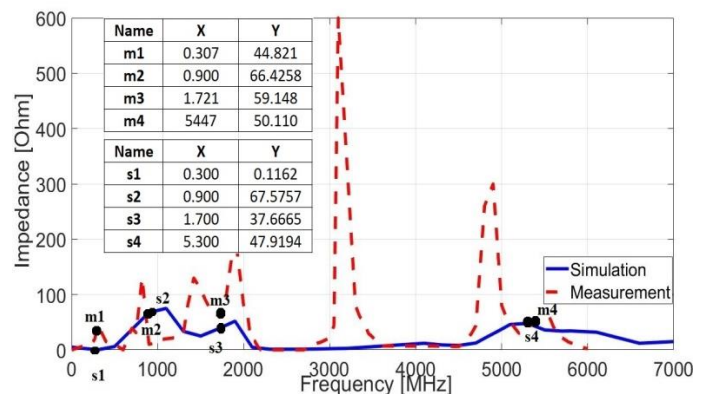


Fig. 15. Comparison of simulation and measurement graphs of impedance

If an antenna is mismatched, power loss can significantly increase because the power generated by the source will be reflected. Input impedance, a criterion related to power, plays a critical role in

determining the power received by the antenna. Therefore, input impedance is an important parameter to consider for ensuring the maximum power transmission from the source to the antenna. Ideally, the input impedance should match the impedance generated by the source [35].

The impedance value in the 307 MHz frequency band, which is not in the simulation but appears in the measurement, was measured as 44.821Ω , the real impedance in the 900 MHz frequency band was measured as 66.4258Ω , the real impedance in the 1721 MHz frequency band was measured as 59.148Ω , and the real impedance in the 5447 MHz frequency band was measured as 50.110Ω .

VSWR values

When looking at the VSWR values, it can be seen that the graphic curves of the simulation results and measurement results are almost similar. On the other hand, it is seen that there are some differences at the VSWR values in the frequency bands. When the simulated antenna is later manufactured, small differences are observed between many parameters of the simulated and manufactured antenna. These differences are usually due to manufacturing errors. If we recall the previous simulation results; at 0.90 GHz, which is the first operating band of the antenna, the VSWR value was 3.01. When we look at the 1.70 GHz frequency band, which was the second operating band of the antenna, the VSWR value was 4.08. In the 5.3 GHz frequency band, it was 2.44. Accordingly, the VSWR value in the 307 MHz frequency band is seen as 1.38. Secondly, in the 1721 MHz frequency band, this value is 1.21. The VSWR value in the 5447 MHz frequency band was measured as 1.26. When considering the simulation value of VSWR, it is 3.01 at 0.90 GHz, which is the first operating band of the antenna. 1.70 GHz frequency band, which is the second operating band of the antenna, the VSWR value is 4.08 and when we look at the 5.3 GHz frequency band it is 2.44.

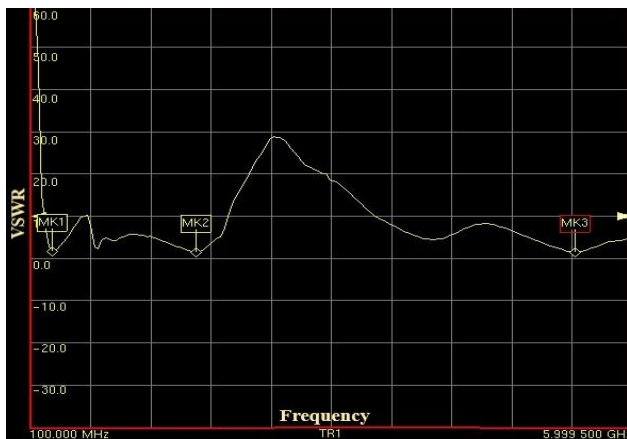


Fig. 16. Measurement result of VSWR

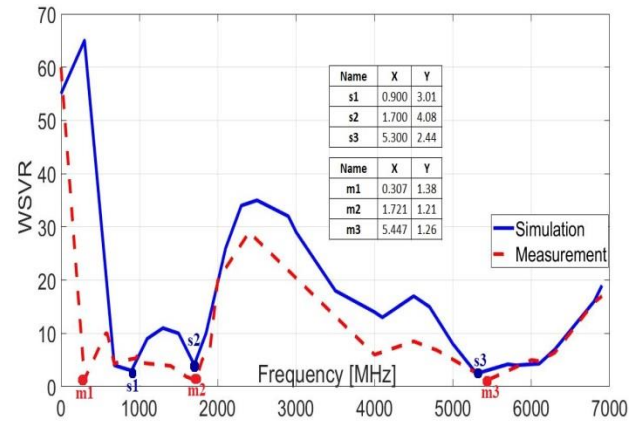


Fig. 17. Comparison of simulation and measurement graphs of VSWR

H. Yousefaalturk and at al. designed a microstrip antenna for RF energy harvesting circuit in the 915 MHz frequency band in 2022. In this study, it was observed that the antenna operated within the frequency range of 830 MHz to 1040 MHz, with a measured bandwidth of 210 MHz [36]. Our designed antenna has several advantages over this antenna. Firstly, our antenna has bandwidths of 350 MHz in the first band, 154 MHz in the second band, and up to 1071 MHz in the third band. Additionally, since our antenna is multi-band and has a wider bandwidth, it can be easily used in many applications. In 2023, Hüseyin Aslan and at al. conducted research on microstrip antenna designs for RF energy harvesting. Several antenna designs were explored in the study. The initial microstrip antenna design operates in the frequency bands of 2300 MHz to 2450 MHz, with a measured bandwidth of approximately 150 MHz. Subsequently, the designs were optimized, and the best-performing design operated in the frequency bands of 2353 MHz to 2446 MHz, with a measured bandwidth of approximately 90 MHz [37]. Compared to the antenna we designed; our design has yielded much better results in terms of bandwidth. Additionally, our antenna, which operates in different frequency bands, also provides advantages for use in various fields.

Conclusions

In this study, a multiband microstrip antenna was designed and then, implemented. The design process for the microstrip antenna commenced with the calculation of dimensions for both the patch and ground. Subsequently, techniques such as opening slots on the patch, and shortening the ground surface (Lg), as mentioned in the literature, were employed to increase the bandwidth and number of bands, aiming to optimize the antenna for our study. The optimization steps were performed intuitively. The ground surface has been reduced to 9 mm to increase

bandwidth and eliminate the undesired frequencies. The ground surface length of 9 mm provided the best bandwidth. Then, triangular pieces were cut from the four edges of the patch and semicircular pieces were cut on the lower right and left edges. Finally, the microstrip antenna, whose dimensions were calculated and optimized, was simulated with the support of the software program.

This triple band microstrip antenna operates at the carrier frequencies of 307 MHz, 1721 MHz and 5447 MHz. In this respect, it is a suitable antenna for triple band RF energy harvesting. When considering the parameters such as return loss, real and imaginary impedances and VSWR values of the produced microstrip antenna, it is seen that there is a good agreement between the simulation and measurement results.

Acknowledgement

This research was supported by Dicle University Scientific Research Projects (Project Number: MÜHENDİSLİK.23.013).

References

- [1] B. S. Kranth, G. K. Dilip, and K. Bhagath Kumar, "Planar Patch Antenna for 2.4 GHz Wireless Applications," Ver. II, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) e-ISSN: 2278-2834, p- ISSN: 2278-8735. Volume 9, Issue 3, Ver. II (May - Jun. 2014), PP 61-64 www.iosrjournals.org. doi:10.9790/2834-09326164.
- [2] J. A. Ansari, P. Singh, S. K. Dubey, R. U. Khan, and B. R. Vishvakarma, "H-shaped stacked patch antenna for dual band operation," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 5, pp. 291–302, 2008, doi: 10.2528/pierb08031203.
- [3] E. Levine, G. Malamud, and D. Treves, "A study of microstrip array antennas with the feed network," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 37:4 (1989).
- [4] A. Elhamraoui, E. Abdelmounim, J. Zbitou, H. Bennis, and M. Latrach, "A new design of a microstrip antenna with modified ground for RFID applications," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 44–51, 2018, doi: 10.22266/IJIES2018.1231.05.
- [5] H. F. Abutarboush and A. Shamim, "Paper-based inkjet-printed tri-band U-slot monopole antenna for wireless applications," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 11, pp. 1234–1237, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2223751.
- [6] X. L. Sun, L. Liu, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "Dual-band antenna with compact radiator for 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN applications," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 60, no. 12, pp. 5924–5931, 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2211322.
- [7] G. Kumar and K. C. Gupta, "Trapezoidal shaped microstrip antennas for wider bandwidth and beamwidth," *Int. Conf. Commun. Circuits and Syst., Calcutta (India)*, p. 7, Dec. 1981.
- [8] D. H. Schaubert and F. G. Farrar, "Some conformal printed circuit antenna designs," in *Proc. Workshop Printed Circuit Antennas, New Mexico State Univ.*, vol. 1-, pp. 5.1-5.21, Oct. 1979.
- [9] C. Wood, "Improved bandwidth of microstrip antennas using parasitic elements," *Proc. Inst. Elec. Eng., MOA*, vol. 127, no. 4, pp. 231–234, Aug. 1980.
- [10] P. S. Hall, C. Wood, and C. Garrett, "Wide bandwidth microstrip antennas for circuit integration," *Electron. Lett.*, vol. 15, no. 15, pp., " *Electron. Lett.*, vol. 15, no. 15, pp. 458–460, Jul. 1979.
- [11] J. H. Poes, Vandensande, and Van de Capelle, "Broadband microstrip resonator antennas," in *IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp. Digest*, pp. 268–271, 1978.
- [12] H. Poes et al., "Wideband quasi-log-periodic microstrip antenna," *Proc. Inst. Elec. Eng., MOA*, vol. 128, no. 3, pp. 159–163, Jun. 1981.
- [13] G. Kumar and K. C. Gupta, "Broad-Band Microstrip Antennas Using Additional," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 32, no. 12, pp. 1375–1379, 1984.
- [14] S. H. Wi, Y. S. Lee, and J. G. Yook, "Wideband microstrip patch antenna with U-shaped parasitic elements," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 55, no. 4, pp. 1196–1199, Apr. 2007, doi: 10.1109/TAP.2007.893427.

- [15] S. D. Targonski, R. B. Waterhouse, and D. M. Pozar, "Design of Wide-Band Aperture-Stacked Patch Microstrip Antennas," 1998.
- [16] Nasimuddin and Z. N. Chen, "Wideband microstrip antennas with sandwich substrate," *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 2, no. 6, pp. 538–546, 2008, doi: 10.1049/iet-map:20070284.
- [17] R. Z. Wu, P. Wang, Q. Zheng, and R. P. Li, "Compact CPW-fed triple-band antenna for diversity applications," *Electron Lett*, vol. 51, no. 10, pp. 735–736, May 2015, doi: 10.1049/el.2015.0466.
- [18] B. R. Piper and M. E. Bialkowski, "Electromagnetic modeling of conformal wideband and multi-band patch antennas by bridging a solid-object modeler with MoM software," *IEEE Antennas Propag Mag*, vol. 46, no. 5, pp. 42–52, Oct. 2004, doi: 10.1109/MAP.2004.1388825.
- [19] M. Cansiz, D. Altinel, and G. K. Kurt, "Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review," *Energy*, vol. 174. Elsevier Ltd, pp. 292–309, May 01, 2019. doi: 10.1016/j.energy.2019.02.100.
- [20] B. Dökmetaş, "5G Uygulamaları için DGS Kullanılarak Mikroşerit Yapıların Analizi Doktora Tezi," Ankara, Dec. 2021.
- [21] D. M. Pozar, "Microstrip Antennas Invited Paper Proceedings of the IEEE," Jan. 1992.
- [22] J. R. James and P. S. Hall, "Handbook of Microstrip Antennas," London, 1988.
- [23] İ. Ataş, "Yüksek Kazançlı Mikroşerit Antenlerin HFSS ile Modellenmesi ve Tasarımı Doktora Tezi," Dec. 2019.
- [24] R. Gang, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook," 2001.
- [25] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory and Analysis Design Third Edition*. 2005.
- [26] Yi Huang and Kevin Boyle, "Antennas From Theory To Practice," 2008.
- [27] H. F. Pues and A. R. Van de Capelle, "An Impedance matching technique for increasing the bandwidth of microstrip antennas.," *IEEE Trans. Antennas Propagat*, pp. 1345–1354, 1989.
- [28] J. J. Schuss, J. D. Hanfling, and R. L. Bauer, "Design of wideband patch radiator phased arrays in IEEE Antennas Propagation Symp. Dig.," 1989.
- [29] A. Sabban, "A new broadband stacked two-layer microstrip antenna in IEEE Antennas and Propagation Symp.," 1983.
- [30] C. H. Tsao, Y. M. Hwang, F. Kilburg, and F. Dietrich, "Aperture-coupled patch antennas with wide-bandwidth and dual polarization capabilities," in *IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig.*, pp. 936-939, 1988.
- [31] A. Ittipiboon, B. Clarke, and M. Cuhaci, "Slot-coupled stacked microstrip antennas," *IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig.*, pp. 1108–1111, 1990.
- [32] Yanyan Shi, Jianwei Jing, Yue Fan, Lan Yang, Yan Li, and Meng Wang, "A novel compact broadband rectenna for ambient RF energy harvesting," *International Journal of Electronics and Communications*, pp. 264–270, Aug. 2018.
- [33] "HFSS Ansys. Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>".
- [34] "Anritsu MS2028C. Accessed: Oct. 9, 2023. [Online]. Available: https://www.anritsu.com/en-US/test_measurement/products/ms_2028c".
- [35] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, "Antenna Fundamentals and Definitions," *New York: John Wiley & Sons, Inc*, 1998.
- [36] H. Yousefalturk and M. Cansiz, "Design and implementation of microstrip antenna at 915 MHz carrier frequency for RF energy harvesting," *Dicle University Journal of Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 531–538, Sep. 2022, doi: 10.24012/dumf.1150600.
- [37] H. Aslan, "RF Enerji Hasatlama İçin Mikroşerit Anten Tasarımı Uygulamaları Yüksek Lisans Tezi," Batman, Nov. 2023.



Beton çatlakların derin öğrenme tabanlı semantik segmentasyonunda kodlayıcı değişkenlerinin karşılaştırmalı analizi

Comparative analysis of encoder variants in deep learning-based semantic segmentation of concrete cracks

Hasan Polat^{1*}, Serhat Alpergin², Mehmet Sıraç Özerdem³

¹ Bingöl Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, hasanpolat@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5535-4832>

² Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, serhatalpergin@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7780-772X>

³ Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, sozerdem@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9368-8902>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Nisan 2024
Revizyon 1 Ağustos 2024
Kabul 15 Ağustos 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Semantik Segmentasyon, Derin Öğrenme, Görüntü İşleme, Çatlak Tespiti, Çatlak Segmenasyonu, Yapı Denetimi

ÖZ

Depremler, seller ve yangınlar gibi doğal afetler akabinde yapılarda ve kentsel altyapıda ciddi hasarlar meydana gelmektedir. Çatlaklar, beton yapılarda meydana gelen hasarların veya bozulmaların en yaygın belirtileri olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla, çatlak kusurlarının erken ve doğru bir şekilde tespit edilmesi, bu tür yapıların güvenliklerinin sağlanması ve hizmet süreleri açısından önem arz etmektedir. Son yıllarda bilgisayarlı görü uygulamalarında önemli bir atılım sergileyen derin öğrenme mimarileri, beton çatlaklarının otomatik olarak tespit ve segmente edilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle, genel olarak bir kodlayıcı ve bir kod çözücü bloktan oluşan derin öğrenme tabanlı segmentasyon mimarileri çatlakları uzamsal sınırları ile tespit ederek, kapsamlı yapı sağlığı analizlerini mümkün kılmaktadır. Ancak, evrimsel filtrede küçük alıcı alan, pooling işleminin neden olduğu bilgi kayıpları ve yetersiz yerel özellik işlenmesi gibi kodlayıcı blok sınırlandırmaları segmentasyon performansını sekteye uğratmaktadır. Bu çalışmada, beton yüzeylerindeki çatlakların segmentasyonu için önerilen DeepLabV3+ mimarisinde kodlayıcı blok için farklı omurga mimarilerinin (ResNet-18, ResNet-50, MobileNetV2, Xception ve Inception-ResNet) etkinlikleri analiz edilmiştir. Farklı omurga mimariler ile sağlanan alçak ve yüksek seviyeli özelliklerin etkinliklerinin test edilmesi için erişime açık DeepCrack ve CrackForest veri setleri kullanılmıştır. Bulgular her iki veri seti için de MobileNetV2 mimarisinin eğitilebilir parametre ve segmentasyon performansı açısından en başarılı ağ olduğunu göstermiştir. MobileNetV2 kodlayıcı tabanlı segmentasyon çerçevesi, yaklaşık 6.7 milyon eğitilebilir ağırlık kullanılarak her iki veri seti için sırasıyla 0.81 ve 0.70 Dice benzerlik katsayısı (DSC) başarımları elde etmiştir. Deneysel bulgular, kodlayıcı bloğunun derinliğini ve karmaşıklığını artırmanın segmentasyon doğruluğunu artırmadığını, oysa daha sıkı özellik çıkarıcıların beton çatlaklarını tespit etmede daha etkili olduğunu göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 April 2024
Received in revised form 1 August 2024
Accepted 15 August 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Semantic Segmentation, Deep Learning, Image Processing, Crack Detection, Crack Segmentation, Building inspection

Doi: [10.24012/dumf.1465724](https://doi.org/10.24012/dumf.1465724)

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Following natural disasters such as earthquakes, floods, and fires, significant damages manifest in both buildings and urban infrastructure. Cracks are widely recognized as the predominant indicators of damage or deterioration in concrete structures. Hence, the early and accurate detection of crack defects is crucial to ensure structural safety and longer service life. Deep learning architectures, which have made a significant breakthrough in computer vision applications in recent years, have begun to be widely used in the automatic detection and segmentation of concrete cracks. In particular, deep learning-based segmentation architectures, typically comprising an encoder and a decoder part, play a crucial role in conducting thorough structural health analyses by precisely detecting cracks along with their spatial boundaries. However, encoder block limitations such as the small receptive field of convolution kernels, information losses caused by the pooling operation, and insufficient local feature processing can hinder segmentation performance. This study examines the efficacy of various backbone architectures (ResNet-18, ResNet-50, MobileNetV2, Xception, and Inception-ResNet) as employed in the encoder block within the DeepLabV3+ framework, proposed for the segmentation of cracks on concrete surfaces. The effectiveness of low-level and high-level features provided by different backbone architectures in the encoder part was evaluated on open-access DeepCrack and CrackForest datasets. The results revealed that the MobileNetV2 architecture was the most successful network in terms of learnable parameters and segmentation performance for both data sets. The MobileNetV2 encoder-based segmentation framework achieved 0.81 and 0.70 Dice similarity coefficient (DSC) for both datasets, respectively, using approximately 6.7 million learnable weights. Experimental results indicate that increasing the depth and complexity of the encoder block does not enhance segmentation accuracy, whereas shallower feature extractors are more effective for detecting concrete cracks.

Giriş

Beton, düşük maliyeti, iyi dayanıklılığı ve şekillendirme kolaylığı nedeniyle bina, otoyol ve köprü gibi altyapı ve üstyapılarda en yaygın olarak kullanılan inşaat malzemesidir [1], [2]. Mevcut yapıların uzun yıllar sürekliliğini koruması için beton kaynaklı deformasyonlara ilişkin belirtiler önem arz etmektedir. Bu kapsamda, çatlaklar beton yapılarda meydana gelen hasarların veya bozulmaların en yaygın belirtileri olarak kabul edilmektedir [2], [3]. Ayrıca, doğal afetler akabinde çökme riskinin ilk sinyali olarak değerlendirilmektedirler [4]. Çatlaklar doğrudan yapıların güvenliğini, uygulanabilirliğini ve dayanıklılığını etkilemektedir. Dolayısıyla, yapılara ilişkin beton yüzeylerde meydana gelen çatlakların yapı denetimi ile hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir.

Yapı denetiminde, uzmana bağlı görsel inceleme sıklıkla uygulanan bir hasar tespit yöntemidir [5]. Bu analiz yönteminde çatlaklar genel olarak çıplak gözle, el tipi detektörlerle veya iskele tipi platform üzerinde çeşitli testler ile yapılır. Ancak, çatlakları tespit etme potansiyeline rağmen, manuel inceleme yoğun emek gerektirir, tehlikelidir, öznel ve zaman alıcıdır [2]. Bu nedenle bilgisayar destekli otomatik hasar tespit sistemlerinin ivedilikle geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Yapı sağlığı denetçilerine çatlak tespitinde yardımcı olmak için bilgisayarlı görsel tabanlı sınıflandırma veya segmentasyon amaçlı çok çeşitli otonom destek modelleri geliştirilmiştir. Sınıflandırma çalışmalarında çatlak bulunan görüntüler doğrudan hasarlı olarak işaretlenirken, segmentasyon çalışmalarında ise çatlakların uzamsal sınırları ile birlikte tespit edilmesi mümkün kılınmıştır. Segmentasyon çalışmaları ile çatlaklara ilişkin daha kapsamlı bilgilerin çıkarılması, bu alana olan yönelimi artırmıştır. Günümüze kadar süregelen segmentasyon çalışmalarının ise genel olarak konvansiyonel ve derin öğrenme tabanlı olmak üzere iki sınıf altında toparlanabildiği rapor edilmiştir [6].

Konvansiyonel yaklaşımlarda, çatlaklara ilişkin görüntülerden özelliklerin manuel olarak çıkarılması ve çıkarılan özelliklerin makine öğrenmesi için uygun gördü vektörlerine dönüştürülmesi genel çerçeve olarak yürütülmüştür. Çatlak segmentasyonunda özellikle geometrik ve fotometrik özelliklerden istifade edilmiştir [7]. Ayrıca, kenar algılama, dalgacık dönüşümü ve gri ölçekli histogram gibi temel görüntü işleme teknikleri, çatlakların tespit veya segmentasyonunda sıklıkla başvurulan yaklaşımlar olmuştur [5]. Bu kapsamda, Talab ve ark. [8] beton yüzeylerine ilişkin görüntülerden çatlakların otomatik olarak sınıflandırmasında Sobel filtreleme yöntemi önermişlerdir. Chun ve ark. [9] ise özellik vektörlerinin oluşturulmasında ışık gradyan artırma makinesine dayalı somut piksel değerlerine ve diğer geometrik özelliklere bağlı çatlak algılama modeli önermişlerdir. Zou ve ark. [10] çatlak tespitinde üç aşamadan oluşan bir konvansiyonel yaklaşım uygulamışlardır. Bunlar sırasıyla jeodezik giderme, tensör

oylaması ve kenar algılamadan oluşmuştur. Literatürde önerilen konvansiyonel segmentasyon çerçeveleri belirli bir veri tabanı veya sahne için özel tasarlandığından, önerilen modellerin genelleyici olma ve gerçek dünya problemlerinde uygulanabilirlik kabiliyetlerini sınırlı kılmaktadır [11]. Ayrıca, düşük kontrast, olumsuz aydınlatma koşulları, kirlilik, topaklanma, morfolojik farklılıklar ve teknolojik ilerlemeler ile birlikte büyük veri setleri konvansiyonel yöntemlerin başarımlarını olumsuz etkilemektedir [2], [12]. Dolayısıyla, gerçek dünya problemleri için ilave ön işleme yöntemlerine ve manuel özellik çıkarımına gereksinim duymayan daha pratik çözümlere ihtiyaç duyulmuştur.

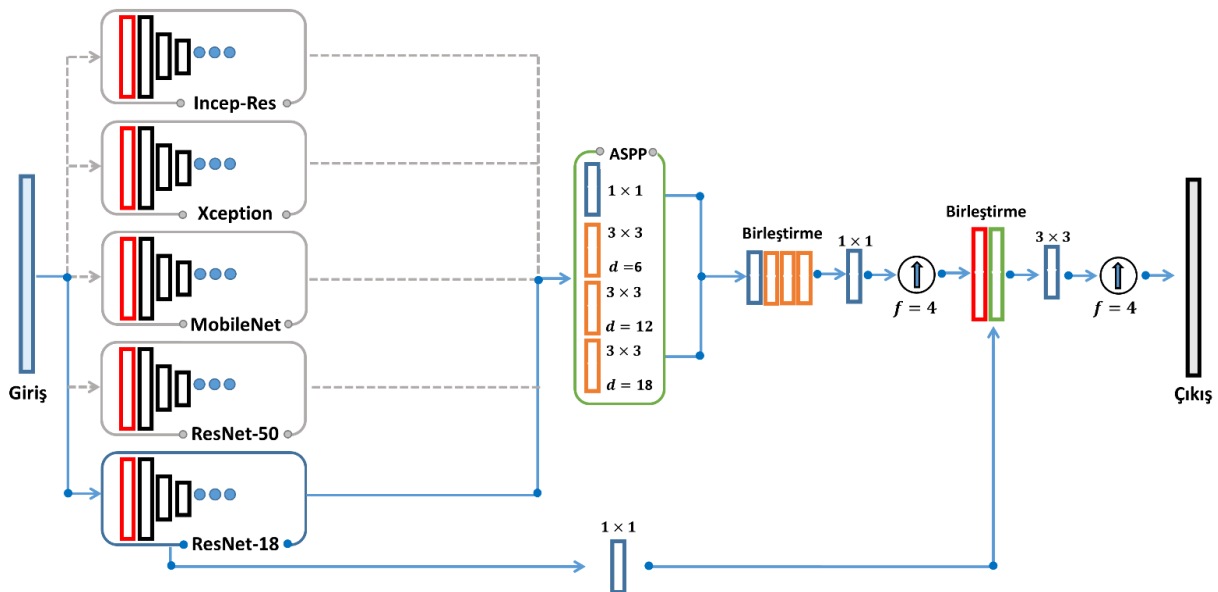
Derin öğrenme son yıllarda birçok alanda dikkat çekici bir atılım sergilemiştir. Ham görüntülerden ayırt edici özellikleri otomatik olarak çıkarabilmeleri ve büyük veri kümelerindeki üstün performansları, derin mimarileri konvansiyonel yöntemlere göre avantajlı kılmıştır [13]. Çatlaklara ilişkin bilgisayarlı görsel uygulamalarında da hızla gelişim göstererek, yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [2], [14], [15]. Literatürde, derin öğrenme tabanlı önerilen modeller ile yapı görüntülerinden çatlaklara ilişkin sınıflandırma [16], hasarlı nesne tespiti [17] ve semantik segmentasyon [18], [19] uygulamaları başarı ile yürütülmüştür. Ancak, çatlak desenlerinin genellikle ince, belirsiz koyu şeritlerden oluşması veya sürekli olarak değişen açı ve yönlere sahip çizgilerden oluşması, çatlakların kutu sınırlar veya genel bir örüntü olarak değerlendirilmesini verimsiz kılmıştır. Bu sınıflandırmaların üstesinden gelmek için çatlakların piksel düzeyinde analiz edilmesine ve semantik segmentasyonuna olan yönelimi artırmıştır.

Derin öğrenmenin görüntü işleme üzerindeki kabiliyetlerinden bu alanda istifade edilmesi için çok sayıda segmentasyon çerçevesi geliştirilmiştir. Önerilen segmentasyon çerçevelerinin genellikle U-Net [20], SegNet [21], FCN [22] veya DeepLabV3+ [23] segmentasyon mimarilerinin doğrudan veya mevcut mimariler üzerinde çeşitli revizyonlarının uygulanarak geliştirildiği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, Zhang ve ark. [24] U-Net mimarisinin beton yüzeylerindeki çatlaklara ilişkin kenar bilgisini çıkarmadaki eksikliğini üstesinden gelmek için her kodlayıcı katmanına bir dikkat modeli (attention module) ekleyerek yeni bir model geliştirmişlerdir. ALP-UNet olarak adlandırdıkları model ile kod çözümü modül geliştirilmiş ve segmentasyon performansında dikkat çekici bir artış gözlemlenmiştir. Kong ve ark. [7] kodlayıcı ve kodçözücü bloktan oluşan ve farklı kombinasyonlarla karşılaştırdıkları bir semantik segmentasyon modeli önermişlerdir. Önerdikleri model ile çatlak segmentasyonunda tranfer öğreniminin performansı doğrudan artırdığını gözlemişlerdir. Ayrıca koldayıcı blokta kullanılan farklı omurga mimarilerine ilişkin segmentasyon performanslarını da karşılaştırmışlardır. Omurga mimarilerin değişimiyle optimum görüntü ölçeğinde yaklaşık olarak %4 oranında bir değişim olduğunu tespit etmişlerdir. Lee ve ark. [25] beton yüzey görüntülerinden çatlakların segmentasyonunda mevcut derin modellerin

performanslarını artırmaya çalışmışlardır. Bu kapsamda, U-Net, DeepLabV3+, DANet ve FCN segmentasyon mimarilerini kullanmışlardır. Mevcut mimariler ile segmentasyon başarımları Jaccard indeksi türünden 0.4 ila 0.6 arasında bir değişiklik gösterirken, yığın öğrenme modelinin entegre edilmesi ile performansta ciddi artışların olduğunu gözlemlemişlerdir. Al-Huda ve ark. [26] çatlakların semantik segmentasyonunda karşılaşılan gürültü tabanlı zorlukların üstesinden gelmek için derin öğrenme tabanlı hibrit bir model önermişlerdir. Önerdikleri model ile sınıflandırıcı ve segmentasyon ağı arasında bilgi aktarımını gerçekleştirerek, segmentasyon performansını artırmaya çalışmışlardır. Yang ve ark. [6] derin öğrenme tabanlı segmentasyon mimarilerinde yetersiz yerel özellik işleme ve havuzlama katmanı nedeniyle bilgi kaybı gibi dezavantajların üstesinden gelmek için yeni bir segmentasyon modeli önermişlerdir. U-Net mimarisine ilerici ve hiyerarşik bağlam füzyonu olarak adlandırılan yeni modüller ekleyerek, çatlakların daha yüksek hassasiyetle segmentasyonunu amaçlamışlardır. Sonuç olarak önerdikleri modelin daha üstün bir performans sergilediğini nicel bulgular ile kanıtlamışlardır. Soni ve ark. [27] FCN mimari tabanlı bir çatlak tespit modeli önermişlerdir. Kodlayıcı yapı için ise InceptionV3, ResNet ve VGG16 evrimsel modellerini kullanarak, çıkarılan özelliklerin model performansına etkilerini incelemişlerdir. Bulgular VGG16'nın daha yüksek bir performansla semantik özellikleri çıkardığını göstermiştir. Liu ve ark. [28] beton çatlaklarının segmentasyonunda iki boyutlu uzamsal ve üç boyutlu geometrik bilgilerin bileşime dayanan bir model önermişlerdir. Çok boyutlu füzyon yaklaşımları ile son teknoloji modellerin üzerinde bir performans elde etmişlerdir. Lang ve ark. [29] yapay zeka tabanlı bir dikkat mekanizması ile etkinliği geliştirilen bir derin segmentasyon mimarisi önermişlerdir. Önerdikleri model ile çatlak dışındaki arak plan girişimlerinin performans üzerindeki olumsuz etkile önlenmeye çalışılmıştır.

Literatürden de görüldüğü üzere, çatlak segmentasyonunda derin mimarilerin konvansiyonel yaklaşımlara göre üstün performans sergilemelerine rağmen hala karşılaştıkları sorunlar bulunmaktadır. Önerilen modellerin derin öğrenme mimarilerinin sahip oldukları handikapların üstesinden gelinmesi yönünde olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, özellik çıkarıcı olarak görev yapan kodlayıcı blokta kullanılan omurga mimarilerin etkinliklerinin araştırıldığı görülmektedir. Söz konusu motivasyon ile bu çalışmada, yapı yüzeylerindeki çatlakların semantik segmentasyonunda farklı kodlayıcı omurgalarının etkinlikleri irdelenmiştir. DeepLabv3+ modeli ile çatlakların optimum seviye segmente edilebilmesi için en uygun mimarinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı omurga yapılarının segmentasyon üzerinde etkinliklerinin daha genelleyici ve güvenilir olarak belirlenmesi için çatlak dağılımı ve morfolojisinin farklı olduğu veri setleri kullanılmıştır. Yürütülen işlemler akabinde, bu çalışmanın literature sunması muhtemel katkılar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Taranmış görüntülerden otomatik ve hassas bir şekilde çatlakların segmentasyonu için derin segmentasyon ağı olan DeepLabV3+ mimarisinin performansı kapsamlı olarak sunulmuştur.
- Kodlayıcı bloğun esas bileşenini oluşturan omurga mimarilerinin özellik çıkarma kabiliyetleri ile birlikte segmentasyon çerçevesi için eğitilebilir parametre açısından verimlilikleri de irdelenmiştir.
- Alçak ve yüksek seviyeli özelliklerin segmentasyon performansı üzerindeki etkinlikleri, nicel bulgular ile birlikte tartışılmıştır.
- Önerilen modellerin performanslarını güvenilir bir şekilde değerlendirmek için 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Eğitim, doğrulama ve test verilerinin farklı olduğu her bir segmentasyon katında elde edilen sonuçların ortalaması alınarak, nihai sonuçlar belirlenmiştir.



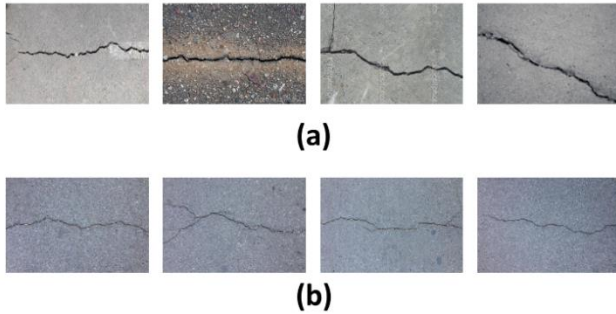
Şekil 1. Önerilen genel segmentasyon çerçevesi

Materyal ve Metot

Beton yapılarıdaki çatlakların piksel düzeyinde segmentasyonu için özellik çıkarıcı olarak farklı omurga mimarilerine ilişkin etkinliğin araştırıldığı genel segmentasyon çerçevesi Şekil 1'de tasvir edilmiştir. Bu bölümde, semantik segmentasyonda kullanılan veri setleri, DeepLabV3+ tabanlı genel çerçeve ve özellik çıkarımında etkinliği değerlendirilen evrimsel sinir ağları (ESA) mimarileri (*ResNet-18*, *ResNet-50*, *MobileNetV2*, *Xception* ve *Inception-ResNet*) detaylandırılmıştır.

Veri seti

Bu çalışmada, önerilen modellerin etkinliklerinin test edilmesi için erişime açık DeepCrack ve CrackForest veri setleri kullanılmıştır. Veri setlerinin erişim adresleri sırasıyla kaynak [11], [30]'da paylaşılmıştır. Şekil 2'de her iki veri setine ait bazı örnek görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 2. Veri setlerinden örnekler (a): DeepCrack, (b):CrackForest

(DeepCrack)

DeepCrack veri seti 384×544 boyutunda 537 RGB formatında görüntüden oluşmaktadır [11]. Veri seti beton ve asfalt gibi yüzeylerde oluşabilecek çatlaklara yönelik çeşitli ölçeklerdeki görüntüler kullanılması ile karakterize edilmiştir. Nispeten geniş hatlara sahip çatlaklar uzmanlarca işaretlenerek gerçek referans segmentasyon haritaları sağlanmıştır.

(CrackForest)

CrackForest veri seti 480×320 boyutunda toplam 118 yüzey görüntüsünden oluşmaktadır [30]. Çatlak içeren görüntülerin gerçek referans segmentasyon haritaları uzmanlar tarafından hazırlanarak, RGB formatında literatüre sunulmuştur.

DeepLabV3+

DeepLabV3+ kodlayıcı ve kod çözücü modüllerinden oluşan popüler bir semantik segmentasyon mimarisidir [23]. Kodlayıcı modülü temel olarak ham görüntülerden aşamalı olarak alt örneklerin alındığı ve bilgilerin ayıklandığı bölümdür. Kod çözücü modülü ise kodlayıcıdan gelen küçük boyutlu özellik haritalarından orijinal görüntü boyutunda segmentasyon haritalarının üretildiği bloktur [31].

Kodlayıcı bölümünde standart evrişim yerine derinlemesine ayrışabilir evrişimler kullanılarak uzamsal çözünürlük korunur [32]. Uzamsal çözünürlüğün korunduğu özellik haritaları atrous uzamsal piramit havuzlama (ASPP) blok ile birleştirilir. Böylelikle yüksek seviyeli özellik haritaları elde edilir. Kod çözücü blokta ise omurga mimari tarafından sağlanan alçak seviyeli özellikler ile yüksek seviyeli özellikler yukarı örneklenerek segmentasyon haritaları elde edilir.

Kodlayıcı Modülü

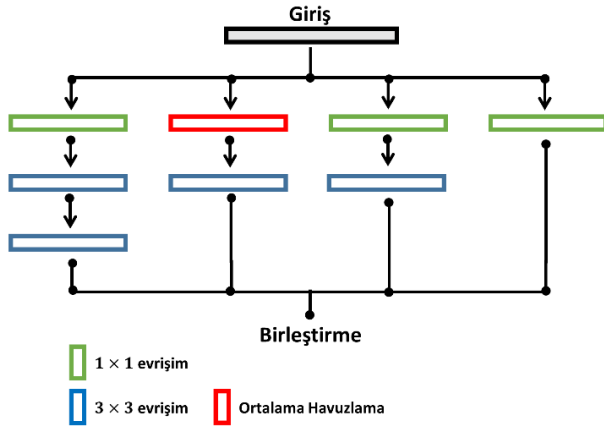
DeepLabV3+ segmentasyon çerçevesinde kodlayıcı modülü bir ESA mimarisinin uyarlanması ile gerçekleşir [2], [12]. Omurga mimari olarak uyarlanan ESA modelleri, görüntü sınıflandırma için tasarımlarından, güçlü özellik çıkarma kabiliyeti sunabilmektedir. Ancak, ESA mimarilerinin özellik çıkarımında üstün avantajlarına rağmen, probleme özgü sınırlı veri seti üzerinde eğitilmeleri çeşitli zorlukları da beraberinde getirir [3]. Veri seti boyutundaki sınırlılık nedeniyle iyi bir genelleştirme yapılamaması, arzu edilen ayırt edici semantik bilgilerin ayıklanmasını da olumsuz etkileyebilir. Bu kapsamda, transfer öğrenimi, söz konusu handikapların üstesinden gelinmesi için başvurulan başlıca yaklaşımlardan biridir. Transfer öğrenimi ile ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışması (ILSVRC) [33] gibi büyük ölçekli sınıflandırma problemleri üzerinde önceden eğitilmiş ESA modellerinin kodlayıcı bölümünde omurga yapı olarak kullanılması, etkin semantik bilgiler sunabilir.

DeepLabV3+ çerçevesi, en iyi semantik segmentasyon ağlarından biri olmasına rağmen, hesaplama etkinliği ağır olumsuz yönü olarak ön plana çıkmaktadır [2]. Ağın hesaplama maliyeti ve segmentasyon doğruluğu, omurga mimari ile doğrudan etkilenebilmektedir. Bu çalışmada yapılar da meydana gelen çatlakların segmentasyonunda, kodlayıcı bölümünde kullanılan farklı ESA modellerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, ResNet, MobileNetV2, Xception ve Inception-ResNet derin mimarileri kullanılmıştır.

(ResNet)

ResNet büyük ölçekli görüntü sınıflandırma problemlerinde yüksek doğruluk sunan bir ESA mimarisi olup, He ve ark. [34] tarafından önerilmiştir. ResNet mimarisi evrimsel ağlarda artan derinlikle birlikte kaybolan veya patlayan gradyan probleminin üstesinden gelinmesi için önerilmiştir. Bu kapsamda, atlamalı veya artık blok teniği takdim edilmiştir. Böylelikle, daha derin mimarilerin daha yüksek performansla eğitilmesi mümkün kılınabilmektedir [34].

Farklı varyantları bulunmasında rağmen, ResNet mimarisi genel olarak beş evrişim bloğundan oluşmaktadır. Artık bloklar evrişim bloklarının temelini oluşturmakta, evrimsel katman sayısı her bir blokta farklılık göstermektedir [35]. Bu çalışmada ResNet-18 ve ResNet-50 mimarileri kullanılmıştır.



Şekil 3. Inception modülünün kanonik gösterimi

(Xception)

Xception modeli, derin mimarilerdeki Inception modülünün sıradan evrişim ile derinlemesine evrişim arasında yeniden dizayn edilerek türetildiği bir evrişimsel sınır ağıdır [36]. Şekil 3'te bir Inception modülünün kanonik gösterimi verilmiştir. Inception modülünde orijinal girişi sıkıştırmak için 1×1 boyutunda evrişim filtreleri (pointwise convolution) kullanmıştır. Önerilen ekstrem (extreme) Inception modülü ile Xception modelinde bu akış ters olarak işlenmiştir. Başka bir ifade ile pointwise evrişim uygulandıktan sonra kanal bazlı uzamsal evrişim işlemleri uygulanmıştır. Yeniden organize edilen Inception modülü ile giriş ve çıkışlarda küçük ölçekli farklılıklar ortaya çıkarak, söz konusu modifikasyon ile birlikte sınıflandırma probleminde daha üstün bir performans sağlanmıştır.

Xception mimarisi artık bağlantısı olan modüller halinde organize edilen 36 evrişim katmanından oluşur. Evrişim katmanları ağır özellik çıkarma yükünü üstlenmektedir. Batch normalizasyon işlemi ise tüm evrişimsel ve ayrılabilir evrişim katmanların akabinde uygulanır [37]. Üstün özellik çıkarımı yeteneği ile Xception modeli semantik segmentasyon modellerindeki kodlayıcı bloklar için omurga yapı olarak seçilmesinde başlıca motivasyon kaynağı olmuştur.

(MobileNet)

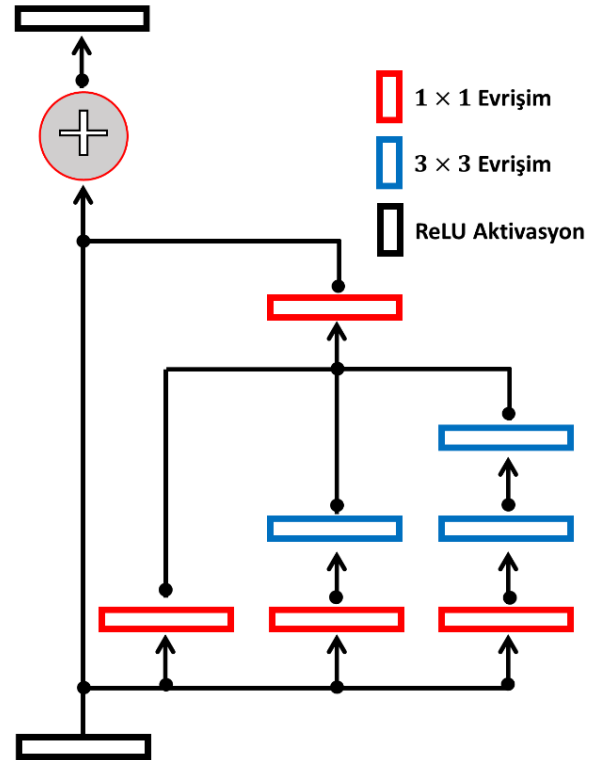
MobileNet esas olarak mobil ve gömülü görsel uygulamalar için Howard ve ark. [38] tarafından önerilmiştir. Oluşturulan mimari ile sınıflandırma problemlerinde doğruluk ile veri işleme süresi arasında verimli bir şekilde denge kurulması amaçlanmıştır. Ağ, ilk olarak Inception model ile takdim edilen derinlemesine ayrışabilir evrişimler üzerine inşa edilmiştir. Bu hafif mimaride standart evrişimler derinlemesine evrişim ve 1×1 boyutunda noktasal evrişimler olarak çarpanlarına ayrıştırılmıştır. Derinlemesine evrişim her bir kanal için ayrı ayrı tek bir filtre olarak uygulanırken, noktasal evrişim ise derinlemesine evrişimden gelen çıktıları bir araya getirmek için uygulanmıştır. Her evrişim işlemi akabinde batch normalizasyon ve ReLU aktivasyon işlemi uygulanmıştır.

Derinlemesine ayrışabilir evrişimlere dayanan MobileNet, yüksek verimlilikte işleme hızı ile birlikte rekabetçi bir

sınıflandırma doğruluğu sunabilmiştir. Bu çalışmada, transfer öğrenimin kodlayıcı blokta etkinliğinin test edilmesinde MobileNet'in güncellenmiş versiyonu olan MobileNetv2 kullanılmıştır [39]. Yeni versiyonda evrişim katmanlarının yapısında hafif değişimler sunmuştur. MobileNetv2'de ilk katman ReLU aktivasyon ile birlikte 1×1 evrişimdir ve ikinci katman derinlemesine evrişim işlemi uygulanmıştır. Son olarak, noktasal 1×1 boyutlu evrişim herhangi bir doğrusallık olmadan uygulanmıştır. Ayrıca, artık katman yapısı ResNet mimarisinin yapısına göre değiştirilerek, büyük yükte gerek kalmadan derinlemesine evrişimin doğruluğunun geliştirilmesi yardımcı olmuştur.

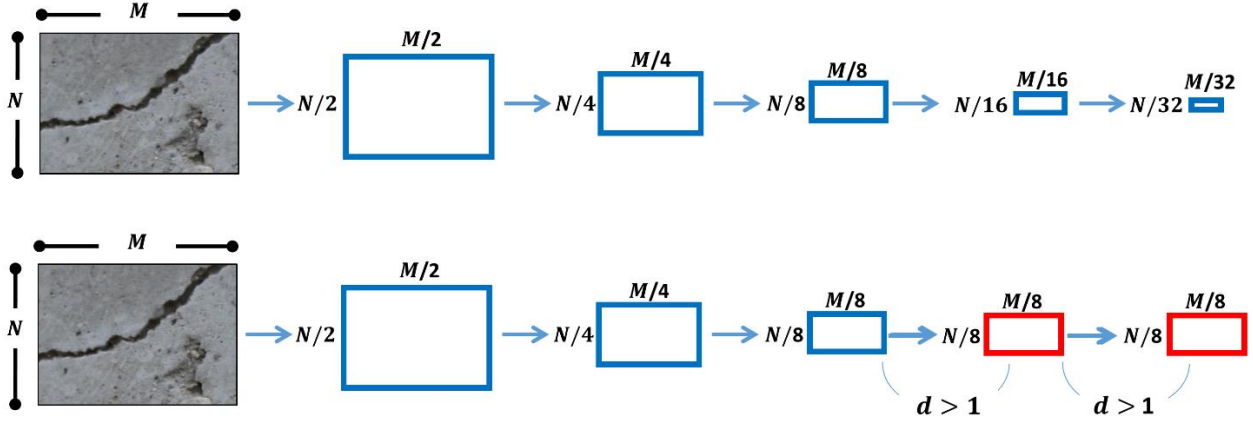
(Inception-ResNet)

Inception-ResNet modeli son yıllarda popüler olan artık bağlantılar ve Inception mimarisinin bir araya getirilme fikri ile önerilmiştir [40]. Artık bağlantılar daha derin mimarilerin daha etkin bir şekilde eğitilmesine olanak sağlayabilmiştir [41]. Inception modelinin son versiyonu olan Inception-v3'ün derin olması, derin mimaride filtre birleştirme aşamasının artık bağlantılar ile değiştirilmesi fikrini doğurmuştur. Bu değişim ile birlikte Inception mimarisinin hesaplama verimliliği korunur iken, ResNet modelinin tüm avantajlarından da istifade edilmesi olanaklı kılınmıştır. Şekil 4'te genel bir Inception-ResNet-V2 modeli gösterilmektedir.



Şekil 4. Inception-ResNet-v2 modeli/bloğu

Önerilen model ile artık mimarilerin Inception mimarisine eklenmesi ile birlikte eğitim hızı ve performansının olumlu yönde etkinleştiği tespit edilmiştir. ILSVRC 2012 veri seti üzerinde ResNet ve Inception-v3 modellerinin



Şekil 5. Genişletilmiş evrişim ile uzamsal çözünürlüğün korunması

sergilediklerinden daha üstün bir sınıflandırma performansı elde edilmiştir. Bu çalışmada, iki mimarinin kombinasyonundan türetilmiş Inception-ResNet-v2 modelinin segmentasyon için özellik çıkarma performansı irdelenmiştir.

Genişletilmiş (atrous) Evrişim ve ASPP

Omurga mimaride standart evrişim yerine kullanılan genişletilmiş (atrous) evrişim, aynı sayıda eğitilebilir parametre sayısı ile daha geniş alıcı alanlar sunabilmektedir [32]. Böylelikle, aynı görüntüden farklı ölçeklerde özelliklerin ayıklanması mümkün kılınarak, çok ölçekli kavramsal bilgilerin elde edilmesi sağlanabilir [23]. Şekil 5'te uzamsal çözünürlüğün atrous evrişim ile korunması gösterilmektedir. Görüntülerden çıkarılan küçük boyutlu özellik haritaları özellikle sınıflandırmada problemlerinde başarılı bir performans sunarken, segmentasyon problemlerinde ise daha büyük özellik haritalarının kullanılması gerekir [31]. Bu kapsamda atrous evrişim operatörlerinin kullanılması, kodlayıcı bölümünde üretilen özellik haritalarındaki uzamsal bilgilerin korunması için önem arz etmektedir.

Kodçözücü Modül

Ham görüntülerden çıkış adımı (output stride) 16:1 olarak elde edilen semantik özelliklerden orijinal boyutta segmentasyon haritalarının üretilmesi kod çözücü blok tarafından sağlanır. Burada, kodlayıcı tarafından sağlanan özelliklerin yoğunlukları genişletilmiş evrişim ile kontrol edilebilir. Ancak genel olarak çıkış adımı 16 (Output-Stride) olarak seçilir [23].

Önerilen kod çözücü blokta ilk olarak kodlayıcıdan gelen özellikler faktör 4 ile çift doğrusal olarak yukarı örneklenir. Ardından, ön eğitilmiş ESA'dan oluşan omurga mimari tarafından sağlanan düşük seviyeli özellikler ile birleştirilir. Birleştirme işleminde düşük seviyeli özelliklerin aynı uzamsal çözünürlükte olması gerekmektedir. Omurga yapıdan gelen düşük seviyeli özellikler genellikle çok sayıda kanal içerdiğinden, kanal sayısını azaltmak için

başka bir 1×1 evrişim uygulanır. Son olarak, birleştirilen özellikler birkaç 3×3 filtre ile filtrelenip, yukarı örneklenerek segmentasyon işlemi tamamlanır.

Model Başarım Metrikleri

Semantik segmentasyon problemlerinde genellikle sınıflar arası dağılımın dengesiz olması kuvvetle muhtemeldir. Özellikle segmente edilecek ilgilen bölge, arka plana kıyasla daha az piksel ile temsil edilir. Dolayısıyla, önerilen modelin performansını güvenilir ve genelleyici olarak değerlendirmek için literatürde kabul edilen başlıca metriklere odaklanmak gerekir. Bu kapsamda, kesişimlerin birleşimi (IoU veya Jaccard indeksi) ve Dice benzerlik indeksi (DSC) sıklıkla tercih edilmektedir. IoU metriği, temel gerçek referans (ground-truth) ile model tarafından yapılan segmentasyon haritasının kesişim ve birleşimi temel alınarak hesaplanır. DSC metriği ise, kesişen piksel sayısının iki katı ile ground truth pikseller ve tahmin edilen piksellerin toplamı arasındaki oran olarak hesaplanır [42].

DSC ve IoU metriklerine ek olarak bu çalışmada özellikle segmentasyon ve sınıflandırma problemlerinde sıklıkla değerlendirilen doğruluk, kesinlik ve duyarlılık metrikleri de kullanılmıştır. Aşağıda söz konusu model başarım metriklerine ilişkin matematiksel eşitlikler verilmiştir.

$$DSC = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN} \quad (1)$$

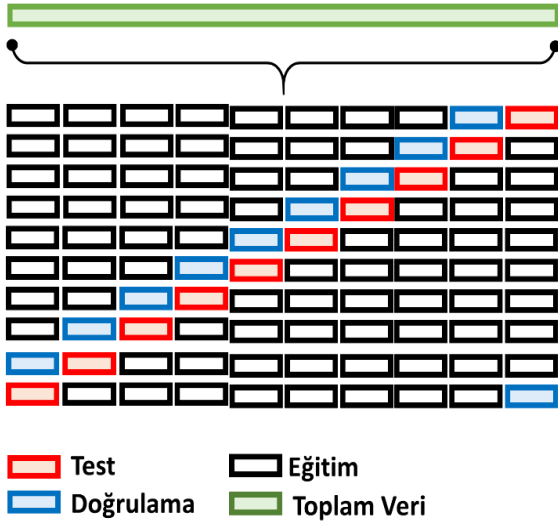
$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (2)$$

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

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (5)$$

Değerlendirme metrikleri TP (Doğru Pozitif), FP (Yanlış Pozitif), TN (Doğru Negatif) ve FN (Yanlış Negatif) sayıları türünden hesaplanmaktadır.



Şekil 6. 10-katlı çapraz-doğrulama işlemi

Ağın Eğitimi ve Test Edilmesi

Önerilen segmentasyon modelleri ve tüm deneyler, MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts) programlama ortamında, Intel i7-2.70 GHz işlemci, 8GB NVIDIA GeForce RTX grafik işleme birimi (GPU) ve 16 GB RAM ile donatılmış bir bilgisayarda uygulanmıştır. Farklı omurga mimarilerinden oluşan segmentasyon çerçeveleri uçtan uca ayrı bir şekilde eğitilmiştir. Veri setinin %80'i eğitim, %10'u doğrulama ve geri kalan %10'u ise test için kullanılmıştır. Önerilen modellerin performanslarını güvenilir bir şekilde değerlendirmek için 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Eğitim, doğrulama ve test verilerinin farklı olduğu her bir segmentasyon katında elde edilen sonuçların ortalaması alınarak, nihai sonuçlar belirlenmiştir. Şekil 6'da 10 katlı çapraz doğrulama uygulaması gösterilmektedir. Şekil 6'da uygulanan veri dağılım metodolojisi her iki veri için de uygulanmıştır.

Tablo 1. DeepCrack veri setine ilişkin segmentasyon sonuçları

Yöntem	Sınıf	DSC		IoU		Doğruluk		Duyarlılık		Kesinlik	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
DeepL. & Resnet-18	Çatlak	0.586	0.145	0.428	0.148	0.961	0.023	0.446	0.170	0.949	0.048
	Arkaplan	0.979	0.013	0.960	0.240	0.961	0.023	0.998	0.002	0.962	0.025
DeepL. & Resnet-50	Çatlak	0.625	0.116	0.464	0.122	0.968	0.012	0.475	0.131	0.963	0.023
	Arkaplan	0.983	0.006	0.967	0.012	0.968	0.012	0.998	0.001	0.969	0.013
DeepL. & MobileNetV2	Çatlak	0.631	0.093	0.467	0.098	0.970	0.010	0.487	0.115	0.933	0.047
	Arkaplan	0.985	0.005	0.967	0.011	0.970	0.010	0.996	0.002	0.972	0.009
DeepL. & Xception	Çatlak	0.586	0.147	0.428	0.143	0.962	0.021	0.446	0.160	0.936	0.047
	Arkaplan	0.980	0.011	0.961	0.021	0.962	0.021	0.997	0.002	0.963	0.022
DeepL. & InceptionResnet	Çatlak	0.482	0.097	0.322	0.080	0.929	0.081	0.330	0.085	0.938	0.050
	Arkaplan	0.959	0.052	0.926	0.086	0.929	0.081	0.998	0.001	0.928	0.086

Not: DeepL=DeeplabV3+, μ = ortalama değer, σ standart sapma

Hiperparametre Seçimi

Bu çalışmada, derin öğrenme tabanlı önerilen segmentasyon ağları için eğitim aşamasında optimasyon algoritması olarak Adam tekniği kullanılmıştır. Adam basit, hesaplama açısından verimli, hızlı ve parametreler açısından büyük olan problemler için verimli bir optimasyon algoritmasıdır [43]. Öğrenme oranı (learning rate) 0.001 seçilmiş ve her iki tam tur sonunda 0.4 oranında küçültülmüştür. Eğitim aşamasında her bir iterasyonda alınan örnek sayısı (mini-batch size), donanımsal kapasite doğrultusunda 8 olarak seçilmiştir. Tam tur sayısı (epoch) ise 10 olarak belirlenmiştir. Eğitim aşamasındaki her bir parametrenin seçimi deneme ve yanılma yolu ile belirlenmiştir.

Deneysel Bulgular

Bu bölümde, farklı ESA modellerinin omurga mimari olarak kullanıldıkları DeepLabV3+ çerçevelerin iki farklı erişime açık veri seti üzerinde segmentasyon başarımları paylaşılmıştır.

Tablo 1'de beş farklı ön eğitimli mimari kullanılarak 10-katlı çapraz-doğrulama sonucu elde edilen ortalama segmentasyon sonuçları DSC, IoU, duyarlılık, kesinlik ve doğruluk metrikleri türünden gösterilmiştir.

Farklı omurga mimarilerinin kullanıldığı segmentasyon modelleri için model başarımları metrikleri çatlak ve arkaplan sınıfları olmak üzere ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Önerilen tüm modellerin genel olarak ham görüntülerden arka planı iyi bir şekilde ayırt edebildiği gözlemlenmiştir. Arka plan için segmentasyon performansı en yüksek olarak MobileNetV2 omurga mimari tarafından elde edilmiştir. MobileNetV2 ile segmentasyon sonuçları DSC, IoU ve doğruluk türünden sırasıyla %98.5, %96.7 ve %97 olarak elde edilmiştir. Arka plan için ise en düşük performansı Inception-ResNet omurga mimari tabanlı DeepLabV3+ segmentasyon çerçevesi sağlamıştır. Söz konusu mimari ile segmentasyon başarımları DSC, IoU ve doğruluk türünden sırasıyla %95.9, %92.6 ve %92.9 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2. CrackForest veri setine ilişkin segmentasyon başarımları

Yöntem	Sınıf	DSC		IoU		Doğruluk		Duyarlılık		Kesinlik	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
DeepL. & Resnet-18	Çatlak	0.399	0.047	0.250	0.036	0.952	0.018	0.280	0.057	0.773	0.167
	Arkaplan	0.975	0.010	0.952	0.019	0.952	0.018	0.992	0.012	0.959	0.013
DeepL. & Resnet-50	Çatlak	0.410	0.057	0.259	0.046	0.953	0.021	0.284	0.053	0.787	0.159
	Arkaplan	0.975	0.011	0.952	0.021	0.953	0.021	0.992	0.012	0.958	0.014
DeepL. & MobileNetV2	Çatlak	0.419	0.044	0.266	0.036	0.958	0.013	0.312	0.089	0.750	0.173
	Arkaplan	0.978	0.007	0.958	0.014	0.958	0.013	0.991	0.013	0.966	0.011
DeepL. & Xception	Çatlak	0.406	0.073	0.257	0.059	0.953	0.019	0.291	0.081	0.780	0.169
	Arkaplan	0.975	0.010	0.952	0.019	0.953	0.019	0.992	0.014	0.959	0.016
DeepL. & InceptionResnet	Çatlak	0.361	0.094	0.226	0.067	0.929	0.046	0.237	0.071	0.859	0.106
	Arkaplan	0.961	0.265	0.927	0.047	0.929	0.046	0.995	0.005	0.931	0.046

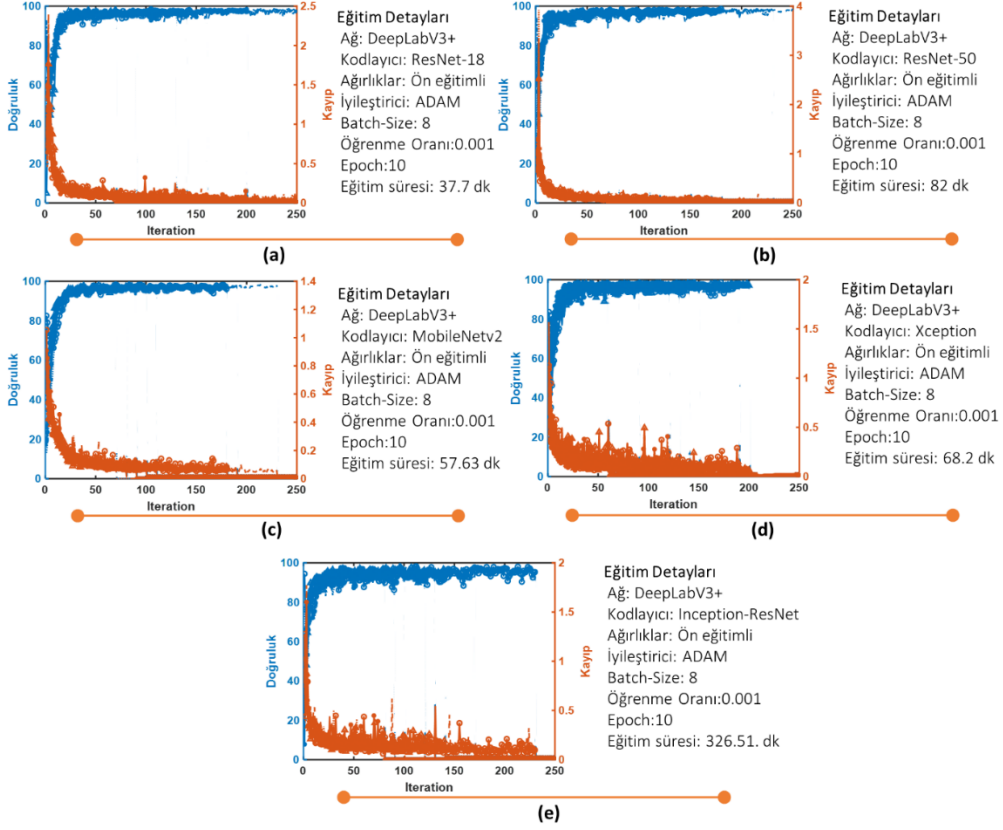
Not: DeepL=DeeplabV3+, μ = ortalama değer, σ standart sapma

Beton yüzeylere ait görüntülerden çatlakların segmentasyonu arka plana kıyasla genel olarak daha düşük bir performansla sağlanmıştır. Çatlak segmentasyonunda en yüksek performansı MobileNetV2 tabanlı segmentasyon çerçevesi sağlarken, en düşük performansı ise Inception+ResNet tabanlı segmentasyon çerçevesi sunmuştur. MobileNetV2 ile segmentasyon başarımları DSC, IoU ve doğruluk metriği türünden sırasıyla %63.1, %46.7 ve %97 olarak elde edilmiştir. MobileNetV2 omurga mimariye en yakın performans ResNet-50 modeli sunulmuş olup, segmentasyon başarımları sırasıyla %62.5, %46.4 ve %96.8 olarak elde edilmiştir. Çatlak segmentasyonuna ilişkin en düşük performans ise Inception+ResNet omurga mimari tarafından sunulmuştur. Inception+ResNet modelinin omurga mimari olarak kullanıldığı segmentasyon çerçevesi DSC, IoU ve doğruluk türünden %48.2, %32.2 ve %92.9 seviyesinde bir performans sergilemiştir. Tablo 2’de CrackForest veri setine ilişkin elde edilen segmentasyon başarımları gösterilmiştir.

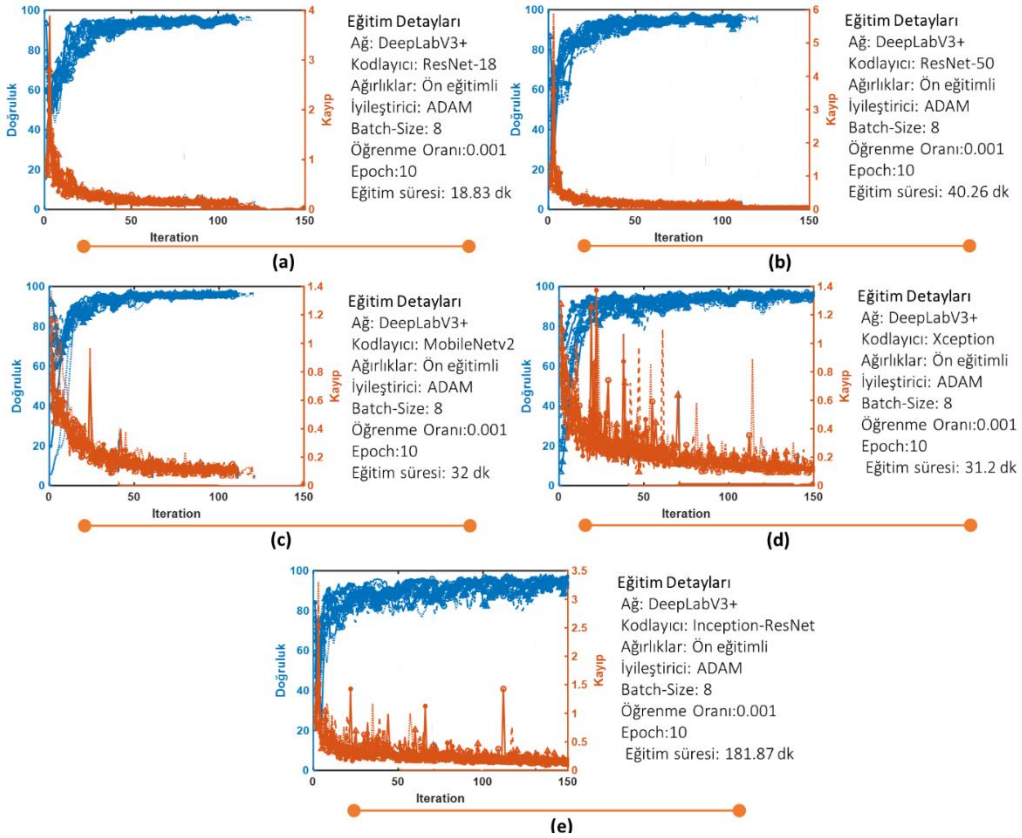
Tablo 2’de görüldüğü üzere CrackForest veri setine ilişkin elde edilen segmentasyon performansları DeepCrack ile kıyaslandığında genel olarak daha düşük seviyede seyretmiştir. Ancak, en başarılı segmentasyon başarımlarını sunan omurga mimariler DeepCrack veri seti ile benzerlik göstermiştir. MobileNetV2 modelinin omurga mimari olarak kullanıldığı segmentasyon çerçevesi en yüksek başarımları sunmuştur. Arkaplan sınıfı için MobileNetV2 ile segmentasyon başarımları DSC, IoU, ve doğruluk metrikleri türünden sırasıyla %97.8, %95.8 ve %95.8 olarak elde edilmiştir. Beton yüzey görüntülerinde arkaplan sınıfına kıyasla çok az piksel ile temsil edilen çatlak sınıfına ilişkin segmentasyon başarımları daha düşük seviyede seyretmiştir. En yüksek başarımları MobileNetV2 ile elde edilirken, en

düşük performans ise Inception-ResNet omurga mimarisi tarafından sunulmuştur. Her iki omurga mimari için segmentasyon başarımları DSC türünden sırasıyla %41.9 ve %36.1 olarak elde edilmiştir. Farklı segmentasyon mimarilerinin öğrenme sürecinin ilerlemesini gözlemek ve birbirleriyle karşılaştırmak için eğitim sırasında doğruluk ve kayıp eğrilerinin seyri incelenmiştir. Daha önce etiketlenmiş olan açıklamalı çatlaklar ile önerilen modeller tarafından tahmin edilen çatlaklar arasındaki mesafe böylelikle temsil edilebilmiştir. Özellikle eğitim kaybı eğrileri, eğitim veri setinin ağ tarafından yeterince öğrenilip öğrenilmediğini gösteren kritik göstergelerdir [12]. Şekil 7’de DeepCrack veri seti için farklı mimarilerin 10 katlı çapraz doğrulama ile sergiledikleri öğrenme kabiliyetlerine ilişkin eğitim doğruluğu ve eğitim kaybı eğrileri gösterilmiştir.

Şekil 7’de görüldüğü üzere tüm segmentasyon mimarileri için öğrenme işlemi ilk 50 iterasyonda önemli ölçüde tamamlanmıştır. Öğrenme aşamasında kayıp eğrisinde dalgalanmaların 50. iterasyondan sonra azaldığı ağların öğrenme sürecindeki son rötuşları gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. ResNet-18, ResNet-50 ve MobileNetV2’nin kodlayıcı blokta omurga olarak kullanıldığı DeepLabV3+ mimarileri için diğer omurga yapılarına kıyasla eğitim kaybının daha hızlı minimum seviyeye eriştiği rapor edilmiştir. Xception ve Inception-ResNet omurga yapıları için öğrenme aşamasında aşırı uyumlamanın daha erken gerçekleşmesinden ötürü öğrenme sürecinin erken sonlandığı çok sayıda segmentasyon katının olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8’de CrackForest veri seti için farklı mimarilerin 10 katlı çapraz doğrulama ile sergiledikleri öğrenme kabiliyetlerine ilişkin eğitim doğruluğu ve eğitim kaybı eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 7. DeepCrack veri seri ilişkin eğitim ve kayıp fonksiyonları, (a) ResNet-18, (b) ResNet-50, (c) MobileNetV2, (d) Xception ve (e) Inception-ResNet



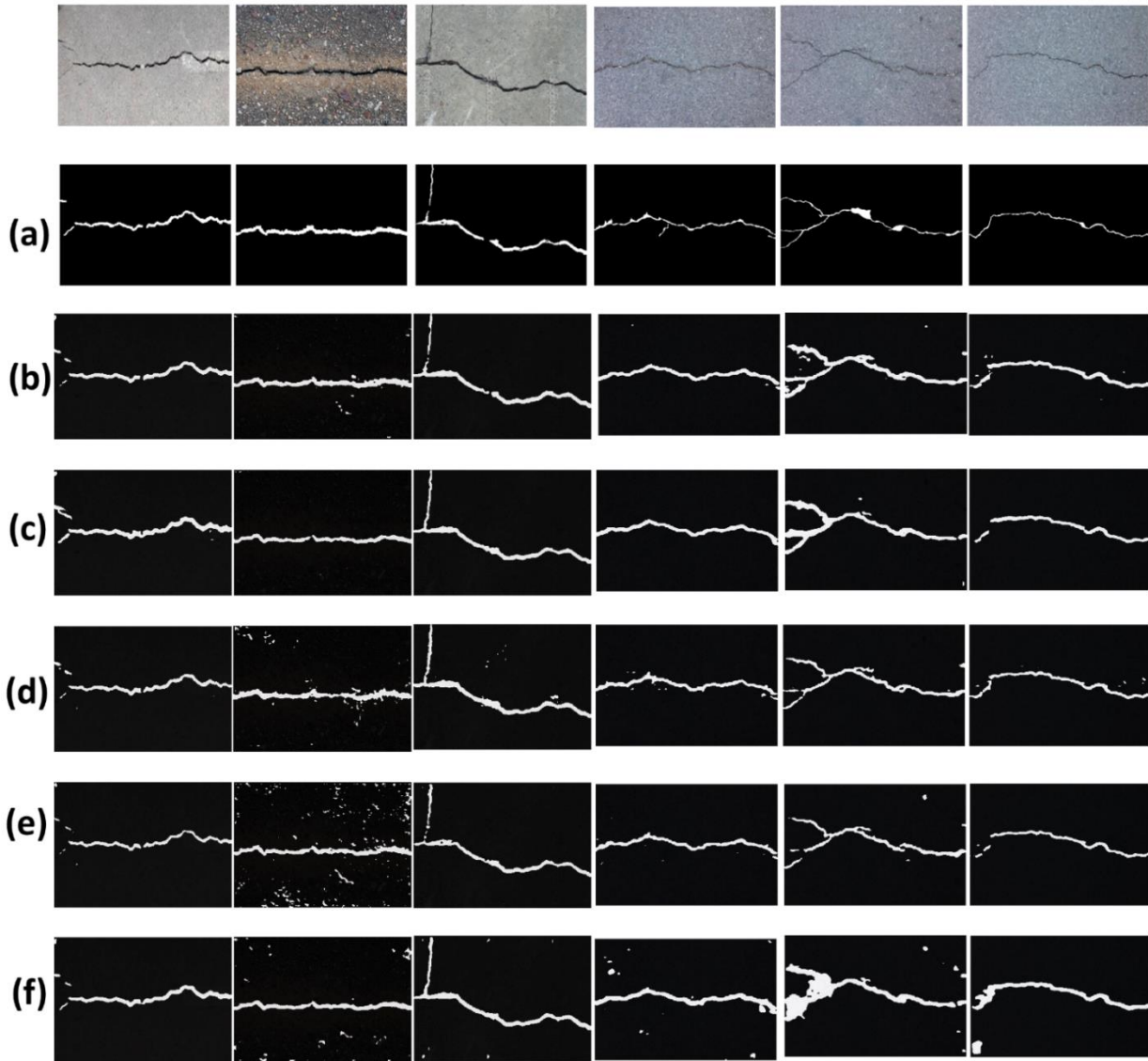
Şekil 8. CrackForest veri seri ilişkin eğitim ve kayıp fonksiyonları, (a) ResNet-18, (b) ResNet-50, (c) MobileNetV2, (d) Xception ve (e) Inception-ResNet

CrackForest veri seti üzerinde tüm segmentasyon modellerinin eğitim süreçlerinin daha düşük performansla seyrettiği gözlemlenmiştir. Eğitim kaybı eğrisinin 20. iterasyondan sonra hızla yakınsamaya başladığı gözlemlenmiştir. Eğitim doğruluğunun 50. iterasyondan sonra sabit değere yöneldiği gözlemlenmiştir. Özellikle Xception ve Inception-ResNet omurga yapı tabanlı segmentasyon mimarilerinin eğitim doğruluğu ve eğitim kaybı eğrilerinde yüksek dalgalanmaların olduğu tespit edilmiştir.

Farklı ön eğitilmiş ESA modellerine dayanan segmentasyon mimarilerinin sunmuş oldukları performansın güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için 10 katlı çapraz doğrulama yaklaşımı uygulanmıştır. Her bir segmentasyon katında farklı veri dağılımı senaryoları üretilerek, her bir görüntünün eğitim, doğrulama ve test grubunda yer alması

sağlanmıştır. Şekil 9’da farklı omurga mimarilere ilişkin segmentasyon çıktıların örnek görselleri verilmiştir.

Gerçek referans görüntüleri ile segmentasyon çıktıları kıyaslandığında farklı omurga yapılarının kullanıldığı DeepLabV3+ mimarilerinin genel olarak makul seviyede bir segmentasyon performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Resnet-50 ve MobileNetV2 tabanlı mimarilerin daha net sonuçlar sunduğu görsel bulgulardan çıkarılabilmektedir. Ancak, Xception ve Inception-ResNet tabanlı segmentasyon mimarilerinin çok sayıda pikseli yanlış pozitif olarak etiketlediği tespit edilmiştir. DeepCrack veri setinde mevcut çatlakların nispeten daha kalın ve daha fazla piksel ile temsil edilmiş olmaları, önerilen modeller tarafından piksellerin yanlış negatif olarak etiketleme riskini de hafiflettiğine görsel segmentasyon çıktılarından ulaşılmıştır.



Şekil 9. Farklı mimarilere ilişkin elde edilen görsel segmentasyon çıktıları (a): Gerçek referans (Ground-Truth), (b) ResNet-18, (c): ResNet-50, (d): MobileNetv2, (e): Xception, (f): Inception-ResNetv2

Tartışma

Semantik segmentasyon, bilgisayarla görme alanında önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmakta ve özellikle son yıllarda beton yapılara ait görüntülerin analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Semantik segmentasyon mimarilerinde başarıyı artırmak için ön eğitilmiş ESA modellerin kullanılması popüler bir yaklaşımdır [25], [32], [37]. Elde edilen bulgular, ön eğitilmiş mimarilerin doğrudan segmentasyon performansını etkilediğini ortaya çıkarmıştır. Farklı ön eğitilmiş mimariler ile farklı düzeyde sınıflandırma performansının elde edilmesi, omurga yapı olarak kullanılan ESA mimarilerin önemini vurgulamıştır.

Yüksek hassasiyetli semantik segmentasyon modellerinin en büyük handikapları arasında hesaplama verimliliği gelmektedir [2]. Dolayısıyla, eğitilebilir parametre sayısı ve segmentasyon performansı açısından dengeli modellerin türetilmesi veya geliştirilmesi önem arz etmektedir. Elde edilen bulgular MobileNetV2 mimarisinin bu kapsamda en ideal omurga yapı olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. MobileNetV2 tabanlı DeepLabV3+ mimarisinin yaklaşık 6.7 milyon eğitilebilir parametre ile en yüksek performansı sağladığı rapor edilmiştir.

Esasen büyük ölçekli görüntü sınıflandırma problemleri için dizayn edilen ESA modelleri güçlü birer özellik çıkarıcıdır [7]. Bu çalışmada derin ve nistepen sığ ön eğitilmiş mimarilerin özellik çıkarımında performansları test edilmiştir. Derin kodlayıcı mimariler tarafından üretilen küçük özellik haritalar sınıflandırma problemleri için verimli olmalarına rağmen, küçük özellik haritaları segmentasyon için çeşitli dezavantajları beraberinde getirir [31]. Küçük özellik haritalarının çıkarılması, çatlak gibi küçük ölçekli bölgelere ilişkin uzamsal bilgilerin kaybolmasına yol açabilmektedir. Inception-Resnet mimarisinin diğer yapılara kıyasla daha derin olmasına rağmen daha düşük segmentasyon performansı sağlaması, büyük özellik haritalarının beton çatlakları için daha elverişli olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada önerilen modeller farklı iki veri seti üzerinde uygulanmış ve her iki veri seti için nispeten birbirinden uzak performanslar elde edilmiştir. Veri kümelerinde yer alan çatlakların geometri, boyut, aydınlatma ve gölgeleme açısından farklı özellikte olması model başarımlarını doğrudan etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca, DeepCrack veri seti için elde edilen segmentasyon başarımının daha yüksek olmasının başlıca nedenlerinden biri de veri seti boyutunun daha büyük olmasına dayandırılmaktadır. Her iki veri setinin sınırlı sayıda örnek içeriyor olmasından ötürü performans düşüklüğünün üstesinden gelinmesi için literatürde sıklıkla veri artırımı yöntemlerine başvurulduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç

Bu çalışmada, beton yüzeylerindeki çatlakların segmentasyonu için önerilen DeepLabV3+ mimarisinde farklı omurga mimarilerin etkinlikleri analiz edilmiştir. Kodlayıcı bloğun esas bileşenini oluşturan omurga mimarilerinin özellik çıkarma kabiliyetleri ile birlikte

segmentasyon çerçevesi için eğitilebilir parametre açısından verimlilikleri de irdelenmiştir. Bu kapsamda, Resnet-18, ResNet-50, MoileNetV2, Xception ve Inception-Resnet mimarilerin kodlayıcı blokta etkinlikleri, iki farklı veri seti üzerinde herhangi bir veri artırımı yöntemine başvurulmadan belli koşullar altında test edilmiştir. Her iki veri seti için de MobileNetV2 mimarisinin eğitilebilir parametre ve segmentasyon performansı açısından en başarılı ağ olduğu tespit edilmiştir. MobileNetV2 tabanlı önerilen DeepLabV3+ segmentasyon modeli yaklaşık 6.7 milyon parametre ile DeepCrack ve CrackForest veri setleri için DSC türünden sırasıyla %82 ve %70 oranında bir performans sergilemiştir. En düşük performans ise Inception-ResNet mimarisi tarafından sağlanmış olup, DeepCrack ve CrackForest veri setleri için segmentasyon başarımı DSC türünden %70 ile %80 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde, kodlayıcı blokta kullanılan ESA modellerinin DeepLabV3+ mimarisinin performansını doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, kodlayıcı blokta kullanılan ESA mimarilerinde artan derinlik ve karmaşıklıkla birlikte performansın olumlu etkilenmediği gözlemlenmiştir. Omurga yapıdaki artan derinlik ve karmaşıklığın yüksek hesaplama maliyeti ile birlikte hantal bir eğitim sürecine neden olduğu tespit edilmiştir.

Kaynakça

- [1] Q. An *et al.*, "Segmentation of Concrete Cracks by Using Fractal Dimension and UHK-Net," *Fractal Fract.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3390/fractalfract6020095.
- [2] L. Song, H. Sun, J. Liu, Z. Yu, and C. Cui, "Automatic segmentation and quantification of global cracks in concrete structures based on deep learning," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 199, no. June, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111550.
- [3] X. Han *et al.*, "Structural damage-causing concrete cracking detection based on a deep-learning method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 337, no. 196, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127562.
- [4] Y. Bai, H. Sezen, and A. Yilmaz, "End-to-end deep learning methods for automated damage detection in extreme events at various scales," *Proc. - Int. Conf. Pattern Recognit.*, no. c, pp. 5736–5743, 2020, doi: 10.1109/ICPR48806.2021.9413041.
- [5] W. Wang, C. Su, G. Han, and H. Zhang, "A lightweight crack segmentation network based on knowledge distillation," vol. 76, no. May, 2023.
- [6] L. Yang, H. Huang, S. Kong, and Y. Liu, "A deep segmentation network for crack detection with progressive and hierarchical context fusion," *J. Build. Eng.*, vol. 75, no. May, 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106886.
- [7] J. König, M. D. Jenkins, M. Mannion, P. Barrie, and G. Morison, "Optimized deep encoder-decoder methods for crack segmentation," *Digit. Signal Process. A Rev. J.*, vol. 108, 2021, doi: 10.1016/j.dsp.2020.102907.
- [8] A. Mahgoub, A. Talab, Z. Huang, F. Xi, and L.

- Haiming, "Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques," *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1016/j.jileo.2015.09.147.
- [9] P. Chun, S. Izumi, and T. Yamane, "Automatic detection method of cracks from concrete surface imagery using two-step light gradient boosting machine," pp. 61–72, 2021, doi: 10.1111/mice.12564.
- [10] Q. Zou, Y. Cao, Q. Li, Q. Mao, and S. Wang, "CrackTree: Automatic crack detection from pavement images," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 33, no. 3, pp. 227–238, 2012, doi: 10.1016/j.patrec.2011.11.004.
- [11] Y. Liu, J. Yao, X. Lu, R. Xie, and L. Li, "DeepCrack: A deep hierarchical feature learning architecture for crack segmentation," *Neurocomputing*, vol. 338, pp. 139–153, 2019, doi: 10.1016/j.neucom.2019.01.036.
- [12] R. Pu, G. Ren, H. Li, W. Jiang, J. Zhang, and H. Qin, "Autonomous Concrete Crack Semantic Segmentation Using Deep Fully Convolutional Encoder–Decoder Network in Concrete Structures Inspection," *Buildings*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.3390/buildings12112019.
- [13] K. Makantasis, E. Protopapadakis, A. Doulamis, N. Doulamis, and C. Loupos, "Deep Convolutional Neural Networks for efficient vision based tunnel inspection," *Proc. - 2015 IEEE 11th Int. Conf. Intell. Comput. Commun. Process. ICCP 2015*, pp. 335–342, 2015, doi: 10.1109/ICCP.2015.7312681.
- [14] F. Bahreini and A. Hammad, "Dynamic graph CNN based semantic segmentation of concrete defects and as-inspected modeling," *Autom. Constr.*, vol. 159, no. November 2023, p. 105282, 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105282.
- [15] H. Li, H. Zhang, H. Zhu, K. Gao, H. Liang, and J. Yang, "Automatic crack detection on concrete and asphalt surfaces using semantic segmentation network with hierarchical Transformer," *Eng. Struct.*, vol. 307, no. February, p. 117903, 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117903.
- [16] W. Qayyum, R. Ehtisham, A. Bahrami, C. Camp, J. Mir, and A. Ahmad, "Assessment of Convolutional Neural Network Pre-Trained Models for Detection and Orientation of Cracks," pp. 1–16, 2023.
- [17] Y. J. Cha, W. Choi, G. Suh, S. Mahmoudkhani, and O. Büyüköztürk, "Autonomous Structural Visual Inspection Using Region-Based Deep Learning for Detecting Multiple Damage Types," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 33, no. 9, pp. 731–747, 2018, doi: 10.1111/mice.12334.
- [18] F. Panella, A. Lipani, and J. Boehm, "Semantic segmentation of cracks: Data challenges and architecture," *Autom. Constr.*, vol. 135, no. December 2021, p. 104110, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.104110.
- [19] M. Jamshidi, M. El-Badry, and N. Nourian, "Improving Concrete Crack Segmentation Networks through CutMix Data Synthesis and Temporal Data Fusion," *Sensors*, vol. 23, no. 1, 2023, doi: 10.3390/s23010504.
- [20] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 9351, pp. 234–241, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28/COVER/.
- [21] V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, "<https://arxiv.org/pdf/1511.00561.pdf> {Segnet : A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation}," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 12, pp. 2481–2495, 2017.
- [22] E. Shelhamer, J. Long, and T. Darrell, "Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 4, pp. 640–651, Apr. 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2572683.
- [23] L. C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam, "Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 11211 LNCS, pp. 833–851, 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_49.
- [24] Y. Zhang, X. Gao, and H. Zhang, "Deep Learning-Based Semantic Segmentation Methods for Pavement Cracks," 2023.
- [25] T. Lee, J. H. Kim, S. J. Lee, S. K. Ryu, and B. C. Joo, "Improvement of Concrete Crack Segmentation Performance Using Stacking Ensemble Learning," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 4, 2023, doi: 10.3390/app13042367.
- [26] Z. Al-Huda, B. Peng, R. N. A. Algburi, M. A. Alantari, R. AL-Jarazi, and D. Zhai, "A hybrid deep learning pavement crack semantic segmentation," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 122, no. November 2022, p. 106142, 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.106142.
- [27] A. N. Soni, "Crack Detection in buildings using convolutional neural Network," no. September, 2020.
- [28] A. Liu, W. Hua, J. Xu, Z. Yang, and J. Fu, "Concrete crack segmentation based on multi-dimensional structure information fusion-based network," *Constr. Build. Mater.*, vol. 414, no. August 2023, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134982.
- [29] H. Lang, Y. Yuan, J. Chen, S. Ding, J. J. Lu, and Y. Zhang, "Augmented Concrete Crack Segmentation: Learning Complete Representation to Defend Background Interference in Concrete Pavements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3378205.
- [30] Y. Shi, L. Cui, Z. Qi, F. Meng, and Z. Chen, "Automatic road crack detection using random structured forests," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 12, pp. 3434–3445, 2016, doi: 10.1109/TITS.2016.2552248.
- [31] B. Baheti, S. Innani, S. Gajre, and S. Talbar, "Semantic scene segmentation in unstructured environment with modified DeepLabV3+," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 138, pp. 223–229, 2020, doi:

- 10.1016/j.patrec.2020.07.029.
- [32] T. Ahmad, V. Gharehbaghi, J. Li, C. Bennett, and R. Lequesne, "Crack segmentation in the wild using convolutional neural networks and bootstrapping," *Earthq. Eng. Resil.*, vol. 2, no. 3, pp. 348–363, 2023, doi: 10.1002/eer2.52.
- [33] Jia Deng, Wei Dong, R. Socher, Li-Jia Li, Kai Li, and Li Fei-Fei, "ImageNet: A large-scale hierarchical image database," pp. 248–255, 2009, doi: 10.1109/cvprw.2009.5206848.
- [34] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2016-Decem, pp. 770–778, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [35] B. Baheti, S. Gajre, and S. Talbar, "Semantic Scene Understanding in Unstructured Environment with Deep Convolutional Neural Network," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2019-Octob, pp. 790–795, 2019, doi: 10.1109/TENCON.2019.8929376.
- [36] F. Chollet, "Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions," *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1800–1807, 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.195.
- [37] R. E. Philip, A. D. Andrushia, A. Nammalvar, B. G. A. Gurupatham, and K. Roy, "A Comparative Study on Crack Detection in Concrete Walls Using Transfer Learning Techniques," *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 4, 2023, doi: 10.3390/jcs7040169.
- [38] A. G. Howard *et al.*, "MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications," Apr. 2017, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1704.04861>.
- [39] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L. C. Chen, "MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks," *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 4510–4520, 2018, doi: 10.1109/CVPR.2018.00474.
- [40] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna, "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision," *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2016-Decem, pp. 2818–2826, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.308.
- [41] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8691 LNCS, no. PART 3, pp. 346–361, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-10578-9_23.
- [42] D. Tabernik, M. Šuc, and D. Skočaj, "Automated detection and segmentation of cracks in concrete surfaces using joined segmentation and classification deep neural network," *Constr. Build. Mater.*, vol. 408, no. September, p. 133582, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133582.
- [43] D. P. Kingma and J. L. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," *3rd Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2015 - Conf. Track Proc.*, pp. 1–15, 2015.



Araştırma Makalesi / Research Article

Görme Engelli Bireylerin Günlük Yaşamda Karşılaştıkları Zorluklara Yenilikçi Bir Çözüm: Derin Öğrenme Tabanlı Akıllı Asistan Tasarımı ve Geliştirilmesi

*Innovative Solutions to the Challenges Faced by Visually Impaired Individuals in Daily Life: Design and Development of a Deep Learning-Based Smart Assistant*Mehmet Ali Yalçinkaya^{1*}, Murat Işık², Elanur Kaşçıoğlu³, Hatice Nur Kaya⁴¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, mehmetyalcinkaya@ahievran.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7320-5643>² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, muratisik@ahievran.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3200-1609>³ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, elakascioglu3425@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0950-5951>⁴ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, haticenur.4455@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4815-0899>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25 Nisan 2024
Revizyon 3 Ağustos 2024
Kabul 14 Ağustos 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Görme Engelli Bireyler, Nesne Tanıma, MobileNetV2, Yapay Zekâ, Derin Öğrenme, Toplumsal Katkı

ÖZ

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, yapay zekâ (AI) ve görüntü işleme teknolojileri, özellikle görme engelli bireylerin günlük yaşantılarını kolaylaştırmak adına önemli imkanlar sunmaktadır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada, görme engelli bireyler için geliştirilmiş, yapay zekâ ve görüntü işleme tabanlı bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen mobil uygulama, sesli komutları algılayabilen ve kullanıcıya yine sesli geri bildirim sağlayan bir yapıya sahiptir. Geliştirilen uygulamanın en önemli bileşeni nesne tanıma modülüdür. Söz konusu modül kamera görüntüsü üzerinden anlık olarak ortamdaki nesnelere sınıflandırmakta, kullanıcıya göre nesnenin konumunu belirlemekte ve tüm bu bilgileri kullanıcıya sesli olarak iletmektedir. Geliştirilen uygulamada nesne tanıma için MobileNetV2 modeli kullanılmıştır. İlk olarak MobileNet derin öğrenme modelinin iki versiyonu (V1, V2), genişletilmiş Pascal VOC veri seti üzerinde test edilmiş ve MobileNetV2 modelinden %93 başarı oranı elde edilmiştir. Daha sonra söz konusu model, mobil uygulama içerisine nesne tanıma işlevi için entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, geliştirilen uygulama sayesinde görme engelli bireylerin buldukları ortamdaki nesnelere başarılı bir şekilde tespit edilmekte ve kullanıcı yönlendirmesi sağlanmaktadır. Geliştirilen mobil uygulamanın görme engelli bireyler için sunduğu diğer modüller ise, metin okuma, sesli navigasyon ve konum tabanlı hava durumu servisedir. Sonuç olarak bu çalışma ile, yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojilerinin sosyal etki yaratma potansiyelini göstermek ve görme engellilere yönelik teknolojik çözümlerin geliştirilmesinde katkı sağlamak amaçlanmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 April 2024
Received in revised form 3 August 2024
Accepted 14 August 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Individuals with Visual Impairments, Object Recognition, MobileNetV2, Artificial Intelligence, Image Processing, Social Contribution

Doi: 10.24012/dumf.1472285

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

With the rapid advancement of technology today, artificial intelligence (AI) and image processing technologies offer significant opportunities to facilitate the daily lives of visually impaired individuals. In line with this objective, this study developed an AI and image processing-based mobile application specifically for visually impaired individuals. The developed mobile application can recognize voice commands and provide voice feedback to the user. The most crucial component of the application is the object recognition module. This module classifies objects in real-time from camera images, determines the object's position relative to the user, and verbally conveys this information to the user. The MobileNetV2 model was used for object recognition in the developed application. Initially, two versions of the MobileNet deep learning model (V1 and V2) were tested on the extended Pascal VOC dataset, achieving a 93% success rate with the MobileNetV2 model. Subsequently, this model was integrated into the mobile application for object recognition. The results demonstrate that the developed application successfully detects objects in the environment and provides user guidance. Other modules offered by the developed mobile application for visually impaired individuals include text reading, voice navigation, and location-based weather services. Consequently, this study aims to demonstrate the social impact potential of AI and image processing technologies and contribute to the development of technological solutions for the visually impaired.

Giriş

Günümüzde, dünya genelinde yaklaşık 285 milyon görme engelli birey yaşamaktadır [1]. Görme engelli bireylerin günlük yaşamlarında karşılaştıkları zorlukların başında, sosyal yardım olmadan hareket kabiliyetlerinin kısıtlı olması gelmektedir. Bu durum, görme engelli bireylerin eğitim, istihdam ve genel yaşam kalitesi üzerinde önemli etkilere sahip olabilmektedir. Günümüz bilişim dünyasındaki ilerlemeler, görme engelli bireylerin karşılaştıkları bu problemin üstesinden gelmek için umut vaat eden yollar sunmaktadır. Özellikle yapay zekâ (AI) ve görüntü işleme gibi alanlarda kaydedilen gelişmeler, görme engelli bireylerin hayatlarını kolaylaştırma potansiyeline sahiptir.

Yapay zekâ ve görüntü işleme, son birkaç on yılda kayda değer ilerlemeler göstermiştir. Bu teknolojiler, öncelikle akademik araştırma çevrelerinde teorik kavramlar olarak ortaya çıkmış ve zamanla pratik uygulamalara dönüşmüştür. Görüntü işleme, bilgisayar sistemlerinin görüntüleri algılaması ve işlemesi için gerekli teknikleri içerirken, yapay zekâ, makinelerin öğrenmesi ve problem çözme yeteneklerini geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu iki alanın birleşimi, özellikle görme engelliler için büyük fırsatlar sunmaktadır.

Görme engelliler için geliştirilen teknolojik çözümler, basit sesli geri bildirim sistemlerinden karmaşık nesne tanıma ve çevresel algılama teknolojilerine kadar uzanmaktadır. Bu teknolojiler, görme engellilerin çevreleri hakkında daha fazla bilgi edinmelerini, günlük görevleri daha bağımsız bir şekilde yerine getirmelerini ve sosyal etkileşimlerini artırmalarını sağlamaktadır. Örneğin, geliştirilen yapay zekâ destekli uygulamalar, bireyin çevresindeki nesnelere tanımlayabilir ve sesli komutlar aracılığıyla bilgi sağlayabilir, bu da onların çevrelerini daha iyi anlamalarına ve günlük aktivitelerini iyileştirmelerine yardımcı olabilir.

Bu çalışmanın amacı, görme engelli bireylerin karşılaştığı günlük zorlukları hafifletmek için yapay zekâ ve görüntü işleme tekniklerinin nasıl kullanılabileceğine bir örnek sunmaktır. Çalışma, sesli komutlarla kontrol edilebilen ve kullanıcıları geri bildirim sağlayan bir mobil uygulamanın geliştirilmesini içermektedir. Geliştirilen uygulamanın en önemli bileşeni, kamera üzerinden anlık nesne tanımadır. Söz konusu modül kullanıcının sesli komutu ile çalışmaya başlamakta, ortamdaki nesnelere dinamik olarak sınıflandırıp etiketlemekte, kullanıcıya göre konumlarını (sağda, sol altta, orta üstte vb) tespit etmekte ve tüm bu bilgileri sesli olarak kullanıcıya iletmektedir. Geliştirilen uygulamada, nesne tanıma modülü için MobileNetV2 modeli kullanılmıştır. Söz konusu modelin neden tercih edildiği ve diğer nesne tanıma modelleri ile detaylı karşılaştırması ilerleyen bölümlerde sunulacaktır. Geliştirilen uygulamanın bir diğer bileşeni ise, otomatik metin tanıma ve sesli şekilde metnin kullanıcıya okunmasıdır. Bu sayede görme engelli bireyler, telefonlarının kameraları aracılığı ile etraflarındaki metinleri kolaylıkla tespit edip dinleyebileceklerdir.

Literatürde görme engelli bireylere yönelik geliştirilmiş yapay zekâ ve görüntü işleme tabanlı uygulamaları konu alan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ouali ve arkadaşları [2] tarafından geliştirilen bu çalışma, derin öğrenme teknikleri

kullanarak görme engelli bireyler için bir metin okuma modülü sunmaktadırlar. Nasser ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [3], görme engelli bireylerin mobilite ihtiyaçlarını karşılamak için Yapay Zekâ ve IoT (Nesnelere İnterneti) teknolojilerini kullanan bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Medronha ve arkadaşları tarafından LERMO[4] isminde, işaret dili tanıma konusunda makine öğrenmesi ve yapay zekâ tekniklerini kullanan bir web oyunu geliştirmişlerdir. Lima vd. tarafından yapılan çalışmada ise [5], görme engelli bireylerin konumlarını ve çevrelerindeki yer işaretlerini tanımlamalarına yardımcı olmak için yapay zekâ tabanlı bir mobil uygulama geliştirmiştir. Chinchole ve Patel tarafından geliştirilen sistemde [6], görme engelliler için düşük maliyetli bir yardımcı sistem geliştirmeyi amaçlamaktadır. Naqvi ve arkadaşları çalışmalarında [7], görme engelli bireylerin bağımsız hareket edebilmeleri için OpenCV ve TensorFlow API kullanılarak Raspberry Pi üzerinde çalışan bir sistem geliştirmişlerdir. Won ve arkadaşları [8] çalışmalarında görme engelli bireyler için nesne tespiti ve tanıma amacıyla MobileNetV1 ve Faster R-CNN derin öğrenme modellerini kullanmışlardır.

Bu çalışma, görme engelli bireylerin günlük yaşamda karşılaştıkları zorlukları hafifletmek ve onların bağımsız hareket kabiliyetlerini artırmak amacıyla yenilikçi bir mobil uygulama sunarak literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. Mevcut literatürde, görme engellilere yönelik teknolojik çözümler genellikle tek bir işlevle sınırlı kalırken, bu çalışma nesne tanıma, metin okuma, sesli navigasyon ve konum tabanlı hava durumu hizmetlerini entegre eden kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. MobileNetV2 modelinin nesne tanıma modülü olarak kullanılması, modelin yüksek doğruluk oranları ve mobil cihazlar için optimize edilmiş yapısı sayesinde uygulamanın etkinliğini artırmaktadır. Bu çalışmanın motivasyonu, yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojilerinin sunduğu potansiyeli kullanarak görme engelli bireylerin yaşam kalitesini artırmak ve onların toplumsal entegrasyonunu desteklemektir. Bu bağlamda, çalışmanın bulgularının ve geliştirilen uygulamanın, görme engellilere yönelik gelecekteki teknolojik çözümler için önemli bir referans noktası olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın Materyal ve metot bölümü, uygulamanın geliştirilme sürecini ve kullanılan teknolojik araçları detaylandıracaktır. Araştırma bulguları, uygulamanın kullanıcı deneyimi üzerindeki etkisini ortaya koyacak ve tartışma bölümünde, elde edilen bulgular geniş bir bağlamda ele alınacaktır. Tartışma bölümünde, literatürdeki benzer çalışmalar ile söz konusu çalışmanın kıyaslaması yapılırken, sonuç bölümünde ise, çalışmanın önemini vurgulanacak ve gelecek araştırmalar planlanan geliştirmeler sunulacaktır.

Materyal ve Metot

Bu başlık altında çalışmanın geliştirilmesinde kullanılan geliştirme araçları, kullanılan teknolojiler, veri seti ve yapay zekâ modelleri detaylı olarak işlenmiştir.

Geliştirme Ortamları ve Araçları

Bu çalışmada geliştirilen mobil uygulama, görme engellilerin günlük yaşamlarında karşılaştıkları çeşitli zorlukları hafifletmek amacıyla tasarlanmıştır. Uygulamanın

geliştirilmesi sürecinde kullanılan ortam ve araçlar hem yazılımın verimliliğini hem de kullanıcı dostu bir arayüz sağlama hedefleri gözeticilerle seçilmiştir.

Uygulama, Android işletim sistemi için önerilen ve yaygın olarak kabul gören Kotlin programlama dili kullanılarak IntelliJ Idea ortamında geliştirilmiştir. Ayrıca derin öğrenme modellerinin eğitilmesi, test edilmesi ve metriklerin elde edilmesi işlemleri de Python programlama dili kullanılarak PyCharm ortamında gerçekleştirilmiştir.

Derin Öğrenme Tabanlı Nesne Tanıma Modelleri

Bu bölümde, görme engelli bireyler için geliştirilen mobil uygulamanın temelini oluşturan yapay zekâ (AI) ve görüntü işleme teknolojileri üzerinde durulmaktadır. Uygulamanın nesne tanıma ve metin okuma gibi işlevleri, MobileNet V2 SSD modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

MobileNet SSD, Howard ve arkadaşları tarafından önerilen derin öğrenme tabanlı bir nesne tanıma modelidir [10]. MobileNet SSD, az sayıda hesaplama ile yüksek doğrulukta nesne tanıma yeteneği sunmaktadır. Model, Evrişimli Sinir Ağları (CNN) üzerine kuruludur ve SSD (Single Shot MultiBox Detector) mimarisini kullanmaktadır. Şekil 1' de MobileNet SSD ağ mimarisi gösterilmektedir.

MobileNet, özellikle mobil ve gömülü sistemlerde kullanılmak üzere tasarlanmış olup, güç ve kaynak tüketimi yönlerinden oldukça verimlidir. MobileNet SSD, aşağıdaki denklem 1'de gösterilen çoklu çapa kutuları (anchor boxes)

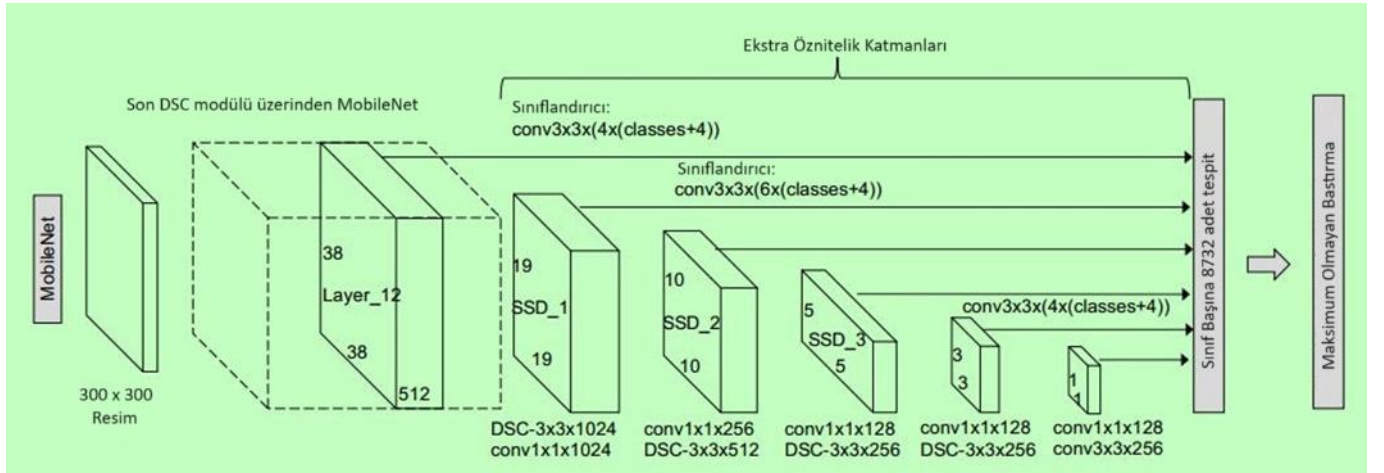
aracılığıyla nesnelerin sınıflarını ve konumlarını tahmin etmektedir:

$$L(x, c, l, g) = \frac{1}{N} (L_{conf}(x, c) + \alpha L_{loc}(x, l, g)) \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde L fonksiyonu; toplam kaybı, x; her bir tahmin kutusunu, c; sınıf olasılıklarını, g; gerçek kutu konumlarını temsil etmektedir. L_{conf} sınıflandırma kaybı, L_{loc} ise sınıf kaybıdır. N, eşleşen çapa kutusu sayısını ve α ise konum kaybının ağırlığını ifade etmektedir.

Geliştirilen uygulama, kullanıcıların çevresindeki nesnelere tanımlamalarına olanak tanıyan bir görüntü işleme sürecini içermektedir. Bu süreç, telefon kamerasının açılmasıyla başlamakta ve elde edilen görüntülerin eş zamanlı olarak TensorFlow Lite ile işlenerek MobileNet SSD modeli tarafından sınıflandırılması ile devam etmektedir. Bu model, görüntülerdeki nesnelere doğru bir şekilde sınıflandırmak ve konumlandırmak için Şekil 1' de bahsedilen SSD mimarisini kullanmaktadır.

Mobil cihazlar içerisinde gömülü olarak kullanılabilecek birçok nesne tanıma modeli bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, nesne tanıma işlevi için literatürde MobileNet V1 ve V2, VGG16, ResNet50, InceptionV3 gibi çeşitli modeller kullanılmıştır. Tablo 1' de bu çalışmada kullanılan MobileNetV2 modelinin literatürdeki diğer modeller ile karşılaştırılması gösterilmektedir [9].



Şekil 1. MobileNet SSD mimarisi [11]

Tablo 1. MobileNet SSD modellerinin diğer nesne tanıma modelleri ile karşılaştırılması

Özellik / Kriter	MobileNet V1	MobileNet V2	VGG16	ResNet-50	Inceptionv3
Model Boyutu (MB)	~16 MB	~14 MB	~528 MB	~98 MB	~92 MB
Hesaplama Maliyeti (FLOPs)	~569 Milyon	~300 Milyon	~15.5 Milyar	~3.8 Milyar	~5.7 Milyar
Bellek Kullanımı	Düşük (~500MB veya daha az)	Düşük (~500MB veya daha az)	Yüksek	Orta	Orta
Enerji Verimliliği	Yüksek (Mobil cihazlar için uygun)	Yüksek (Mobil cihazlar için uygun)	Düşük (Yüksek güç tüketimi)	Düşük (Yüksek güç tüketimi)	Düşük (Yüksek güç tüketimi)
Hız	Yüksek (Hızlı çıkarım ve eğitim süresi)	Yüksek (Hızlı çıkarım ve eğitim süresi)	Düşük (Yavaş çıkarım ve uzun eğitim süresi)	Düşük (Yavaş çıkarım ve uzun eğitim süresi)	Düşük (Yavaş çıkarım ve uzun eğitim süresi)
Uygulama Alanı	Mobil / Gömülü Sistemler	Mobil / Gömülü Sistemler	Genel Amaç	Genel Amaç	Genel Amaç

MobileNet V1 ve V2 modellerinin en temel avantajı, yüksek hesaplama ve bellek verimliliği ile birlikte makul seviyede doğruluk sağlamalarıdır. Bu durum, MobileNet modellerini, mobil cihazlarda gerçek zamanlı nesne tanıma gibi görevler için ideal bir seçim haline getirmektedir. Diğer yandan, VGG, ResNet ve Inception gibi modeller, genellikle yüksek doğruluk oranları elde etmek amacıyla, daha büyük model boyutları ve daha yüksek hesaplama maliyeti gibi dezavantajlar barındırmaktadır. Mobil bir uygulama içerisinde nesne tanıma işlevi için tercih edilecek modelde hem başarı oranı yüksek olmalı, hem de kaynak ve enerji tüketimi minimum seviyede tutulmalıdır. Bu bilgiler ışığında, akıllı telefonlar gibi kaynakların ve enerjinin kısıtlı olduğu durumlarda, MobileNet modelleri diğer modellere göre daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

MobileNet V1 ve V2' nin yukarıda listelenen yönlerden dolayı tercih edilmesi sonrasında, iki model arasında hangisinin uygulama içerisine entegre edileceği konusu gündeme gelmiştir. MobileNet V1 ve MobileNet V2 benzer işlevler için tasarlanmış olsa da MobileNet V2, mimari ve performans alanında önemli iyileştirmeler içermektedir. Bu geliştirmeler, onu mobil cihazlarla gerçekleştirilen daha zorlu ve karmaşık görevler için daha uygun bir seçenek haline getirmektedir. Fakat her iki modelden hangisinin tercih edileceğini belirlemek için yine literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Tablo2' de literatürde MobileNet V1 ve MobileNet V2 modellerini çeşitli yönlerden karşılaştıran çalışmalar ve tespit ettikleri en iyi performans gösteren modeller listelenmektedir. Söz konusu çalışmalar incelendiğinde MobileNet V2' nin MobileNet V1'e göre birçok yönden üstün olduğu görülmüştür.

Yine de söz konusu iki model arasında hangisinin nesne tanıma için kullanılacağını belirlemek adına, her iki model tarafımızca içerisindeki örnek sayısı artırılmış Pascal VOC veri seti üzerinde eğitilmiş, başarı oranları ve diğer metrikler karşılaştırılmıştır. Söz konusu işlemde kullanılan veri seti 2.3 numaralı başlık altında, elde edilen başarı oranları, diğer

metrikler ve karmaşıklık matrisleri ise Araştırma bulguları başlığı altında sunulmuştur.

Tablo 2. MobileNet V1 ve MobileNet V2 modellerinin karşılaştırılması

Çalışma	Karşılaştırılan Modeller	En İyi Performans Gösteren Model
Rahmat, 2024 [12]	SSD MobileNet V1 vs. SSD MobileNet V2	SSD MobileNet V2
Fikri vd. [13]	SSD MobileNet V1 vs. SSD MobileNet V2	SSD MobileNet V2
Salim vd. [14]	SSD MobileNet V1 vs. SSD MobileNet V2	SSD MobileNet V2
Ramos ve Magwili [15]	SSD MobileNet V1 vs. SSD MobileNet V2	SSD MobileNet V2

Veri Seti

Görme engelliler için geliştirilen mobil uygulamanın nesne tanıma modülünde hangi modelin kullanılacağını tespit etmek için literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve bir önceki başlıkta sunulmuştur. MobileNet V1 ve V2' nin modellerinin diğer modellere göre öne mobil uygulamalarda kullanılmak için öne çıktığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında hangi MobileNet modelinin kullanılacağını belirlemek için her iki model genişletilmiş Pascal VOC veri seti üzerinde tekrar eğitilmiş ve test edilmiştir.

Pascal VOC (Visual Object Classes) veri seti, bilgisayarla gözü ve makine öğrenmesi alanlarında nesne tanıma tekniklerinin değerlendirilmesi için geniş çapta kullanılan bir veritabanıdır. Everingham ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu veri seti, ilk olarak 2005 yılında sunulmuş ve 2012 yılına kadar her yıl güncellenmiştir [16]. Veri seti, geniş bir yelpazede nesne sınıflarını kapsar ve görüntülerde nesne tespiti, sınıflandırma ve segmentasyon görevleri için zemin gerçeği etiketleri ile sunulur. Pascal VOC veri seti, 20 farklı nesne sınıfını içerir. Bunlar arasında insanlar, hayvanlar (kedi, köpek, kuş gibi), araçlar (araba, bisiklet, motosiklet gibi) ve iç mekân nesnelere (sandalye, masa gibi) bulunmaktadır. Her bir görüntü için, nesnelere sınırlayıcı kutular (bounding box) ile etiketlenmiştir, bu da nesne tespiti algoritmalarının eğitimi ve testi için ideal bir yapı sağlar. Bu çalışmada, Pascal VOC veri seti sınıflarındaki örnek sayıları artırılmış ve ortaya genişletilmiş bir veri seti çıkmıştır.

TextRecognizer

Bu çalışmada, görme engelli kullanıcıların çevrelerindeki yazıları telefon kamerası üzerinden tespit etmeleri ve sesli olarak dinleyebilmeleri için Google Mobile Vision API'nın TextRecognizer özelliği ile Android TextToSpeech API kullanılmıştır.

Google tarafından geliştirilen Mobile Vision API, görüntüler içerisinde yer alan metinleri tanıma ve dijital metin olarak çıkarma yeteneği sağlar [17]. Bu çalışmada kullanılan TextRecognizer, kamera tarafından alınan görüntüler üzerinde gerçek zamanlı olarak metin tespiti yapmak için kullanılmıştır. TextRecognizer, farklı dillerde ve yazı tiplerinde etkili bir şekilde metin tanıma kapasitesine sahiptir, bu da onu çok yönlü ve erişilebilir uygulamalar için ideal kılar [18].

Metin tanıma işleminden sonra, elde edilen metinlerin sesli olarak ifade edilmesi için Android'in yerleşik TextToSpeech (TTS) özelliği kullanılmıştır. Bu teknoloji, metinleri doğal dilde sesli söze dönüştürmek için çeşitli dil ve lehçe desteği sunar ve kullanıcıların metin içeriğini dinleyerek anlamalarına olanak tanır. TTS, kullanıcının bağımsızlığını artırmak ve görsel olarak erişilemeyen bilgilere erişim sağlamak için kritik bir teknolojidir [19].

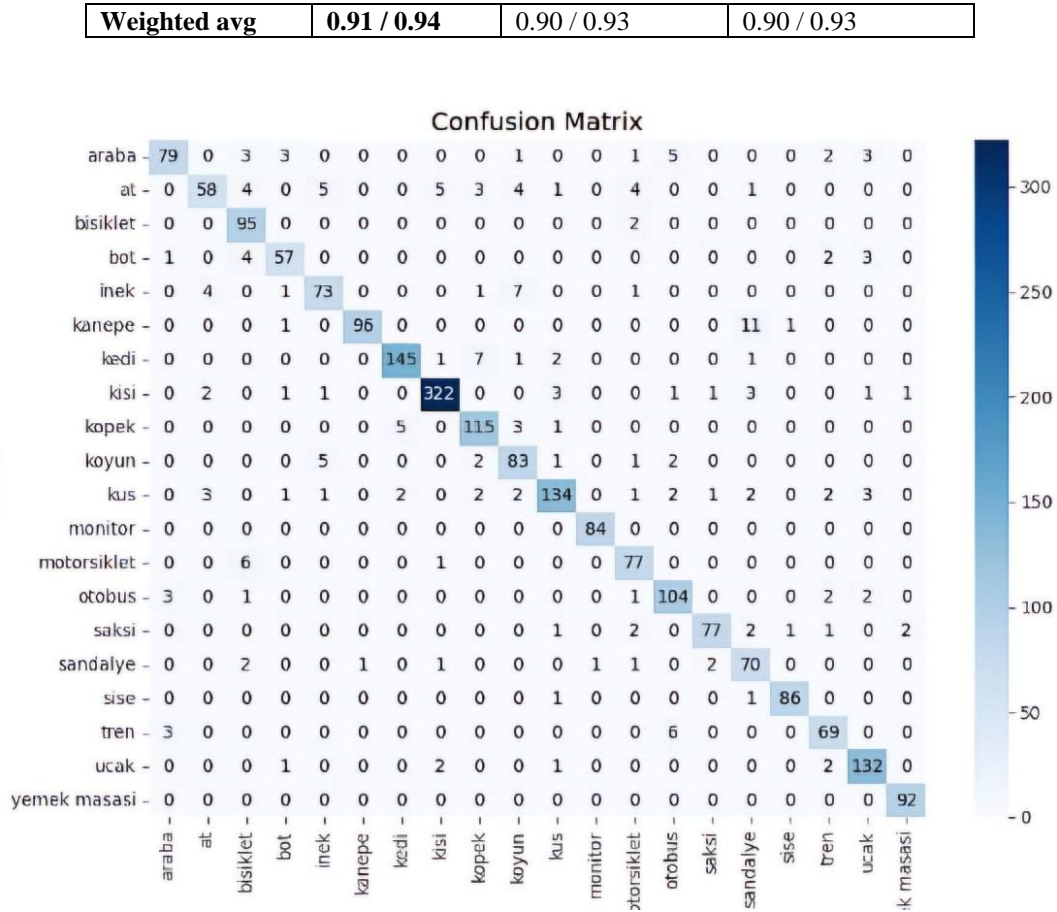
Araştırma Bulguları

Bu bölümde ilk olarak, materyal metot başlığı altında anlatılan veri seti ve modeller kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma işlemleri sunulmuştur. Daha sonra ise, elde edilen sonuçlar sonrasında tasarlanan mobil uygulamanın algoritması ve sahip olduğu modüllerin geliştirilme süreci de detaylı olarak işlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında ilk olarak genişletilmiş Pascal VOC veri seti üzerinde MobileNet V1 ve MobileNet V2 modellerinin eğitilmesi ve test edilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk işlemde; veri seti %80 eğitim, %20 test olarak ayrılmıştır. Her iki model için de epoch değeri 20 olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen test işlemi sonrasında MobileNet V1 modelinden %91, MobileNet V2 modelinden ise %94 doğruluk oranı elde edilmiştir. Tablo 3'de söz konusu sınıflandırma işleminin her sınıf için başarı oranı ve metrik değerleri gösterilmektedir. Tablo 3'de gösterilen veriler incelendiğinde MobileNet V1 modeli en yüksek doğruluk oranını %96 ile monitör sınıfından elde ederken, en düşük doğruluk oranını %72 ile bot sınıfından elde etmiştir. MobileNet V2 modeli ise en yüksek doğruluk oranını %100 ile Monitör ve yemek masası sınıflarından elde ederken, en düşük doğruluk oranını %84 tren sınıfından elde etmiştir. Gerçekleştirilen sınıflandırma işleminin karmaşıklık matrisi ise Şekil 2'de gösterilmektedir.

Tablo 3. Veri setinin %80 eğitim, %20 test olarak ayrılması sonucunda elde edilen metrikler

Class	MobileNet V1 / MobileNet V2		
	Precision	Recall	F1-score
Araba	0.94 / 0.85	0.88 / 0.98	0.91 / 0.91
At	0.82 / 0.95	0.84 / 0.80	0.83 / 0.87
Bisiklet	0.96 / 0.96	0.90 / 0.98	0.93 / 0.97
Bot	0.72 / 0.78	0.81 / 0.90	0.76 / 0.83
İnek	0.92 / 0.74	0.76 / 1	0.83 / 0.85
Kanepe	0.92 / 0.96	0.91 / 0.94	0.91 / 0.95
Kedi	0.92 / 0.98	0.93 / 0.91	0.93 / 0.94
Kişi	0.96 / 0.96	0.97 / 0.98	0.97 / 0.97
Köpek	0.87 / 0.90	0.88 / 0.88	0.88 / 0.89
Koyun	0.85 / 0.97	0.92 / 0.78	0.88 / 0.86
Kuş	0.85 / 0.91	0.85 / 0.90	0.85 / 0.90
Monitör	0.96 / 1	1 / 0.98	0.98 / 0.99
Motorsiklet	0.89 / 0.97	1 / 0.90	0.94 / 0.94
Otobüs	0.91 / 0.95	0.89 / 0.93	0.90 / 0.97
Saksı	0.89 / 0.97	0.95 / 0.97	0.92 / 0.97
Sandalye	0.89 / 0.83	0.70 / 0.86	0.79 / 0.86
Şişe	0.91 / 0.98	0.95 / 1	0.93 / 1
Tren	0.94 / 0.93	0.81 / 0.84	0.87 / 0.88
Uçak	0.87 / 0.95	0.93 / 0.94	0.90 / 0.94
Yemek Masası	0.96 / 1	1 / 1	0.98 / 1
Macro avg	0.90 / 0.93	0.89 / 0.93	0.89 / 0.93



Şekil 2. Veri setinin %80 eğitim, %20 test olarak ayrılması ile gerçekleştirilen sınıflandırma işleminin karmaşıklık matrisi

Veri setinin oransal dağıtılmasından sonra gerçekleştirilen bir sonraki işlemde, K- fold (k=5) çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, veri setinin rastgele alt kümelerine bölünmesini ve her bir alt kümenin hem eğitim hem de doğrulama için kullanılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, modelin genelleştirme yeteneğini arttırmakta ve modeli aşırı uyuma (overfitting) karşı korumaktadır. 5-fold çapraz doğrulama ile gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinde de hem MobileNet V1 hem de MobileNet V2 için epoch değeri 20 olarak ayarlanmıştır. Gerçekleştirilen test işlemi sonrasında MobileNet V1 modelinden %90, MobileNet V2 modelinden ise %93 doğruluk oranı elde edilmiştir. Tablo 4' de söz konusu sınıflandırma işleminin her sınıf için ve

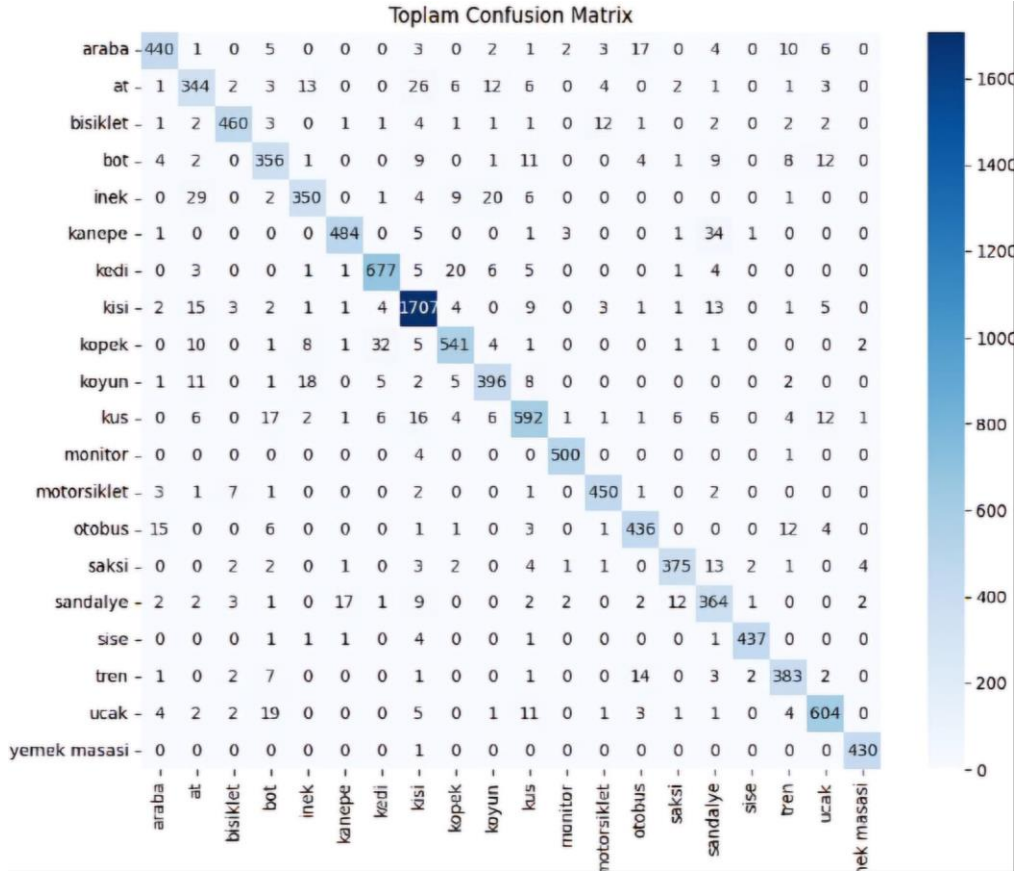
ortalama olarak başarı oranları ile metrik değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4' de gösterilen veriler incelendiğinde MobileNet V1 modeli en yüksek doğruluk oranını %100 ile yemek masası sınıfından elde ederken, en düşük doğruluk oranını %72 ile sandalye sınıfından elde etmiştir. MobileNet V2 modeli ise en yüksek doğruluk oranını %100 ile yemek masası ve monitör sınıfından elde ederken, en düşük doğruluk oranını %70 ile sandalye sınıfından elde etmiştir. 5-fold çapraz doğrulama yöntemi ve MobileNet V2 modeli kullanılarak gerçekleştirilen ve %93 ortalama başarı oranı elde edilen işleme ait karmaşıklık matrisi de Şekil 3' de gösterilmektedir.

Tablo 4. Veri setinin 5-fold validation yöntemi kullanılarak elde edilen metrikler

Class	MobileNet V1 / MobileNet V2		
	Precision	Recall	F1-score
Araba	0.95 / 0.97	0.86 / 0.95	0.90 / 0.96
At	0.73 / 0.76	0.78 / 0.81	0.75 / 0.78
Bisiklet	0.96 / 0.94	0.94 / 0.90	0.95 / 0.92
Bot	0.77 / 0.83	0.83 / 0.83	0.80 / 0.83
İnek	0.92 / 0.88	0.84 / 0.85	0.88 / 0.86
Kanepe	0.93 / 0.97	0.91 / 0.79	0.92 / 0.87
Kedi	0.95 / 0.97	0.89 / 0.93	0.92 / 0.96
Kişi	0.92 / 0.93	0.94 / 0.98	0.93 / 0.95
Köpek	0.85 / 0.94	0.87 / 0.95	0.86 / 0.95
Koyun	0.84 / 0.94	0.92 / 0.92	0.88 / 0.93
Kuş	0.91 / 0.90	0.83 / 0.96	0.87 / 0.93
Monitör	0.96 / 1	1 / 0.98	0.98 / 0.99
Motorsiklet	0.90 / 0.98	0.97 / 0.96	0.94 / 0.97

Otobüs	0.91 / 0.93	0.90 / 0.92	0.91 / 0.93
Saksı	0.97 / 0.91	0.89 / 0.93	0.93 / 0.92
Sandalye	0.72 / 0.70	0.77 / 0.85	0.74 / 0.77
Şişe	0.96 / 0.98	0.99 / 0.98	0.99 / 0.99
Tren	0.89 / 0.92	0.89 / 0.96	0.89 / 0.94
Uçak	0.87 / 0.94	0.89 / 0.86	0.88 / 0.90
Yemek Masası	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Macro avg	0.90 / 0.92	0.90 / 0.91	0.90 / 0.92
Weighted avg	0.90 / 0.93	0.90 / 0.93	0.90 / 0.93



Şekil 3. 5-fold çapraz doğrulama ile gerçekleştirilen sınıflandırma işleminin karmaşıklık matrisi

Gerçekleştirilen test işlemleri sonrasında elde edilen başarı oranlarına göre, geliştirilecek mobil uygulamanın nesne tanıma modülü için MobileNet V2' modelinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Geliştirilen mobil uygulamanın arayüzünün tasarlanmasında, görme engelli bireylerin kullanımına yönelik sade bir yaklaşım tercih edilmiştir. Şekil 4' te söz konusu arayüz tasarımı gösterilmektedir. Kullanıcının sadece ekran ortasındaki tek butona tıklaması yeterli olacaktır. Bu aşamadan sonra yürütülecek tüm işlemler, kullanıcı tarafından verilecek sesli komutlar üzerinden gerçekleştirilecektir.

Tasarlanan ana ekrandaki butona tıkladığında "Dinleme başlatılıyor, konuşun" mesajı sesli olarak kullanıcıya sunulur. Bu aşamadan sonra kullanıcı tarafından yapılacak konuşma beklenmeye başlanır. Kullanıcı tarafından gelecek talepler doğrultusunda ilgili sınıf çağrılır ve çalıştırılır. Şekil 5' de kullanıcı tarafından verilecek sesli komutlarda kullanılacak

kelime örüntüleri ve ilgili sınıfın çağrılması gösterilmektedir. Şekil 5' de gösterilen kelime örüntüleri örnek olup, istenmesi durumunda sayısı ve çeşitliliği kolaylıklar artırılabilir.



Şekil 4. Mobil Uygulama Arayüzü

Kullanıcı tarafından sesli komutlar kullanılarak çağırılacak ilk modül nesne tanıma ve yönlendirme modülüdür.

Söz konusu modül “nesne tanıma”, “nesne”, “kamerayı aç” gibi komutlar ile çağırılmaktadır. Modül çalışmaya başladığında ilk olarak telefon kamerası açılmaktadır. Bu sayede kamera üzerinden anlık olarak ortam görüntüsü alınmaktadır. Alınan görüntülerde yer alan nesnelere eş zamanlı olarak MobileNetV2 modeli tarafından

sınıflandırılmaktadır. Nesne tespit edildikten sonra, söz konusu nesnenin konumu belirlenmektedir. Türü ve konumu belirlenen nesneye ait bilgiler daha sonra TextToSpeech özelliği sayesinde kullanıcıya sesli olarak bildirilmektedir. Bu işlem sayesinde görme engelli bir kullanıcı, bulunduğu ortamda yer alan nesnelere ve bu nesnelere konumlarını öğrenebilecektir. Şekil 6’ da MobileNet V2 tarafından tespit edilen bir nesnenin konumunun belirlenmesi için yazılmış kodlar gösterilmektedir.

```

val result = results.getStringArrayList(SpeechRecognizer.RESULTS_RECOGNITION)
result?.let {
    val spokenText = it[0]
    when (spokenText) {
        "nesne tanıma", "nesne", "tanıma", "kamerayı aç" -> {
            speakText("Kamerayı açarak nesnelere tanıma başlıyorum.")
            val intent = Intent(this@MainActivity, CameraActivity::class.java)
            startActivity(intent)
        }
        "metni oku", "yazı", "okuma", "metin okuma" -> {
            speakText("Kamerayı açarak metin okuma işlevini başlatıyorum.")
            val intent = Intent(this@MainActivity, ReadActivity::class.java)
            startActivity(intent)
        }
        "yardım" -> {
            speakText("Yardım sayfasına yönlendiriyorum.")
            val intent = Intent(this@MainActivity, HelpActivity::class.java)
            startActivity(intent)
        }
        "hava", "hava durumu", "bugün hava", "bugün hava nasıl" -> {
            speakText("Hava durumu sayfasına yönlendiriyorum.")
            val intent = Intent(this@MainActivity, WeatherActivity::class.java)
            startActivity(intent)
        }
        "konum", "neredeyim", "harita", "yol tarifi" -> {
            speakText("Harita sayfasına yönlendiriyorum.")
            val intent = Intent(this@MainActivity, MapActivity::class.java)
            startActivity(intent)
        }
        else -> {
            speakError()
        }
    }
}

```

Şekil 4. Anasayfa İşlev Butonu Arkayüzü

Nesne tanıma modülü, telefon kamerası aracılığı ile görüş alanı içindeki nesnelere tanımasının yanı sıra, kullanıcı tarafından spesifik olarak aranan ürünü de tespit etmekte ve kullanıcıyı nesneye doğru yönlendirmektedir. Bu işlemde kullanıcının konuşmasını tanımak startSpeechRecognition() fonksiyonu kullanılır. Kullanıcının sesli komutundan tespit edilen nesne ismi uygulama içerisinde tanımlı nesne etiketleriyle karşılaştırılır ve eşleşme durumuna göre kullanıcıya geri bildirim sağlanır. Örneğin, kullanıcı “bardak” nesnesini arıyor olsun. “Bardak arıyorum” şeklinde vereceği komut içerisinde bardak etiketi belirlenecek ve kamera

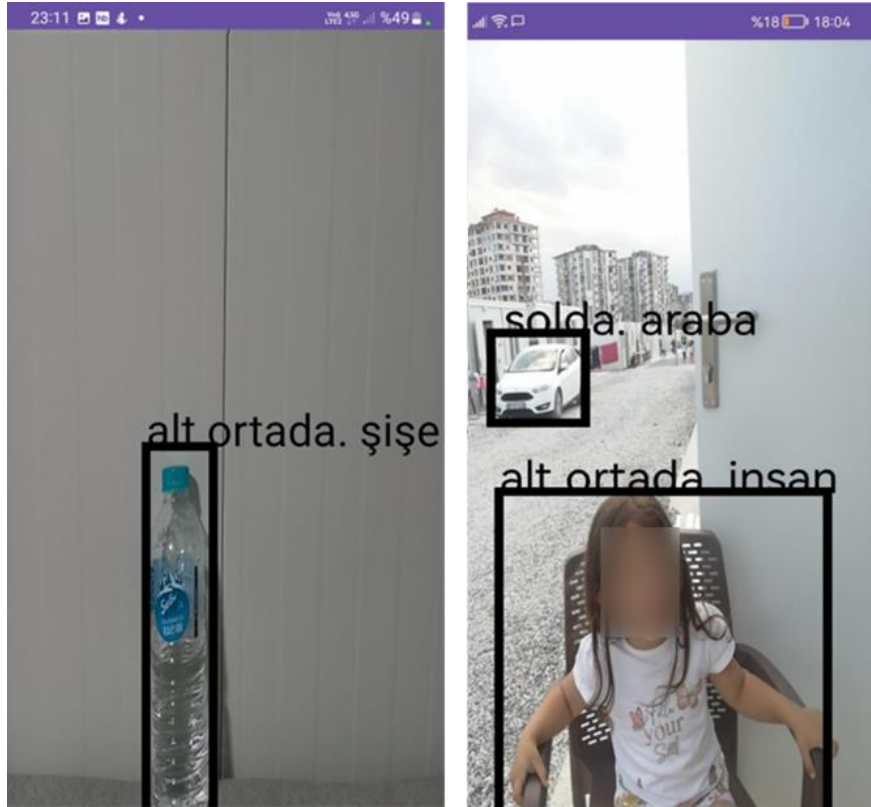
aracılığı ile ortam içerisinde aranacaktır. Bu esnada kullanıcıya "Nesneyi arıyorum: bardak" şeklinde sesli bir mesaj verilecektir. Aranan nesne bulunan ortam içerisinde tespit edildiğinde, konumu kullanıcıya sesli olarak aktarılacaktır. (Örnek: “Bardak, sol altta” şeklinde sesli bir uyarı verilecektir). Geliştirilen bu modülün, görme engelli bireylere günlük ihtiyaçlarını görmede oldukça yardımcı olacağı düşünülmektedir. Şekil 7’ de söz konusu modül kullanılarak ortamdaki nesnelere tanınması ve etiketlenmesi gösterilmektedir.

```

val labelIndex = classes[index].toInt()
canvas.drawRect(
    RectF(
        locations[x + 1] * w,
        locations[x] * h,
        locations[x + 3] * w,
        locations[x + 2] * h
    ), paint
)
paint.style = Paint.Style.FILL
val centerX = (locations[x + 1] + locations[x + 3]) * w / 2
val centerY = (locations[x] + locations[x + 2]) * h / 2
// Genişlik(yatay) belirlenir
val W_pos = when {
    centerX <= w / 3 -> "solda"
    centerX <= w / 3 * 2 -> "ortada"
    else -> "sağda"
}
// Yükseklik(dikey) belirlenir
val H_pos = when {
    centerY <= h / 3 -> "üst"
    centerY <= h / 3 * 2 -> ""
    else -> "alt"
}
val label = labels[labelIndex]
val positionText = "$H_pos $W_pos. $label"
canvas.drawText(positionText, locations[x + 1] * w, locations[x] * h, paint)
speechTexts.add("$H_pos $W_pos. $label") // Metni listeye ekle
}
}

```

Şekil 6. Nesne Tanıma Modülü- Tespit Edilen Nesnenin Konumunun belirlenmesi

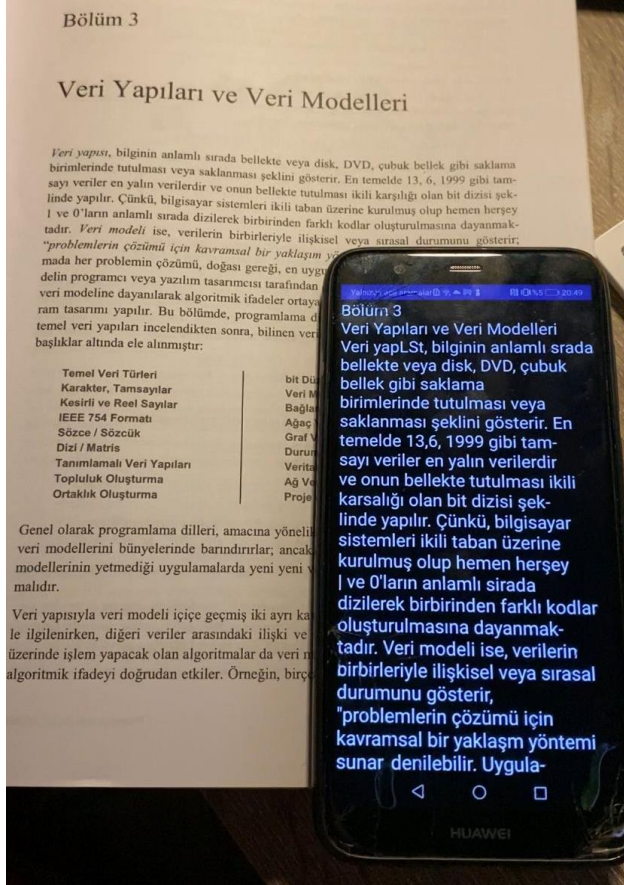


Şekil 7. Nesne Tanıma Modülü ile Ortamdaki Nesnelerin ve Konumlarının Tespiti

Geliştirilen uygulamanın görme engelli bireyler için sunduğu hizmetlerden biri de telefon kamerası aracılığı ile tespit ettiği metinleri otomatik olarak tanınması ve sesli olarak okumasıdır.

Metin okuma modülü, telefon kamerası aracılığı ile tespit edilen metni TextToSpeech özelliğini kullanarak kullanıcıya sesli olarak okumaktadır. Kullanıcının ana ekranda iken "yazıyı oku" ya da "metni oku" şeklinde sesli olarak direktif vermesi, söz konusu modülün çalışması için yeterlidir. Modül çalışmaya başladığında ilk olarak telefon kamerası açılacak ve ortamdaki metinler taranmaya başlanacaktır. Kameranın görüş alanı içerisinde bir metin tespit edildiğinde, Google TextRecognizer API' ı tarafından tespit edilecek, karakterler tanınacak ve metin haline dönüştürülecektir. Elde edilen metin, bu kez Android tarafından geliştirilen texttoSpeech özelliği sayesinde sesli olarak kullanıcıya okunmaya başlanacaktır.

Geliştirilen bu modül sayesinde görme engelli bireylerin çevrelerindeki metinleri hızlı bir şekilde anlamaları ve bilgiye kolaylıkla erişmelerini amaçlanmıştır. Örnek vermek gerekirse, görme engelli bireyler markette iken ürünlerin üzerindeki etiketleri okuyarak alışveriş yapabilir veya restoranda menüyü sesli olarak dinleyerek seçim yapabileceklerdir. Bu modül ile, kullanıcıların bağımsızlık seviyelerini arttırmaları ve kendi ihtiyaçlarını karşılama becerilerini güçlendirmeleri amaçlanmıştır. Şekil 8' de metin okuma modülü kullanılarak, ortam içerisinde yer alan metinlerin telefon kamerası aracılığı ile tespit edilmesi ve daha sonra kullanıcıya okunması gösterilmektedir.



Şekil 8. Metin Okuma Modülü ile Ortamdaki Metinlerin Tanınması

Bu çalışma kapsamında geliştirilen mobil uygulama, belirtilen başlıca özelliklerinin yanında, hava durumu sorgulama ve navigasyon modüllerine de sahiptir. Hava durumu sorgulama modülünde kullanıcı, "hava durumu" ya da hava durumunu söyle" gibi komutlar ile ilgili modülü aktifleştirmektedir. Söz konusu modül daha sonra kullanıcının konumunu belirledikten sonra, ilgili konuma ait hava durumu bilgisini kullanıcıya sesli olarak iletmektedir. Navigasyon modülünde ise, kullanıcı gitmek istediği konumu sesli olarak bildirmekte, daha sonra ilgili konuma en kısa yürüyüş yolu belirlenmekte ve yol tarifi sesli olarak kullanıcıya sunulmaktadır. Özetlenecek olursa bu bölüm altında sunulan uygulama; nesne tanıma, metin okuma, hava durumu sorgulama ve navigasyon olmak üzere 4 temel modüle ayrılabilir. Her bir modül, kullanıcının sesli direktifleri doğrultusunda çalıştırılmakta, sunulan tüm bilgiler kullanıcıya yine sesli olarak iletilmektedir. Geliştirilen mobil uygulama sahip olduğu kullanıcı dostu ara yüz ve farklı amaçlar için geliştirilmiş modülleri sayesinde görme engelli bireylerin yaşamlarını kolaylaştırmayı amaçlamaktadır.

Tartışma

Bu çalışma kapsamında geliştirilen mobil uygulama, nesne tanıma, metin okuma, sesli navigasyon ve konum tabanlı hava durumu hizmetlerinde yüksek doğruluk oranları ve kullanıcı dostu arayüzü ile başarılı sonuçlar elde etmiştir. MobileNetV2 modelinin entegre edilmesi sayesinde uygulama, hızlı ve enerji verimli bir şekilde çalışarak görme engelli bireylerin günlük yaşamını önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Geliştirilmiş mobil uygulama, görme engelli bireyler için geliştirilen derin öğrenme tabanlı akıllı asistan uygulamasıyla literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmalar genellikle tek bir işlevi yerine getirirken, bu çalışma nesne tanıma, metin okuma, sesli navigasyon ve konum tabanlı hava durumu hizmetlerini entegre eden kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Ouali ve arkadaşlarının çalışması [2], görme engelli bireyler için metin okuma deneyimini artırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada artırılmış gerçeklik (AR) teknolojisi kullanılarak metinlerin daha erişilebilir hale getirilmesi sağlanmıştır. Yazarların sundukları yöntemde görme engelli bireyler, AR ile tespit edilen metinleri sadece dinlemekle kalmamakta aynı zamanda konumlarını da öğrenebilmektedirler. Bu makale çalışmasında geliştirilen mobil uygulama ise kamera açısı içerisinde tespit edilen metinleri engelli birey için seslendirmesinin yanında, nesne tanıma gibi çeşitli modülleri de barındırmaktadır. Nasser ve arkadaşlarının çalışması [3], görme engelli bireylerin mobilite ihtiyaçlarını karşılamak için yapay zekâ ve IoT teknolojilerini kullanan bir mobil uygulamanın geliştirmişlerdir. Geliştirilen uygulamanın işlevi örneklenecek olursa; bir kullanıcı yürürken önünde bir engel ile karşılaştığında, sensörler ve yapay zeka tarafından işlenen bilgiler doğrultusunda engel tanınmakta ve kullanıcıya sesli bir uyarı gönderilmektedir. Bizim çalışmamız da benzer şekilde yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojilerini entegre

ederek görme engelli bireylerin bağımsız hareket kabiliyetlerini artırmayı hedeflemektedir, ancak söz konusu çalışmadan farklı olarak çoklu modüller içermektedir. Medronha ve arkadaşları [4], işaret dili tanıma konusunda makine öğrenmesi ve yapay zekâ tekniklerini kullanan LERMO isminde bir web oyunu geliştirmişlerdir. LERMO, işaret dili hareketlerini tanımlamak ve analiz etmek için derin öğrenme algoritmalarını kullanır. Kullanıcılar, oyunu oynarken çeşitli işaret dili hareketlerini yapar ve bu hareketler, web kamerası aracılığıyla algılanır ve analiz edilir. Oyun, kullanıcının doğru hareketler yapmasını teşvik eden geri bildirimler sağlar ve doğru yapılan hareketler puanlanır. Bu sayede, kullanıcılar eğlenceli bir şekilde işaret dili becerilerini geliştirebilirler. Bizim çalışmamız ise söz konusu çalışmadan farklı olarak doğrudan görme engelli bireylerin günlük yaşamlarını iyileştirmeye odaklanmakta ve çeşitli fonksiyonlar sunmaktadır. Lima ve arkadaşlarının çalışması [5], görme engelli bireylerin konumlarını ve çevrelerindeki yer işaretlerini tanımlamalarına yardımcı olmak için yapay zekâ kullanan bir mobil uygulama geliştirmiştir. Söz konusu çalışmada yapay zekâ algoritması olarak ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) kullanılmıştır. Geliştirilen sistem, kullanıcının telefon kamerası aracılığıyla çevresindeki yer işaretlerini algılamakta ve analiz etmektedir. Chinchole ve Patel'in çalışması [6], görme engelliler için düşük maliyetli bir yardımcı sistem geliştirmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen sistem, yapay zekâ ve çeşitli sensörler kullanarak görme engelli bireylerin çevrelerinde bağımsız bir şekilde gezinmelerine yardımcı olmaktadır. Gerçek zamanlı görüntü tanıma, çarpışma tespiti ve engel algılama gibi görevleri yerine getiren bu sistem, akıllı telefon uygulamaları ve sensör entegrasyonu ile desteklenmektedir. Sistem, kullanıcının çevresindeki nesnelere ve engelleri algılayarak bunlar hakkında anında geri bildirim sağlar. Örneğin, bir engel algılandığında, kullanıcıya sesli bir uyarı gönderilir ve engelin konumu hakkında bilgi verilir. Yukarıda bahsedilen iki çalışmadan farklı olarak, tarafımızda geliştirilmiş uygulama görme engelli bireylerin buldukları ortamda yer alan nesnelere tespit edilmesi ve bireylerin bu nesnelere yönlendirilmesini hedef almaktadır. Naqvi ve arkadaşları [7] Raspberry Pi üzerinde MobilenetV2 tabanlı bir nesne tanıma sistemi geliştirmişlerdir. Söz konusu sistemde bir nesne tespit edildiğinde görme engelli bireye sesli olarak bildirim sağlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen mobil uygulamada ise, bir nesne tespit edildiğinde, görme engelli bireye söz konusu nesnenin konumu da bildirilmektedir. Won ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada MobileNet V1 ve Faster R-CNN modellerinin nesne tanıma işlevi üzerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada MobileNet V1 'in daha hızlı, Faster R-CNN modelinin ise daha başarılı sonuçlar verdiğine değinilmiştir. Bu çalışmada ise MobileNet V2 modeli bir mobil uygulama içerisine dahil edilmiş ve bu sayede görme engelli bireyler için nesne tanıma ve konum belirleme tabanlı bir çözüm sunulmuştur.

Sonuç olarak, literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında bu çalışma, geliştirilen mobil

uygulama sayesinde; nesne tanıma, nesne konumu belirleme, metin tanıma ve okuma, hava durumu bilgisi sunma gibi birçok modülü tek çatı altında toplamayı başarmıştır. Bu yönü ile geliştirilen uygulama, görme engelli bireylerin çevreleriyle daha etkili bir şekilde etkileşim kurmalarını sağlayarak günlük yaşamlarını önemli ölçüde iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, sunulan çalışmanın, görme engellilere yönelik gelecekteki teknolojik çözümler için önemli bir referans noktası oluşturacağı düşünülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, görme engelli bireylerin günlük yaşamını kolaylaştırmak amacıyla geliştirilen kapsamlı bir mobil uygulama incelenmiştir. Uygulama, sahip olduğu çoklu işlevselliği ile öne çıkmaktadır. Nesne tanıma, nesnelere konumlandırılması, metin okuma, hava durumu bilgisi ve navigasyon özelliklerini tek bir platformda birleştirmektedir. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, görme engelli bireylere yönelik olarak geliştirilmiş, söz konusu 4 modülü içeren kapsamlı bir uygulama ile karşılaşmamıştır. Bu durum söz konusu çalışmanın özgün yanlarından birini oluşturmaktadır. Geliştirilen uygulamanın sahip olduğu modüller, kullanıcıların çevreleriyle daha etkili bir şekilde etkileşim kurmalarını sağlayarak, günlük yaşamlarını önemli ölçüde iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Uygulamanın merkezinde yer alan MobileNet nesne tanıma modeli, literatürdeki diğer nesne tanıma modelleriyle karşılaştırılarak seçilmiştir. Bu model, genişletilmiş Pascal VOC veri seti üzerinde, V1 ve V2 sürümleriyle test edilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonrasında elde edilen doğruluk oranları ve metrik değerler ışığında MobileNetV2' nin geliştirilen uygulama içerisinde kullanılmasına karar verilmiştir. MobileNet V2' nin tercih edilmesi, uygulamanın hızını ve enerji verimliliğini optimize ederken aynı zamanda yüksek doğrulukla nesne tanıma yeteneğine sahip olmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, geliştirilen bu mobil uygulama, görme engelli kullanıcıların sosyal ve çevresel engelleri aşmalarına yardımcı olacak teknolojik bir köprü görevi görmektedir. Uygulama ile, kullanıcıların günlük faaliyetlerde daha bağımsız hareket etmelerine olanak tanıyarak, yaşam kalitelerini arttırmak amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışma ile, görme engelli bireyler için yenilikçi ve fonksiyonel çözümler sunarak, teknolojinin sosyal entegrasyonu ve erişilebilirlik alanlarında nasıl bir fark yaratabileceğini göstermek amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] World Health Organization. World Report On Vision. <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-vision>, January 10, 2024.
- [2] Ouali, I., Ben Halima, M., Masmoudi, N., Ayadi, M., Almuqren, L., & Wali, A. Text recuperated using ontology with stable marriage optimization technique and text visualization using AR. *Multimedia Tools and Applications*, 1-28. 2024.

- [3] Nasser, N., Ali, A. E., Karim, L., & Al-Helali, A. (2024). Enhancing Mobility for the Visually Impaired with AI and IoT-Enabled Mobile Applications. *ScienceOpen Preprints*. 2024.
- [4] Medronha, A., Lima, L., Claudio, J., & Kupssinskü, L. LERMO: A Novel Web Game for AI-Enhanced Sign Language Recognition. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2024.
- [5] Lima, R., Barreto, L., Amaral, A., & Paiva, S. Visually impaired people positioning assistance system using artificial intelligence. *IEEE Sensors Journal*, 23(7), 7758-7765. 2023.
- [6] Chinchole, S., & Patel, S. . Artificial Intelligence and Sensors Based Assistive System for the Visually Impaired People. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Sustainable Systems*. 2017.
- [7] Naqvi, K., Hazela, B., Mishra, S., & Asthana, P. (2021). Employing real-time object detection for visually impaired people. In *Data Analytics and Management: Proceedings of ICDAM* (pp. 285-299). Springer Singapore.
- [8] Won, W. C., Yong, Y. L., & Khor, K. C. (2021, September). Object Detection and Recognition for Visually Impaired Users: A Transfer Learning Approach. In *2021 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Data Sciences (AiDAS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Bianco, S., Cadene, R., Celona, L., & Napoletano, P. (2018). Benchmark analysis of representative deep neural network architectures. *IEEE access*, 6, 64270-64277.
- [10] Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., ... & Adam, H. MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint arXiv:1704.04861*. 2017.
- [11] Liu, Y., & Zhang, W. Design and simulation of precision marketing recommendation system based on the NSSVD++ algorithm. *Neural Computing and Applications*, 1-14. 2023.
- [12] Rahmat, D. P. (2024). Perbandingan Algoritma Human Detection pada Google Coral Dev Board Mini menggunakan Dataset MS COCO (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- [13] Fikri, F. I., Setianingsih, C., Saputra, R. E., Hidayat, F. P., Alfiansyah, L. Y., & Amelia, N. (Aerial Insights: Precision Cattle Monitoring Using UAV Imagery and Single Shot Detection. In *2023 6th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)* (pp. 445-450). IEEE. 2023
- [14] Salim, R., Wulandari, M., & Calvinus, Y. Weapon detection using SSD MobileNet V2 and SSD resnet 50. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2680, No. 1). AIP Publishing. 2023.
- [15] Ramos, J. P. M., & Magwili, G. V. Development of a Remotely Operated Underwater Drone for Crown-of-Thorns (COTS) Starfish Detection using Simple Convolutional Neural Network. In *2023 7th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)* (pp. 84-88). IEEE. 2023.
- [16] Everingham, M., Eslami, S. M. A., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., & Zisserman, A. (2015). The Pascal Visual Object Classes Challenge: A Retrospective. *International Journal of Computer Vision*, 111(1), 98-136. <https://doi.org/10.1007/s11263-014-0733-5>
- [17] Google. (2021). Mobile Vision API. Retrieved from <https://developers.google.com/vision>
- [18] Zhang, Y., & Ismail, M. (2019). Real-time text recognition using deep learning for mobile applications. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 65(3), 328-335.
- [19] Patel, S., & Jain, R. (2020). Advances in text-to-speech synthesis technology. *Journal of Computer Speech & Language*, 64, 24-49. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2020.101026>



Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı rüzgâr hızı ve güneş radyasyon oranına sahip bölgeler için mikro şebeke tasarımı ve karşılaştırmalı analizi

*Microgrid design and comparative analysis for regions with different wind speed and solar radiation rate*Mehmet Ali KÖPRÜ^{1*}, Dursun ÖZTÜRK², Burak Yıldırım³¹ Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, makopru@bingol.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3761-399X>² Bingöl Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, dozturk@bingol.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-8118>³ Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, byildirim@bingol.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2118-4297>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 12 Mayıs 2024
Revizyon 13 Ağustos 2024
Kabul 15 Ağustos 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Mikro şebekeler, Yenilenebilir enerji kaynakları, HOMER Pro, NPC, LCOE.

ÖZ

Geçtiğimiz on yıllar boyunca küresel enerji talebinin yaklaşık %80'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu durum hem çevre ve insan sağlığına zarar vermekte hem de fosil yakıtların sınırlı kaynaklar olması nedeniyle enerji arz güvenliğini tehdit etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) bu problemlerin iyi bir çözümü olabilir. Ancak, anlık değişebilir özellikleri nedeniyle YEK'lerin tek başına kullanılması yerine birden fazla kaynağın bir arada olduğu hibrit mikro şebekelerin (MŞ) kurulması daha uygun bir çözüm olacaktır. MŞ'lerin performansını artırmak ve kullanımını yaygınlaştırmak için literatürde yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada HOMER Pro yazılımı kullanılarak Türkiye'de rüzgâr hızı ve güneş radyasyon değerleri farklı olan Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için aynı yükü besleyen fotovoltaik (FV) paneller, rüzgâr türbini (RT), dizel jeneratör (DJ) ve batarya depolama sisteminden (BDS) oluşan bir hibrit MŞ tasarımı yapılmış olup, simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonucunda tasarlanan modellerin net bugünkü maliyet (Net Present Cost-NPC) değerleri Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için sırasıyla 153,560.53 \$, 228,718.34 \$ ve 285,946.32 \$ olarak elde edilmiştir. Seviyelendirilmiş enerji maliyet (Levelized Cost of Energy-LCOE) değeri ise aynı sırayla 0.193 \$/kWh, 0.293 \$/kWh ve 0.366 \$/kWh olarak çıkmıştır. Bu değerlere göre Çanakkale için tasarlanan modelin diğer modellerden daha üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca Çanakkale'deki modelde YEK'lerin üretim payı %94.8 ile en yüksek oranda gerçekleşmiştir. Son olarak Çanakkale ilinin sahip olduğu güçlü rüzgâr potansiyelinden dolayı modeli oluşturan bileşenlerin boyutlarının diğer illere göre daha küçük olduğu görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 May 2024
Received in revised form 13 August 2024
Accepted 15 August 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Microgrids, Renewable energy sources, HOMER Pro, NPC, LCOE.

Doi: 10.24012/dumf.1482569

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Over the past decades, approximately 80% of global energy demand has been met by fossil fuels. This situation both harms the environment and human health and threatens the security of energy supply since fossil fuels are limited resources. Renewable energy sources (RES) could be a good solution to these problems. However, due to their instantaneous changeable properties, instead of using RESs alone, establishing hybrid microgrids that combine multiple resources would be a more appropriate solution. Studies on improving the performance and increasing the adoption of hybrid micro grids (MGs) are increasing every day in the literature. In this study, using HOMER Pro software, hybrid MGs composed of photovoltaic (PV) panels, wind turbines (WT), diesel generators (DG), and battery storage systems (BSS) were designed for the Turkish provinces of Çanakkale, Diyarbakır, and Rize, which have different wind speeds and solar radiation values, to supply the same load, and the simulation results were compared. As a result of the simulation, the net present cost (NPC) of the designed models for Çanakkale, Diyarbakır, and Rize was calculated as \$153,560.53, \$228,718.34, and \$285,946.32, respectively. The levelized cost of energy (LCOE) was \$0.193/kWh, \$0.293/kWh, and \$0.366/kWh, respectively. According to these values, it can be seen that the model designed for Çanakkale was superior to the other models. Moreover, in the model for Çanakkale, the share of RES in total energy generation was the highest at 94.8%. Finally, due to the strong wind potential of Çanakkale province, it was observed that the size of the components constituting the model was smaller compared to other provinces.

Giriş

Gelişmekte olan ülkeler refah seviyelerini artırmak ve sürdürülebilir ekonomik kalkınma için sanayileşmeye önem vermektedirler. Hızla artan sanayileşmeden dolayı enerji ihtiyaçları giderek artmaktadır [1]. Artan bu enerji talebinin önemli bir kısmı fosil yakıtlar olarak bilinen kömür, petrol ve doğal gaz gibi geleneksel enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Enerji fiyatlarındaki artışlar, doğal olarak maliyet artışlarına neden olmakta, bu da ekonomileri olumsuz etkilemektedir. Ayrıca çok uzak olmayan bir gelecekte tükenmesi beklenen fosil yakıtlar, sera gazları gibi havayı kirletici emisyonlarından dolayı çevreyi olumsuz etkilerler [2]. Geleneksel yakıtların çevreye yaydıkları emisyonları azaltmak ve artan enerji talebini karşılamak için YEK'lerin kullanılması önem arz etmektedir [3]. YEK'ler güneş, rüzgâr, hidrolik ve biyokütle gibi doğada kolay erişilebilir sonsuz, doğal ve çevreci enerji kaynaklarıdır. YEK'ler, sürdürülebilir kalkınma için artan elektrik enerji talebini karşılayan ve sosyo-ekonomik faydalar sağlayan en önemli kaynaklardır [4].

Gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan Türkiye'nin, artan nüfusu ve gelişen sanayisi ile birlikte enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Enerji talebini hidroelektrik, termik, nükleer, rüzgâr, güneş santralleri gibi farklı kaynakları kullanarak karşılamaktadır. Türkiye elektrik üretiminin %44.8'ini fosil yakıtlardan, %55.2'sini YEK'lerden elde etmektedir. Ayrıca elektriği üretirken %67.7'sini yerli kaynaklar, %33.3'ünü ithal kaynaklar kullanarak gerçekleştirmektedir [5].

Türkiye coğrafik yapısı ve konumundan dolayı jeotermal, güneş, rüzgâr, biyokütle, hidroelektrik gibi YEK'ler bakımından önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye'de kurulabilecek rüzgâr elektrik santrallerinin toplam kapasitesi 47,849.44 MW olmasına karşılık Haziran 2022 sonu itibarıyla rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu güç değeri 10,976 MW'tır [6]. Bu değer, sahip olunan rüzgâr potansiyelinin dörtte birinden daha azdır. YEK'lerden enerji üretimi artırılarak sürdürülebilir ekonomik kalkınma ve enerji güvenliği açısından önemli bir avantaj sağlanabilir. Bundan dolayı YEK'lere olan teşvik mekanizmalarının artırılması, ülkenin enerji sektöründe daha da güçlenmesine yardımcı olabilir.

YEK'ler büyük enerji santralleri olarak inşa edileceği gibi, birden fazla enerji kaynağının tek bir şebekeye bağlı olduğu küçük ölçekli MŞ şeklinde de kurulabilir. MŞ'ler, dağıtık enerji sistemlerinin şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız elektrik enerjisi üretebilen yerleşmiş enerji sistemleridir. MŞ'ler ayrıca elektrik kesintileri ve enerji kayıplarını azaltırlar. Buda şebekelerin güvenilirliği ile birlikte enerji verimliliğini artırır [7]. YEK tabanlı MŞ'ler, geleneksel yakıt emisyonlarının azaltılmasına ve enerji arzının güvenliğine yardımcı olurlar [8]. Artan enerji talebinin karşılanması ve fosil yakıtların kullanımından dolayı oluşan çevresel kaygıların azaltılması için YEK'lerden oluşan hibrit üretim sistemlerinin oluşturulması günümüzde oldukça önem kazanmıştır. Bu alanda Homer Pro yazılım programı kullanılarak literatürde yapılan bazı çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Merino ve Castro, Şili'deki 2000 nüfuslu bir köyün elektrik talebini karşılamak için HOMER Pro yazılımını kullanarak şebekeye bağlı FV ve RT'den oluşan bir MŞ tasarımı yapmışlardır. Yaptıkları analiz sonucunda 2.5 kW FV ve 12,300 kW RT ile elektrik talebinin %85'ini YEK'lerden karşılayan optimal bir çözüm belirlediklerini ve sistemin NPC değerinin 25 milyon euro olarak elde edildiğini ifade etmişlerdir [9].

Farah ve arkadaşları, Endonezya'nın Sebira adası için HOMER Pro yazılımını kullanarak şebekeden bağımsız FV, DJ ve BDS'den oluşan iki farklı sistemin tekno-ekonomik analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına göre, birinci ve ikinci senaryonun LCOE değerleri sırasıyla 0.128 \$/kWh ve 0.6577 \$/kWh olarak elde edilmiştir [10].

Melit ve arkadaşları, Kuzey Cezayir'deki bir konutun elektrik talebini karşılamak için şebekeye bağlı enerji depolamalı ve depolamasız FV sistemli iki senaryonun ekonomik analizini HOMER Pro yazılımı yardımıyla gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları ekonomik analiz sonucunda, depolamasız şebekeye bağlı FV sistemin en düşük NPC ve LCOE değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir [11].

Odekunle ve arkadaşları, Gana'daki Ashesi Üniversitesine ait pansiyonun elektrik enerjini sağlamak için şebekeye bağlı FV, biyogaz jeneratörü (BJ) ve BDS'den oluşan bir MŞ'nin teknik ve ekonomik analizini HOMER Pro yazılımı aracılığıyla yapmışlardır. Yapılan analiz sonucunda sistemin LCOE ve NPC değerlerinin sırasıyla 0.0329 \$/kWh ile 186,226 \$ olarak elde edildiğini ve sistemin LCOE değerinin Gana'daki şebekenin LCOE değerine göre %79 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [12].

Yusupov ve Almagrahi, HOMER Pro yazılımını kullanarak Karabük Üniversitesinin mühendislik fakültesi için şebeke/DJ, şebeke/DJ/FV, şebeke/DJ/FV/BDS ve şebeke/DJ/BDS'den oluşan dört farklı senaryoyu tasarlayıp analiz etmişlerdir. Simülasyon sonucunda şebeke/DJ/FV kombinasyonunun 0.284 \$/kWh LCOE değeri ile en uygun sistem olduğunu belirtmişlerdir [13].

Chebabhi ve arkadaşları, Cezayir'deki Biskra tesisi için HOMER Pro yazılımı yardımıyla üç sistemin (FV, FV/RT ve FV/RT/DJ) ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda sistemlerin NPC değerleri sırasıyla 11.7 M\$, 13.3 M\$ ve 9.45 M\$ olarak elde edilmiştir. Sistemlerin LCOE değerleri ise yine sırasıyla 0.19 \$/kWh, 0.728 \$/kWh ve 0.188 \$/kWh olarak hesaplanmıştır [14].

Jenkins ve Sonar, New Mexico'daki Navajo topluluğu için HOMER Pro yazılımını kullanarak tasarladıkları FV, RT, DJ ve BDS'den oluşan MŞ'nin analizini gerçekleştirmişler. Tüm bileşenlerin olduğu senaryonun 164,048 \$ NPC değeri ve 0.16 \$/kWh LCOE değeri ile en uygun çözüm olduğunu belirtmişlerdir [15].

Jahangiri ve arkadaşları, İran'nın Abadan bölgesinde yaptıkları çalışmada HOMER Pro yazılımını kullanarak RT, FV, BJ, yakıt hücresi ve boiler bileşenlerini içeren konut ölçeğinde bir bileşik ısı ve güç sistemini incelemişlerdir. BJ ve yakıt hücresinde açığa çıkan ısıya geri kazanıldığı bu

avantajlı sistemin LCOE değeri 1.16 \$/kWh olarak hesaplanmıştır [16].

Acar ve arkadaşları, Türkiye'nin Afyon ilinde şebekeden bağımsız bir evin enerji ihtiyacını karşılamak için FV, elektrolizör, hidrojen tankı ve yakıt hücresinden oluşan bir sistem tasarlamışlardır. Hibrit sistemdeki her bir bileşenin boyutunun diğer bileşenlerin boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir [17].

John ve arkadaşları, Delhi Teknoloji Üniversitesi bilim bloğu için HOMER Pro yazılımını kullanarak FV, elektrolizör, hidrojen tankı ve yakıt hücresinden oluşan bir sistem tasarlamışlardır. Sistemin NPC ve LCO değerleri sırasıyla 1,030,406 \$ ve 0.6050 \$ olarak hesaplanmıştır [18].

Tiam Kapen ve arkadaşları, HOMER Pro yazılımını kullanarak iki farklı hibrit sistemin tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Birinci sistem FV, yakıt hücresi, elektrolizör ve BJ bileşenlerinden oluşurken ikinci sistem FV, BDS, yakıt hücresi, elektrolizör ve BJ bileşenlerinden oluşmaktadır. Optimizasyon sonucunda ikinci sistemin 0.139 \$/kWh LCOE değeri ile daha ekonomik olacağını ifade etmişlerdir [19].

Ennemiri ve arkadaşları, HOMER Pro yazılımı yardımıyla FV, BJ ve BDS'den oluşan bir hibrit sistem tasarlayarak tekno-ekonomik performansını değerlendirmişlerdir. 231 kW'lık FV, 170 kW'lık BJ 201 kWh'lik BDS bileşenlerinden oluşan sistemin LCOE değerinin 0.280 \$/kWh olduğu belirtilmiştir [20].

Bir kısmı yukarıda belirtilen literatürdeki çalışmalarda görüldüğü gibi araştırmacılar farklı bileşenleri bir araya getirerek MŞ'ler tasarlamış ve ekonomik analizler yapmışlardır. Benzer çalışmalar karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. MŞ için yapılan çalışmalar

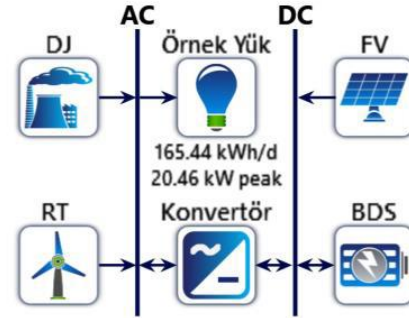
MŞ	Enerji Yönetim Sistemi	LCOE (\$/kWh)
FV/RT [14]	HOMER Pro	0.19
FV/RT/BJ [21]	HOMER Pro	0.110
FV/RT/DJ [22]	HOMER Pro	0.462
FV/RT [23]	HOMER Pro	0.0589
FV/RT/DJ [24]	HOMER Pro	0.179
FV/RT/DJ [25]	HOMER Pro	0.471

Bu çalışmada sabit bir yükün FV, RT, DJ ve BDS'den oluşan bir MŞ ile beslenme durumu incelenmiştir. Bunun için öncelikli olarak rüzgâr ve güneş enerji potansiyeli farklı olan Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri seçilmiştir. Çanakkale ilinin rüzgâr potansiyeli öne çıkarken Diyarbakır ilinin ise güneş potansiyeli öne çıkmaktadır. Rize ilinde ise her iki potansiyel diğer illere göre düşüktür. Bu üç şehrin HOMER Pro yazılımındaki meteorolojik verileri kullanılarak ayrı ayrı optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen illere göre tasarlanan sistemlerin tekno-ekonomik analizleri yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Böylece her şehrin kendi YEK kaynaklarını kullanarak ihtiyaç duyulan enerjinin üretilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Materyal ve Metot

Sistemin modellenmesi

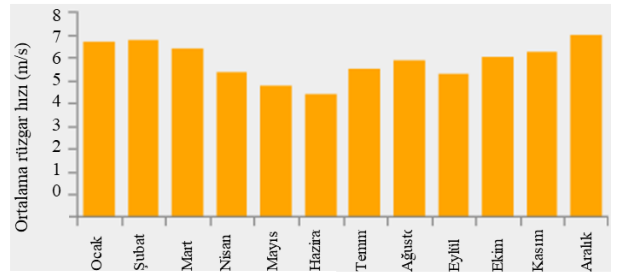
Türkiye'de günlük 165.44 kWh enerji tüketen referans bir topluluğun elektrik talebini karşılamak için şebekeden bağımsız FV, RT, DJ ve BDS'den oluşan bir MŞ modellenmiştir. HOMER Pro yazılımında tasarlanan MŞ'nin yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Tasarlanan model Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illerinin meteorolojik verileri girilerek ayrı ayrı optimize edilmiş ve tekno-ekonomik analizleri yapılmıştır.



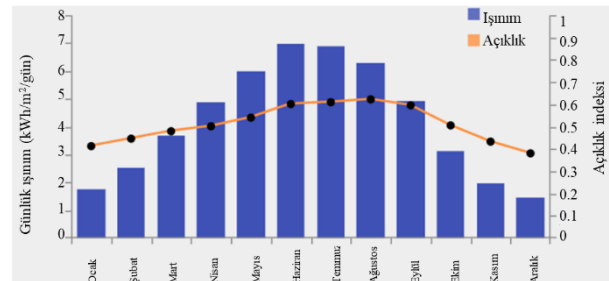
Şekil 1. HOMER Pro yazılımında tasarlanan mikro şebeke.

Bölgenin meteorolojik verileri

Çanakkale, Diyarbakır ve Rize'ye ait güneş radyasyonu ve rüzgâr hızı verileri HOMER Pro yazılımına entegre edilmiş NASA veri tabanından alınmış olup sırasıyla Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4'te verilmiştir.

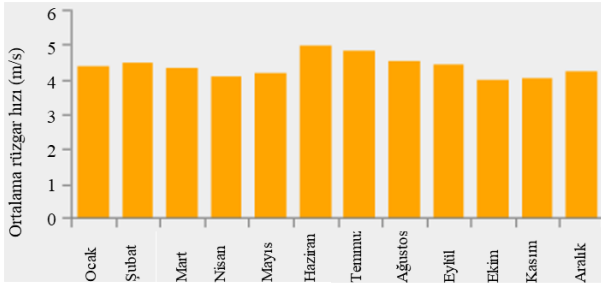


(a)

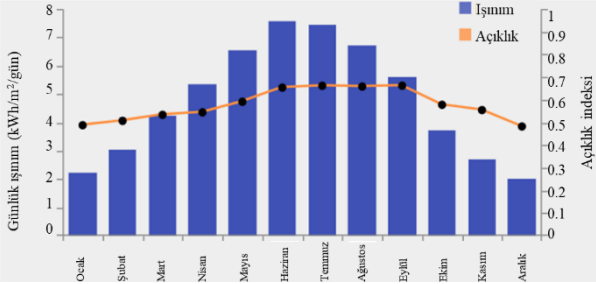


(b)

Şekil 2. Çanakkale için aylık ortalama rüzgâr hızı ile güneş radyasyonu ve netlik indeksi.

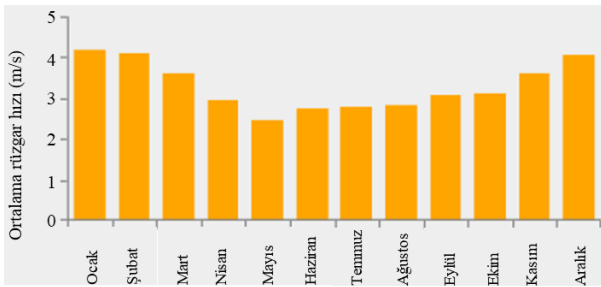


(a)

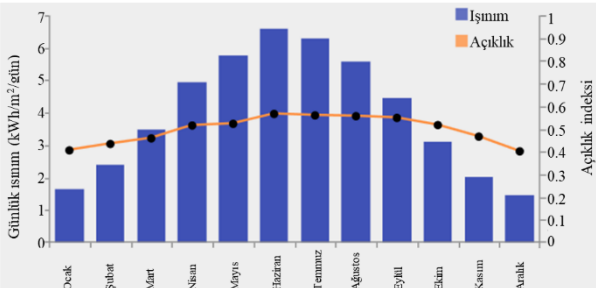


(b)

Şekil 3. Diyarbakir için aylık ortalama rüzgâr hızı ile güneş radyasyonu ve netlik indeksi.



(a)



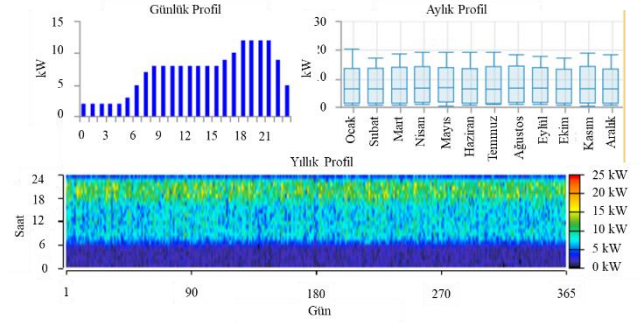
(b)

Şekil 4. Rize için aylık ortalama rüzgâr hızı ile güneş radyasyonu ve netlik indeksi.

Çanakkale'nin güneş radyasyonu $4.62 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$, ortalama rüzgâr hızı 6.93 m/s 'dir. Diyarbakir ilinin güneş radyasyonu $4.77 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$, ortalama rüzgâr hızı 5.25 m/s 'dir. Rize'nin güneş radyasyonu $3.98 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$, ortalama rüzgâr hızı 3.29 m/s 'dir.

Yük profili

Mevcut olan örnek topluluğun yük profili HOMER Pro yazılımında Şekil 5'te görüldüğü gibi oluşturulmuştur.



Şekil 5. Örnek yük profili.

Sistem bileşenlerinin matematiksel modelleri

Bu çalışmada 350 W 'lık FV panel kullanılmıştır. HOMER Pro yazılımı FV dizisinin güç çıkışını Denklem 1'e göre hesaplamaktadır [26].

$$P_{FV} = Y_{FV} f_{FV} \left(\frac{\overline{G_T}}{\overline{G_{T,STC}}} \right) \left[1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC}) \right] \quad (1)$$

Burada Y_{FV} test koşulları altındaki güç çıkışını (kW), f_{FV} FV değer kaybı faktörünü [%], $\overline{G_T}$ geçerli zaman adımında FV dizisine düşen güneş ışınımı miktarını [kWh/m^2], $\overline{G_{T,STC}}$ standart test koşullarında gelen radyasyon miktarını [1 kWh/m^2], α_p güç sıcaklık katsayısını [%/°C], T_c geçerli zaman adımındaki FV hücre sıcaklığını [°C], $T_{c,STC}$ ise standart test koşulları altında FV hücre sıcaklığını [25°C] ifade etmektedir.

MŞ modellemesinde Eocycle 10 RT kullanılmıştır. RT, 15.81 m rotor çapına, 10 kW nominal kapasiteye, 2.75 m/s devreye girme rüzgâr hızına ve 20 m/s 'lik devreden çıkma hızına sahiptir. HOMER Pro yazılımı, RT'nin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını logaritmik yasaya göre Denklem 2'deki gibi hesaplar.

$$U_{hub} = U_{anem} \cdot \left(\frac{Z_{hub}}{Z_{anem}} \right)^\alpha \quad (2)$$

Burada U_{hub} rüzgâr türbininin göbek yüksekliğindeki rüzgâr hızını (m/s), U_{anem} anemometre yüksekliğindeki rüzgâr hızını (m/s), Z_{hub} rüzgâr türbininin göbek yüksekliğini (m), Z_{anem} anemometre yüksekliğini (m) ve α ise güç yasası üssünü ifade etmektedir.

Sistem şebekeden bağımsız olduğundan dolayı enerji depolamak için 1 kWh kurşun asit piller kullanılmıştır. HOMER Pro yazılımı, BDS'nin şarj ve deşarj durumlarını Denklem 3 ve 4'e göre hesaplamaktadır.

$$P_b(t) = \frac{kQ_1(t)e^{-k} + Q(t)kc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (3)$$

$$P_b(t) = \frac{-kQ_{max} + kQ_1(t)e^{-k\Delta t} + Q(t)kc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (4)$$

Burada Q_{max} toplam depolama kapasitesini, Q_1 akülerdeki enerji miktarını (kWh), Q toplam enerji miktarını (kWh), c depolama kapasite oranını; k depolama hız sabitini, Δt ise zaman aralığını ifade eder.

Sistem bileşenlerinin matematiksel modelleri

Homer Pro yazılımı, bir sistemin NPC ve LCOE değerlerini Denklem 5, 6, 7 ve 8'e göre hesaplamaktadır [26].

$$NPC = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(d,Yr)} \quad (5)$$

$$CRF = \frac{d(1+d)^{Yr}}{(1+d)^{Yr}-1} \quad (6)$$

$$d = \frac{i-f}{1+f} \quad (7)$$

$$LCOE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (8)$$

Burada $C_{ann,tot}$ sistemin toplam maliyetini (\$/yıl), CRF sermaye geri kazanım faktörünü, d indirim oranını, Yr proje ömrünü (yıl), i nominal faiz oranını, f enflasyon oranını ve E_{served} ise hizmet verilen toplam elektrik yük miktarını (kWh/yıl) ifade etmektedir.

Sistem bileşenlerine ait birim maliyet değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. MŞ bileşenlerinin birim maliyet değerleri.

Bileşenler	Başlangıç yatırım maliyeti (\$/kW)	Geri dönüşüm maliyeti (\$/kW)	Bakım ve onarım maliyeti (\$/kW/yıl)	Çalışma ömrü
FV	700	700	10	25 yıl
RT	29000	25000	30	20 yıl
DJ	500	500	0.030	15000 saat
BDS	300	300	300	10 yıl
Konvertör	300	300	0	15 yıl

Bulgular ve Tartışma

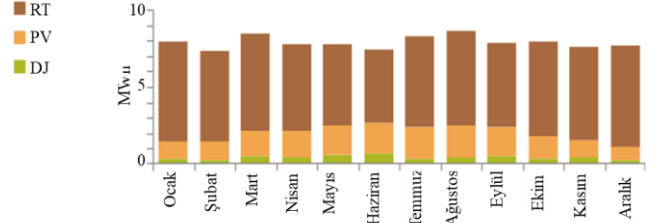
Türkiye'de konumları ve meteorolojik durumları farklı olan Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için HOMER Pro yazılımında oluşturulan MŞ'nin tekno-ekonomik analiz yapılmıştır. Simülasyon sonucunda oluşturulan MŞ bileşenlerinin optimum kapasite değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Şehirlere göre MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri

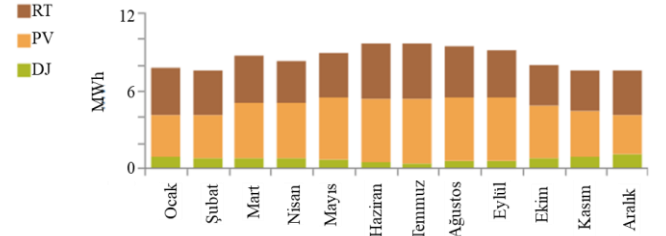
Name	Çanakkale	Diyarbakır	Rize
	Kapasite		
RT (kW)	10	10	10
FV (kW)	14.7	33.4	47.1
DJ (kW)	23	23	23
BDS (kWh)	66	101	124
Konvertör (kW)	12	11.7	12.1

Elektrik üretimi

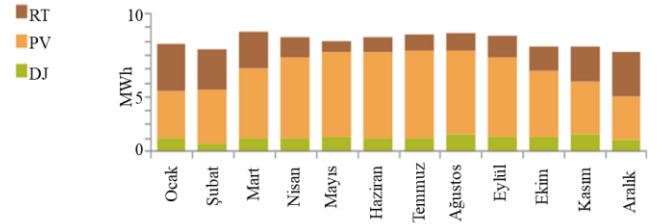
Tasarımı yapılan MŞ'nin günlük yük talebi 165.44 kWh'tir. Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için ayrı ayrı yapılan analiz sonucunda gerçekleşen kaynaklara göre aylık elektrik üretim miktarları sırasıyla Şekil 6, 7, 8'de verilmiştir.



Şekil 6. Çanakkale için MŞ bileşenlerinin aylık üretim değerleri.



Şekil 7. Diyarbakır için MŞ bileşenlerinin aylık üretim değerleri.



Şekil 8. Rize için MŞ bileşenlerinin aylık üretim değerleri.

MŞ bileşenlerinin aylık üretim miktarları incelendiğinde Çanakkale'de üretimin %74.4'ü RT, %20.3'ü FV ve %5.28'i DJ tarafından gerçekleştirilmiştir. Diyarbakır'da toplam üretimin %49'u FV, %42'si RT ve %8.93'ü DJ tarafından gerçekleştirilirken bu oranlar Rize'de ise %62.6 FV, %24.8 RT ve %12.6 DJ olarak elde edilmiştir. YEK'lerin üretimdeki payına bakıldığında Çanakkale'de YEK'lerin üretimdeki payına bakıldığında %94.7 ile en iyi orana sahip olduğu görülmektedir. Diyarbakır'da bu oran %91 iken. Rize ilinde ise %87.4 olarak gerçekleşmiştir. DJ'ler FV, RT ve BDS'nin yük talebini karşılayamadığı zamanlarda devreye girerek ihtiyaç duyulan yük miktarını karşılamaktadır. Rize ilinin rüzgâr hızı ve güneş radyasyon oranı diğer illere göre daha düşük olduğundan dolayı DJ tarafından üretilen enerjinin daha fazla olduğu görülmüştür. Çanakkale ilinin rüzgâr potansiyelinin yüksek olmasından dolayı bu il için tasarlanan MŞ'de en yüksek üretim payı RT'in olmuştur. Benzer şekilde Diyarbakır ilinin yüksek güneş potansiyeline bağlı olarak buradaki MŞ'nin de FV payı diğer bileşenlere göre yüksek çıkmıştır. Ayrıca RT'in üretim potansiyelinin fazla olduğu bölgede MŞ'yi oluşturan bileşenlerin optimum boyutlarının diğer illere göre daha küçük olduğu görülmüştür.

Ekonomik analiz

Oluşturulan MŞ'nin teknik uygulanabilirliğinin yanında ekonomik olarak uygulanabilirliği de önemlidir. Yapılan ekonomik analiz sonucunda maliyet açısından en uygun modelin Çanakkale için tasarlan model olduğu görülmüştür. Sistemin NPC değeri 153,560.53 \$, başlangıç sermaye maliyeti 74,223.20 \$, yenileme maliyeti 38,773.06 \$, işletme bakım maliyeti 16,158.32 \$, yakıt maliyeti 30,204.69 \$, geri dönüşüm maliyeti 5,798.73 \$ ve LCOE si 0.196 \$/kWh'tir. Diyarbakır için tasarlanan sistemin NPC değeri 228,718.34 \$, başlangıç sermaye maliyeti 97,705.31 \$, yenileme maliyeti 59,292.74 \$, işletme bakım maliyeti 26,336.49 \$, yakıt maliyeti 52,493.16 \$, geri dönüşüm maliyeti 7,109.36 \$ ve LCOE'si 0.293 \$/kWh'tir. Rize için tasarlanan sistem, maliyet açısından en yüksek maliyete sahip olup NPC değeri 285,946.32 \$, başlangıç sermaye maliyeti 114,316.28 \$, yenileme maliyeti 84,620.98 \$, işletme bakım maliyeti 33,671.44 \$, yakıt maliyeti 69,167.81 \$, geri dönüşüm maliyeti 15,830.18 \$ ve LCOE değeri 0.366 \$/kWh'tir.

Sonuçlar

Bu çalışmada Türkiye'nin güneş ve rüzgâr potansiyelleri farklı olan Çanakkale, Diyarbakır ve Rize illeri için FV, RT, DJ ve BDS'den oluşan bir MŞ tasarlanmıştır. Aynı yük miktarına sahip bu üç şebekenin teknik ve ekonomik analizleri ayrı ayrı yapılmıştır. Çanakkale ilinin güneş radyasyonu 4.62 kWh/m²/gün, aylık ortalama rüzgâr hızı 6.93 m/s'dir. MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri HOMER Pro yazılımı tarafından 10 kW RT, 14.7 kW FV, 23 kW DJ ve 66 kWh BDS olarak belirlenmiştir. Toplam üretilen enerjinin %74.4'ü RT, %20.3'ü FV, %5.28'i DJ tarafından üretilmiş olup sistemin NPC değeri 153,560.53 \$, LCOE değeri ise 0.196 \$/kWh'tir. İkinci olarak Diyarbakır ilinin güneş radyasyonu 4.77 kWh/m²/gün, aylık ortalama rüzgâr hızı 4.37 m/s'dir. MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri HOMER Pro yazılımı tarafından 10 kW RT, 33.4 kW FV, 23 kW DJ ve 101 kWh BDS olarak belirlenmiştir. Toplam üretilen enerjinin %42'si RT, %49'u FV, %8.93'ü DJ tarafından üretilmiş olup sistemin NPC değeri 228,718.34 \$, LCOE değeri de 0.293 \$/kWh'tir. Son olarak Rize ilinin güneş radyasyonu 3.98 kWh/m²/gün, aylık ortalama rüzgâr hızı 3.29 m/s'dir. MŞ bileşenlerinin kapasite değerleri HOMER Pro yazılımı tarafından 10 kW RT, 47.1 kW FV, 23 kW DJ ve 124 kWh BDS olarak belirlenmiştir. Toplam üretilen enerjinin %24.8'i RT, %62.6'sı FV, %12.6'sı DJ tarafından üretilmiş olup sistemin NPC değeri 285,946.32 \$, LCOE değeri ise 0.366 \$/kWh'tir.

Tüm bu değerlerden de görüleceği gibi tasarlanan MŞ'nin en uygun NPC ve LCOE değerleri Çanakkale ili için elde edilmiştir. Çanakkale ilinin öne çıkmasını sağlayan en önemli parametre, o ilin sahip olduğu güçlü rüzgâr potansiyelidir. Diyarbakır ilinin güneş radyasyon potansiyeli rüzgâr potansiyelinden daha iyi olduğundan FV sistemin üretim payı RT'nin üretim payından daha yüksek olmuştur. Rize ilinin rüzgâr hızı ve güneş radyasyon değerleri diğer iki ilden daha düşüktür. Ancak, rüzgâr potansiyeli güneş potansiyelinden çok daha düşük olduğundan FV sistemin üretim payı RT'nin üretim payından çok daha yüksek gerçekleşmiştir.

Kaynaklar

- [1] G. Erdal, H. Erdal, ve K. Esengün, "The causality between energy consumption and economic growth in Turkey," *Energy Policy*, vol. 36, no. 10, pp. 3838-3842, 2008/10/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.07.012>.
- [2] A. İpek ve A. Sekin, "Hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Balıkesir örneği," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 13, no. 3, pp. 517-529, 2024.
- [3] A. Rahman, O. Farrok, ve M. M. Haque, "Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112279, 2022/06/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>.
- [4] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, ve M. Benbouzid, "Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects," *Applied Energy*, vol. 222, pp. 1033-1055, 2018/07/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>.
- [5] <https://www.enerjiatlasi.com/elektrik-uretimi/> (accessed 03 May 2024, 2024).
- [6] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (accessed 03 January 2024, 2024).
- [7] A. Hirsch, Y. Parag, ve J. Guerrero, "Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues," *Renewable and Sustainable Energy reviews*, vol. 90, pp. 402-411, 2018.
- [8] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papathanassiou, and N. Hatzigiorgiou, "Making microgrids work," *IEEE power and energy magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 40-53, 2008.
- [9] C. Merino ve R. Castro, "Optimization of a Hybrid Solar-Wind Microgrid for Sustainable Development: A Case Study in Antofagasta, Chile," *Sustainability*, vol. 16, no. 9, p. 3668, 2024.
- [10] L. Farah et al., "Techno-Economic Assessment and Optimization of a Standalone System in Sebira Island, Indonesia," *JURNAL TEKNOLOGI REAKTOR NUKLIR TRI DASA MEGA*, vol. 26, no. 1, pp. 33-44, 2024.
- [11] A. Melit, F. Chekired, ve A. Meflah, "Optimal Sizing of a Hybrid Microgrid System in a Mediterranean Climate," in 2023 14th International Renewable Energy Congress (IREC), 2023: IEEE, pp. 1-5.
- [12] O. Odekunle, T. Asare, ve H. R. Beem, "Feasibility study of a PV/biogas/grid system for the Micro-grid supply at Ashesi University," in 2023 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC), 2023: IEEE, pp. 1-6.
- [13] Z. Yusupov ve N. Almagrah, "Techno-economic and environmental analysis of microgrid: A case study of Karabuk University," *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 41, no. 4, 2023.
- [14] A. Chebabhi, I. Tegani, A. D. Benhamadouche, ve O. Kraa, "Optimal design and sizing of renewable energies in microgrids based on financial considerations a case

- study of Biskra, Algeria," *Energy Conversion and Management*, vol. 291, p. 117270, 2023/09/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117270>.
- [15] P. Jenkins ve A. C. Sonar, "Feasibility Analysis of an Islanded Microgrid in Tohatchi, New Mexico Using HOMER Pro," *Energy and Power Engineering*, vol. 12, no. 06, pp. 357-374, 2020.
- [16] M. Jahangiri, F. Karimi Shahmarvandi, R. J. J. o. R. E. Alayi, ve Environment, "Renewable energy-based systems on a residential scale in southern coastal areas of Iran: trigeneration of heat, power, and hydrogen," vol. 8, no. 4, pp. 67-76, 2021.
- [17] C. Acar, E. Erturk, ve I. Firtina-Ertis, "Performance analysis of a stand-alone integrated solar hydrogen energy system for zero energy buildings," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 5, pp. 1664-1684, 2023/01/15/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.051>.
- [18] A. John, S. Basu, Akshay, ve A. Kumar, "Design and evaluation of stand-alone solar-hydrogen energy storage system for academic institute: A case study," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 5918-5922, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.461>.
- [19] P. Tiam Kapen, B. A. Medjo Nouadje, V. Chegnimonhan, G. Tchuen, ve R. Tchinda, "Techno-economic feasibility of a PV/battery/fuel cell/electrolyzer/biogas hybrid system for energy and hydrogen production in the far north region of cameroon by using HOMER pro," *Energy Strategy Reviews*, vol. 44, p. 100988, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100988>.
- [20] N. Ennemiri, A. Berrada, A. Emrani, J. Abdelmajid, ve R. El Mrabet, "Optimization of an off-grid PV/biogas/battery hybrid energy system for electrification: A case study in a commercial platform in Morocco," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 21, p. 100508, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100508>.
- [21] M. U. Khan, M. Hassan, M. H. Nawaz, M. Ali, ve R. Wazir, "Techno-economic Analysis of PV/wind/biomass/biogas hybrid system for remote area electrification of Southern Punjab (Multan), Pakistan using HOMER Pro," in 2018 International conference on power generation systems and renewable energy technologies (PGSRET), 2018: IEEE, pp. 1-6.
- [22] T. Ma ve M. S. Javed, "Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource," *Energy Conversion and Management*, vol. 182, pp. 178-190, 2019/02/15/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.059>.
- [23] A. M. Hemeida et al., "Optimum design of hybrid wind/PV energy system for remote area," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 11-23, 2020/03/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.005>.
- [24] F. A. Khan, N. Pal, ve S. H. Saeed, "Optimization and sizing of SPV/Wind hybrid renewable energy system: A techno-economic and social perspective," *Energy*, vol. 233, p. 121114, 2021/10/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121114>.
- [25] G. Zhang, C. Xiao, ve N. Razmjooy, "Optimal operational strategy of hybrid PV/wind renewable energy system using homer: a case study," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 3953-3966, 2022.
- [26] <https://homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf> (accessed 21 February 2024, 2024).



Dynamic Model and Control of an Electric Vehicle with Four In-Wheel PMSMs

Merve YILDIRIM^{1*}, Eyyup OKSUZTEPE², Hasan KURUM³

¹ Firat University, Department of Electrical and Electronics Engineering, merveyildirim@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1284-7324

² Firat University, School of Aviation, eoksuztepe@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-5446-4308

³ Biruni University, Department of Electrical and Electronics Engineering, hkurum@biruni.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-5498-6819

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 May 2024
Received in revised form 30 June 2024
Accepted 29 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Electric vehicle, permanent magnet synchronous motor, dynamic model, motor control.

Doi: 10.24012/dumf.1491154

* Corresponding author

ABSTRACT

In this paper, a dynamic modeling and control of an Electric Vehicle (EV) with four In-Wheel Permanent Magnet Synchronous Motors (IW-PMSM) are realized by using MATLAB/Simulink. In automotive applications especially in the EVs, PMSMs are generally utilized due to significant features such as high efficiency, high power density, and fast torque response. For this reason, they are also preferred in this study. Four PMSMs are fitted into the wheels to distribute power evenly for each wheel and thus, each motor can be controlled independently. In the dynamic model of the EV, all lateral and longitudinal forces acting on the EV are calculated. Besides, four wheel speeds are estimated according to the designed an Electronic Differential System (EDS) based the speed of the vehicle and steering angle. Then, a PID controller is designed so that the difference in the wheel speed values taken from the EDS is equal to the difference in the speeds taken from the actual system. The speed curve of each wheel and the road curve of the EV are drawn for different steering angles. As a result, it is observed that the stability of the EV is provided for various road conditions. Besides, complexity of the system is reduced by the proposed simpler control technique than the other methods in the literature such as fuzzy logic, direct torque control, and sliding mode control.

Introduction

Nowadays, increasing the number of the vehicles causes the air and environmental pollution. To prevent this, the use of Electric Vehicles (EVs) has become widespread. In addition to environmental awareness, the EVs have other significant advantages such as reliability, comfortable driving, low maintenance cost, and low fuel cost, etc. [1, 2].

EVs are complex systems requiring kinematic and dynamic modelling. Therefore, using right control techniques are quite important for controlling the EV [3]. When the EV is going on a road, all vehicle dynamics including lateral and longitudinal forces should be considered to provide the stability of the EV. Besides, the speed of each wheel of a four-wheel drive EV should also be controlled separately. Accordingly, using various control methods, the speed controller is realized and the speed regulation is ensured.

Many studies have been examined on the dynamic model and control strategies of the EV in the literature. First of all proposes a path tracking control of a four-wheel drive EV using a Model Predictive Control (MPC) method [4]. The nonlinear dynamical model of the EV is converted as a linear model for a MPC design. Then, the EV is provided to follow the reference path based on the reference yaw angle and

longitudinal displacement. It is aimed by this study that the error between the reference and measurement results is decreased by the MPC method. Thus, a good path tracking performance for an EV with four wheel is obtained and the road stability is provided. In [5], a lateral control and yaw stability control are handled by differential braking. The vehicle yaw moment may be generated by the differential braking. This changes the lateral position and yaw rate of the vehicle. For this reason, a fuzzy logic controller is proposed for lateral control and yaw stability control. Thus, the response time is reduced for the lateral and yaw errors and a stable vehicle system is designed. [6, 7] presents a vehicle motion control strategy for the EVs with four in-wheel motors. A control allocation examining the effect of the longitudinal force on the lateral force is proposed. As a result, the longitudinal forces of the wheels are set optimally using Quadratic Programming technique and an efficient system is designed. In [8], a modelling and simulation of an EV are realized using a Simcenter Amesim platform. The dynamic and quasi-static battery models of the EV are examined. Using the speed of the EV, the simulation results are validated with the experimental results. Authors in [9] study estimation of sideslip and roll angles of the EVs using lateral tire force sensors. To measure the sideslip a Recursive Least Squares (RLS) algorithm is utilized. Kalman filter is also preferred for

the roll angle calculation. The simulation results are tested on an experimental EV. It is observed that the roll angle and sideslip angle are estimated with high accuracy. The direct yaw moment control is presented for the in-wheel EVs in [10]. The sideslip angle is estimated by using a state observer. For this purpose, a discontinuous sliding mode direct yaw-moment controller is designed to set the sideslip angle and the yaw rate optimally. In [11], a trajectory tracking control is proposed for four-wheel drive EV utilizing Model Predictive Control (MPC) and Sliding Model Control (SMC) methods. Active front steering and direct yaw moment are examined for high speed situations of the EV. While the MPC technique provides the optimal tracking trajectory, the SMC reduces the large chattering issue in the traditional First-Order Sliding Mode Control (FOSMC). Therefore, the road stability is ensured for high speeds of the EV by this study. Another study presents an Acceleration Slip Regulation (ASR) control for an EV driven by two-wheel independently based on dynamic torque distribution [12]. The single wheel ASR based on fuzzy control is realized using Matlab/Simulink. It is shown from the simulation results that the lateral stability and dynamic tracking capability are better than traditional ASR. An electronic stability control based on motor driving and braking torque distribution for an EV driven by four in-wheel motors in [13]. The yaw rate and sideslip angle of the EV are controlled for the vehicle stability. The torque distribution algorithm is used to generate driving torque or regenerative braking torque of each motor. The proposed method is simulated by using Matlab/Simulink and it is implemented to a CarSim vehicle model. It is obtained from the simulation results that the lateral stability of the EV is provided by utilizing the torque distribution strategies.

When examining the studies in the literature, it is observed that there are a lot of control methods for the vehicle stability. These methods are complex techniques and they increase transaction complexity. For this reason, in this study, a simpler PID controller approach is proposed. A dynamic model including the tire and vehicle dynamics, an EDS, four IW-PMSMs and drives is designed. Here, the PMSMs are fitted into the wheels to provide independent control of each wheel. Thus, the torque is distributed equally to each wheel. The speeds of the front and rear wheels are calculated for various steering angles and speeds of the EV in the EDS. Then, the actual system speeds of the EV are synchronized to the reference speeds taken from the EDS. In conclusion, a stable system is designed for an EV with four IW-PMSMs and safe driving is provided for different road conditions.

The paper consists of six parts. Firstly, the PMSMs under subheadings which are their topology, dynamic model, and control are explained in Section 2. Then, a dynamic model of the EV is examined in Section 3. The control of the EV with four IW-PMSMs is realized in Section 4. After that, the results and discussions are handled in Section 5. The conclusions are given in Section 6.

Permanent Magnet Synchronous Motors

Topology

Synchronous motors are constant speed machines that always rotate at synchronous speed depending on the frequency of the

source and the number of poles of the motor. Alternative current is applied to its stators and direct current is applied to its rotors. Thus, it is double excited since two separate magnetic fields are produced [14].

In the brushed DC motors, a smooth torque is obtained by constantly changing the direction of the rotor current with the brush collector structure. In the brushless DC motors and PMSMs, a magnetic field is created thanks to the permanent magnets in the rotor [15]. This provides significant advantages. Since there are no excitation windings, it reduces losses. Therefore, their efficiency is high. Since their size is small, their moment/volume ratio is higher [16]. Additionally, since there is no brush and collector, their structure is simpler and maintenance costs are low.

Dynamic model of the PMSMs

The mathematical model of an PMSM is similar to a wound rotor synchronous motor. It is obtained by considering some assumptions which are negligence of the saturation, eddy currents and hysteresis losses, the skin effect of the current, not being the cage in the rotor and field current dynamics, inductance and resistance values not affected by temperature, and having a sinusoidal induced EMF. The permanent magnets used in the PMSM are a modern rare earth variety with high resistance. Therefore, the currents induced in the rotor can be neglected [17, 18].

The three-phase model of a Y-connected three-phase PMSM is derived using the equivalent circuit given in Fig. 1.

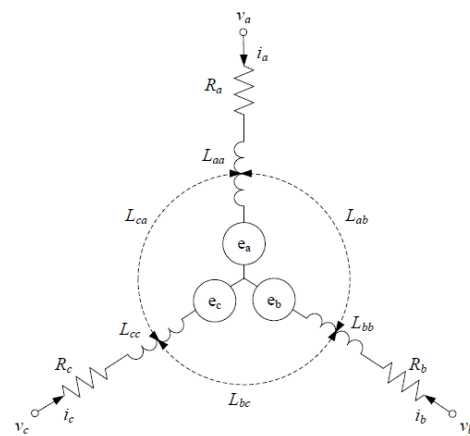


Figure 1. Three-phase equivalent circuit of the PMSM [19].

Using the equivalent circuit in Fig. 1, the three-phase voltages of the PMSM are shown in Equation (1).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

where V_a, V_b, V_c are stator voltages for the phases a, b, c, $i_a, i_b,$ and i_c are the stator currents, $R_a, R_b,$ and R_c are the phase winding resistances, $e_a, e_b,$ and e_c are back EMFs induced in the stator, $L_{aa}, L_{bb},$ and L_{cc} are total inductances of the phase windings, $L_{ab}, L_{bc},$ and L_{ca} are the mutual inductances between

the phases. R_a , R_b and R_c are the phase resistances which are equal to each other and it can be expressed as R_s .

If the voltage equation given in Equation (2) is rearranged with the magnetic fluxes ψ_a , ψ_b , and ψ_c as follows

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

L_{ss} which is the phase winding total inductance and mutual inductance M can be calculated as follows

$$L_{ss} = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_l + L_{ms} \quad (3)$$

$$M = L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = -\frac{1}{2} L_{ms} \quad (4)$$

where L_l , L_{ms} , and M are the leakage inductance, the phase winding self-inductance, and mutual inductance between the phases.

Using these inductances, the fluxes for the phases a , b , c can be found in Equation (5).

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M & M \\ M & L_{ss} & M \\ M & M & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_f \cos \theta_r \\ \lambda_f \cos (\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \lambda_f \cos (\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

where λ_f is the back EMF constant and θ_r is the rotor position.

When the voltage equation is rearranged according to the magnetic fluxes, it can be expressed as follows

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & M & M \\ M & L_{ss} & M \\ M & M & L_{ss} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} \lambda_f \sin \theta_r \\ \lambda_f \sin (\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \lambda_f \sin (\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Three phase voltages and stator flux linkages are converted into the d, q axis values as given below, respectively [20].

$$V_d = R i_d + p \lambda_d + \omega_s \lambda_d \quad (7)$$

$$V_q = R i_q + p \lambda_q + \omega_s \lambda_q \quad (8)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{af} \quad (9)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (10)$$

where V_d and V_q are d-q axis voltages, i_d and i_q are d-q axis stator currents, L_d and L_q are d-q axis inductances, λ_d and λ_q are d-q axis stator flux relations. R , ω_s , and λ_{af} are the stator resistance, synchronous speed, and the flux due to the rotor magnets ringing the stator.

Torque equation for the motor dynamics can be given in Equation (11).

$$T_e = T_L + B \omega_r + j p \omega_r \quad (11)$$

P , T_L , B , ω_r , and j the number of the pole pairs, load torque, damping coefficient, rotor speed, and moment of inertia, respectively.

Due to the nonlinear machine model, the dynamic equations of the PMSM can be derived as follows

$$p i_d = (V_d - R i_d + \omega_s L_q i_q) / L_d \quad (12)$$

$$p i_q = (V_q - R i_q - \omega_s L_d i_d - \omega_s \lambda_{af}) / L_q \quad (13)$$

$$p \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / j \quad (14)$$

The d-q voltages can be obtained from the Park transform in Equation (15).

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} = 2/3 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos (\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos (\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin (\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin (\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

The total input power of the PMSM is calculated as follows

$$P_T = 3(v_d i_d + v_q i_q) / 2 \quad (16)$$

Control of the PMSM

In this study, an Interior PMSM (IPMSM) is used. The block diagram of the motor speed control of IPMSM is shown in Fig. 2. Here, the reference speed (*) indicates the angular speed value at which the motor is desired to rotate. Therefore, torque adjustment can be made.

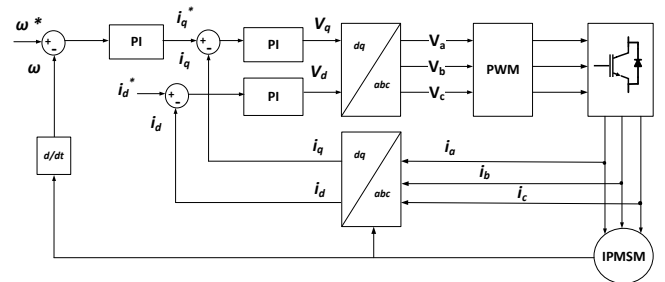


Figure 2. The speed control diagram of the IPMSM.

In the system, the reference speed value is compared with the actual speed, the error value is passed through the PI controller and the reference value i_q^* of the i_q current is found. i_q^* is compared with the actual current value i_q and the error current is passed through the PI controller to obtain the V_q voltage signal. Likewise, by comparing the reference current i_d^* with the actual current value i_d , the error current is passed through the PI controller and the V_d voltage signal is obtained. The

found V_d and V_q voltages are converted into a, b, c voltages by Inverse Park and Clarke transformations to obtain the three-phase voltage signals required for the motor. Thus, PWM signals are generated and given as a reference to the voltage source inverter, ensuring that the motor follows the reference speed.

Dynamic model of the EV

The dynamic model of an EV with a four-wheel drive is shown in Fig. 3. Here, F is the force of the each wheel and D is the lateral slip force based on turning movement of the EV.

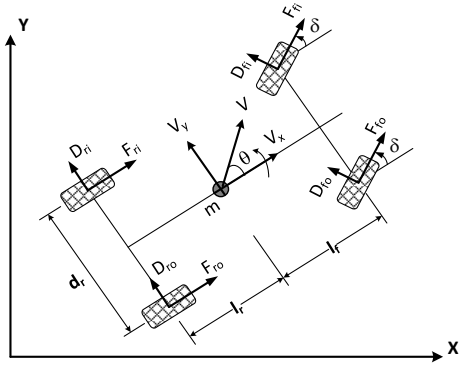


Figure 3. A dynamic model of the EV with a four-wheel drive [21]

A mathematical model of the EV is derived from the Newton second motion law. Therefore, the first motion equation can be written by using the forces acting on the vehicle in the x-axis direction in Equation (17) [22-24].

$$m\ddot{x} = (F_{fo} + F_{fi})\cos(\delta) + (F_{ro} + F_{ri}) - (D_{fo} + D_{fi})\sin(\delta) + m\dot{y}\ddot{\theta} \quad (17)$$

where F and D are the longitudinal and lateral forces of the front and rear outer and inner wheels. m , δ , and θ are the mass of the vehicle, the steering and sideslip angles of the EV, respectively.

The second motion equation is obtained according to the forces acting on the EV in the y-axis direction in Equation (18).

$$m\ddot{y} = (F_{fo} + F_{fi})\sin(\delta) + (D_{fo} + D_{fi})\cos(\delta) + (D_{ro} + D_{ri}) - m\dot{x}\ddot{\theta} \quad (18)$$

The lateral sliding forces of the motion is calculated by [1].

$$D = -\alpha C \quad (19)$$

where C is the lateral stiffness coefficient. α is the slip angle which can be given for each wheel as follows.

$$\alpha_{fi} = \tan^{-1} \left(\frac{q_4 + q_6 l_f}{q_2 - \frac{d_r}{2} q_6} \right) - \delta \quad (20)$$

$$\alpha_{fo} = \tan^{-1} \left(\frac{q_4 + q_6 l_f}{q_2 + \frac{d_r}{2} q_6} \right) - \delta \quad (21)$$

$$\alpha_{ri} = \tan^{-1} \left(\frac{q_4 - q_6 l_r}{q_2 - \frac{d_r}{2} q_6} \right) \quad (22)$$

$$\alpha_{ro} = \tan^{-1} \left(\frac{q_4 - q_6 l_r}{q_2 + \frac{d_r}{2} q_6} \right) \quad (23)$$

The air friction resistance can be expressed by

$$F_s = 0.5 d C_w A V^2 \quad (24)$$

where d and C_w are the density of the air and coefficient of the resistance. Besides, A and V are vertical cross-sectional area and the speed of the EV, respectively.

Control of the EV with four IW-PMSMs

Controlling each wheel of a four-wheel drive EV independently has a significant importance since the speed and torque of each wheel can be changed. Hence, a front-wheel drive or rear-wheel drive EV can be obtained if desired. However, these four wheels must work in harmony with each other to provide the balance of the EV. For this reason, the control of an EV with four in-wheel PMSMs is carried out as shown in Fig. 4. Here, the symbol * indicates the reference values.

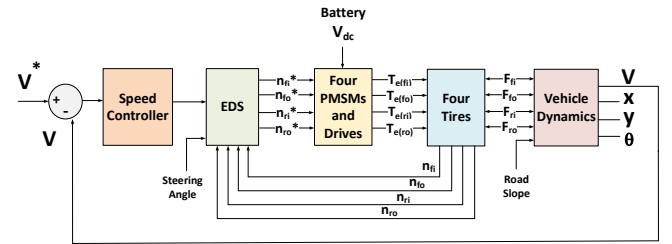


Figure 4. A dynamic model of an EV with PMSM with four in-wheel motors

In the system shown in Fig. 4, the difference between the speed taken from output of the vehicle dynamic model (V) and the reference speed the EV is passed through the speed control block using a PID controller. The speed obtained from the PID output is sent to the EDS. According to this EV speed value and steering angle, four wheel speeds are calculated by the designed EDS. When the steering angle is zero, it means the EV is traveling on a straight road. If it is different from zero, it turns right or left. Accordingly, the speed values of the right and left wheels will be different each other. In the proposed system, a PID controller is designed so that the difference in the wheel speed values taken from the EDS output is equal to the difference in the speeds taken from the real system. The designed system is illustrated for the front and rear wheels of the EV in Fig. 5. a and b, respectively.

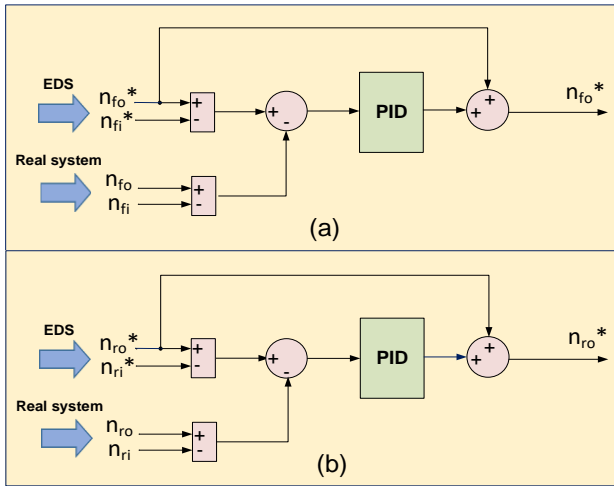


Figure 5. PID controller design using the speed differences for (a) the front wheels (b) rear wheels of the EV

As shown in Fig. 5, while the speed of one of the front or rear wheels is different from the desired speed value, the speed difference between the wheels will change. This disrupts the balance of the EV and prevents safe driving. Therefore, to ensure a stable driving of the EV on the road, a PID speed controller is designed to equalize the speed differences received from the real system and EDS. Then, the torque and forces of the four wheels are calculated by sending these optimal speed values to four PMSM drives.

In the proposed system, the load conditions of the PMSMs are examined based on the slope and curve of the road, the longitudinal and lateral forces of the EV are estimated. Lastly, the slope of the road, xy curve, and yaw angle θ are obtained from the longitudinal forces in the vehicle dynamics block. As a result, safe driving of the EV is provided by the designed system using a simple controller method based on various EV speeds and steering angles.

Results and Discussions

The dynamic model of a four-wheel drive EV is implemented in Matlab/Simulink. In this section, the results obtained from the designed model are presented. In the model, the reference speeds of the EV are taken as 50 km/h and 90 km/h. These speed values are compared with the speed value taken from the real system and passed through a PID controller. Accordingly, it can be seen in Fig. 6 that the actual speed value of the EV catches the reference speed.

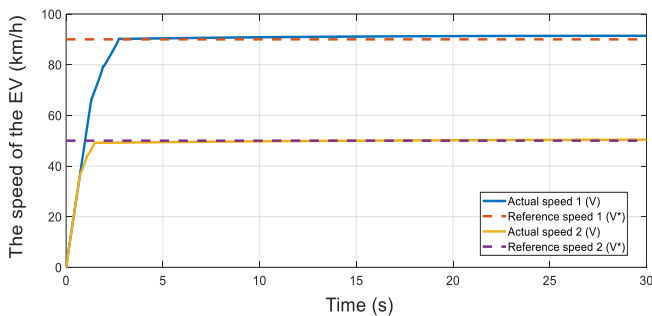


Figure 6. The actual speed curves of the EV for a) 50 km/h reference speed b) 90 km/h reference speed

In the model, the steering angle is taken as variable positive and negative values as shown in Fig. 7. Thus, the situations in which the vehicle travels on a straight road or the roads sloping to the right and left are examined.

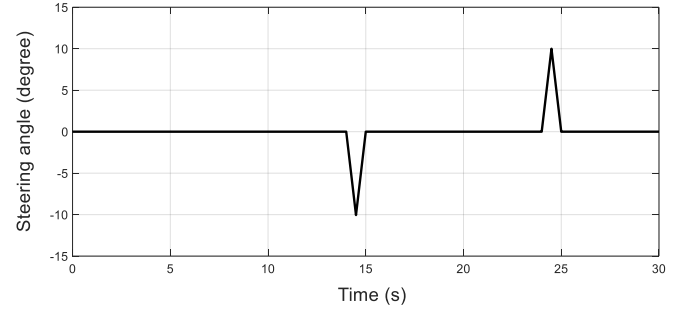


Figure 7. The change of the steering angle used in the dynamic model for 50 km/h reference speed of the EV

The road curve of the EV is drawn for the steering angle values and the reference speed value in Figure 8. As the steering angle changes, the path followed by the vehicle will also change. Accordingly, it is observed in Figure 8 that the EV moves safely on the given road profile.

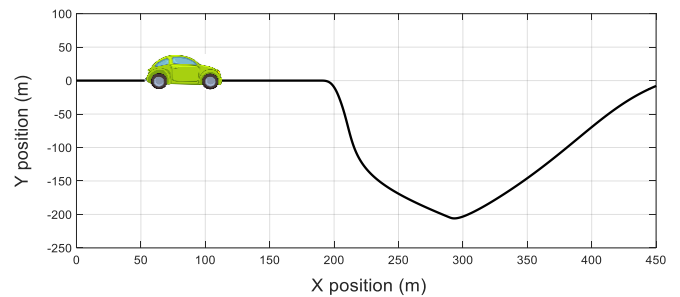


Figure 8. The road curve of the EV for different steering angles for 50 km/h reference speed of the EV

By using the designed EDS model, the four-wheel speeds of the EV are calculated depending on the steering angle and vehicle speed. The speeds calculated here are the reference speed values of the EV. Accordingly, the front inner and outer wheel speeds are shown in Fig. 9. In Fig. 9, n_f is the front wheel speed.

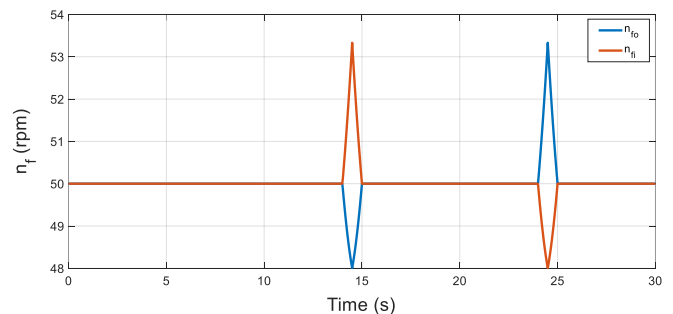


Figure 9. Front inner and outer wheel speeds calculated from the EDS for 50 km/h reference speed of the EV

Rear inner and outer wheel speeds are shown in Fig. 10. As illustrated in Fig. 10, n_r is the rear wheel speed.

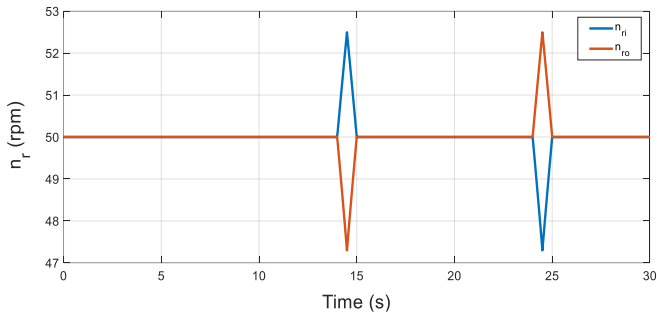


Figure 10. Rear inner and outer wheel speeds calculated from the EDS for 50 km/h reference speed of the EV

After the EDS is designed, the actual system of the EV consisting of vehicle dynamics is modeled. As the speed values taken from the real system change, the stability of the system will deteriorate. Hence, a PID controller is designed to compensate for this. A comparison for the front wheels of the EV is made between the reference speeds calculated by the EDS in the designed controller and the wheel speeds obtained by the real system without and with a controller as shown in Fig. 11.

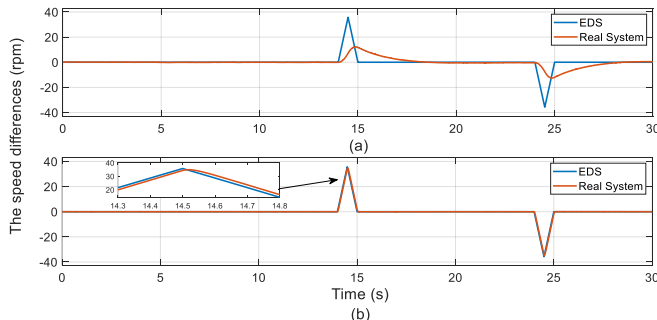


Figure 11. Speed differences of right and left front wheels of EDS and real system at 50 km/h reference EV speed for a) the system without controller b) the system with controller

As seen in Fig. 11, the difference between the front wheel speeds taken from the EDS output in the system without a controller is quite different from the speed differences taken from the output of the real system. On the other hand, in the system used a PID controller, this difference almost disappears and the stability of the EV is ensured.

Conclusion

In this study, a dynamic model of the EV with four IW-PMSMs is designed and the IW-PMSMs are controlled by the proposed PID controller. The simulation is realized by using MATLAB/Simulink. In the presented model, an EDS, four IW-PMSMs and their drives, tires and vehicle dynamic are placed. The load conditions of the motors are examined according to the slope of the road and all forces including longitudinal and lateral forces of the EV are estimated. Besides, an EDS is proposed for controlling the speed of the each wheel optimally based on the steering angle and the speed of the EV. After that, a PID controller is designed so that the speed differences of the real system are equal to the speed differences obtained from the EDS. Then, the change of each wheel speed are separately examined and the road curve of the EV is drawn for various steering angles. The results show that the EV moves steadily on the road for different for

bend slopes. Furthermore, the proposed controller is a simpler method than the other complex techniques in the literature such as fuzzy logic, artificial neural networks, and model predictive control, etc. As a result, all wheel speeds can be controlled optimally by this method.

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.

References

- [1] E. Esmailzadeh, G. R. Vossoughi, and A. Goodarzi, "Dynamic modeling and analysis of a four motorized wheels electric vehicle," *Vehicle System Dynamics*, vol. 35, no. 3, pp. 163-194, 2001.
- [2] Z. Omac, M. Polat, E. Oksuztepe, M. Yildirim, O. Yakut, H. Eren, and H. Kurum, "Design, analysis, and control of in-wheel switched reluctance motor for electric vehicles," *Electrical Engineering*, vol. 100, pp. 865-876, 2018.
- [3] T. Makhlof, A. Achour, Y. Belkhier, and R. N. Shaw, "Design and control of an electric vehicle equipped with permanent magnet synchronous machine," in *IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, September 2021, pp. 1-5.
- [4] P. Hang, F. Luo, S. Fang, and X. Chen, "Path tracking control of a four-wheel-independent-steering electric vehicle based on model predictive control," in *IEEE 36th Chinese Control Conference (CCC)*, July 2017, pp. 9360-9366.
- [5] C. Zhao, W. Xiang, and P. Richardson, "Vehicle lateral control and yaw stability control through differential braking," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 1, July 2006, pp. 384-389.
- [6] L. Xiong and Z. Yu, "Control allocation of vehicle dynamics control for a 4 in-wheel-motored EV," in *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, vol. 2, December 2009, pp. 307-311.
- [7] H. Zhou, H. Chen, B. Ren, and H. Zhao, "Yaw stability control for in-wheel-motored electric vehicle with a fuzzy PID method," in *IEEE The 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, May 2015, pp. 1876-1881.
- [8] C. Irimia, M. Grovu, G. M. Sirbu, A. Birtas, C. Husar, and M. Ponchant, "The modeling and simulation of an electric vehicle based on simcenter amesim platform," in *IEEE Electric Vehicles International Conference (EV)*, October 2019, pp. 1-6.
- [9] K. Nam, S. Oh, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Estimation of sideslip and roll angles of electric vehicles using lateral tire force sensors through RLS and Kalman filter approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 988-1000, 2012.
- [10] S. Ding, L. Liu, and W. X. Zheng, "Sliding mode direct yaw-moment control design for in-wheel electric

- vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6752-6762, 2017.
- [11] Y. Tong, H. Jing, B. Kuang, G. Wang, F. Liu, and Z. Yang, “Trajectory tracking control for four-wheel independently driven electric vehicle based on model predictive control and sliding model control,” in *IEEE 2021 5th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*, October 2021, pp. 1-5.
- [12] C. Zhang, G. Yin, and N. Chen, “The acceleration slip regulation control for two-wheel independent driving electric vehicle based on dynamic torque distribution,” in *IEEE 35th Chinese Control Conference (CCC)*, July 2016, pp. 5925-5930.
- [13] L. Zhai, T. Sun, and J. Wang, “Electronic stability control based on motor driving and braking torque distribution for a four in-wheel motor drive electric vehicle,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4726-4739, 2016.
- [14] P. Pillay and R. Krishnan, “Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25 no. 2, pp. 265-273, 1989.
- [15] J. Yang, W. H. Chen, S. Li, L. Guo, and Y. Yan, “Disturbance/uncertainty estimation and attenuation techniques in PMSM drives—A survey,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 3273-3285, 2016.
- [16] O. Dal, M. Yildirim, and H. Kurum, “Optimization of permanent magnet synchronous motor design by using PSO,” in *IEEE 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, Sept. 2019, pp. 1-6.
- [17] P. Pillay, R. Krishnan, “Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, part I: The permanent-magnet synchronous motor drive,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, pp. 265–273, 1989.
- [18] G. Boztas, M. Yildirim, and O. Aydogmus, “Design and optimization of a PMSM for obtaining high-power density and high-speed,” *Turkish Journal of Science and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 61-70, 2020.
- [19] R. Krishnan, “Electric motor drives: modeling, analysis, and control,” Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [20] S. Sriprang, B. Nahid-Mobarakeh, N. Takorabet, S. Pierfederici, N. Bizon, P. Kuman, and P. Thounthong, “Permanent magnet synchronous motor dynamic modeling with state observer-based parameter estimation for AC servomotor drive application,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 12, no. 4, pp. 286-297, 2019.
- [21] M. Yildirim, E. Oksuztepe, and H. Kurum, “Design of electronic differential system for an electric vehicle with four independently controlled in-wheel PMSM,” *Advances in Electrical & Computer Engineering*, vol. 24, no. 1, 2024.
- [22] Y. Guodong, C. Zhe, and C. Jiansong, “Safety driving speed and lane keeping control for electric vehicle in variable curvature curve,” in *IEEE 36th Chinese Control Conference (CCC)*, July 2017, pp. 9572-9577.
- [23] K. Liu, J. Gong, A. Kurt, H. Chen, and U. Ozguner, “Dynamic modeling and control of high-speed automated vehicles for lane change maneuver,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 3, no. 3, pp. 329-339, 2018.
- [24] J. E. Esquivel-Cruz, F. Beltran-Carbajal, I. Rivas-Camero, Z. Damián-Noriega, G. Álvarez-Miranda, and R. Pérez-Moreno, “Tracking control approach of speed profiles of induction motors used in electric vehicle,” in *IEEE 11th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, August 2023, pp. 22-26.



Multi-scale Residual Segmentation Network for Histopathological Image

Zehra BOZDAĞ KARAKEÇİ^{1*}, Muhammed Fatih TALU²

¹ Harran University, Software Engineering Department, zbozdag@harran.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1119-5275

² Inonu University, Computer Engineering Department, fatihtalu@gmail.com, Orcid No: 0000-0003-1166-8404

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 July 2024
Received in revised form 5 September 2024
Accepted 24 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

deep learning, histopathological image segmentation, convolutional neural network

Doi: 10.24012/dumf.1500666

* Corresponding author

ABSTRACT

Deep learning is used in all areas of the image processing like object detection/localization, synthetic image generation, segmentation, tracking, and others. It is frequently used especially in medical image segmentation field since it provides rapid response during the treatment process. The fact that natural images contain different types of noise, patterns, and structures and the lack of distinctive quantitative information still makes the segmentation problem very challenging. The classical networks having high parameters have a long training time. The need of less training time for high parameter networks and high segmentation accuracy has led us to develop a new network. In this study, a state-of-the-art autoencoder network (MSRSegNet) is proposed to perform segmentation. Unlike conventional autoencoder approaches, it consists of encoder, fusion and decoder blocks. In encoder and decoder blocks, Multi-scale Residual Blocks are used to share information between blocks and to detect features on different scales. In fusion block, Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) module is used to preserve multi-scale contextual information. Segmentation architectures, such as Deeplabv3+, SegNet, and U-Net, with well-established backbones from the literature, are used for performance comparison on histopathological images extracted from the Camelyon16 dataset. As a result, it was observed that the proposed segmentation network has high accuracy (69% mean intersection over unit (mIOU)) and fast segmentation performance (0.061sec. for an image with 256x256)

Introduction

According to the data of the World Health Organization, breast cancer ranks first among the causes of women's death [1]. In order to diagnose this disease and to determine the treatment, tissues are taken from the body by biopsy method. Tissues are examined under a light microscope for the manifestation of the disease. This procedure is called histopathological examination in medical language. Generally, the shape, size, color, and distribution of nucleoids are taken into consideration when the diagnosis of breast cancer is considered in histopathological examination [2]. Traditional histopathological examination is performed manually. The pathologist examines the tissues under a light microscope and diagnoses them accordingly. Sometimes he consults with other pathologists to make the diagnosis because the variety of tissues is very high. This approach has at least two major drawbacks: the first is a laborious process, the tissues need to be carefully examined. Second is that the decision of a pathologist is not objective [3].

In digital pathology, there are special scanners that are used for scanning pathologic slides. The images produced by

these scanners are called Whole slide Images (WSI). WSIs are glass slides of high magnification digitized glass samples. In the early days, this WSI was used for telepathology, clinical training to assist pathologists. With the development of computer-based medical image analysis in recent years, these images have been used intensively [3]. For example, many studies such as tissue classification, detection, registration and segmentation in WSI of different tissue samples have been done [4]–[9]. The most important benefit of using WSI in computer-based analysis is that it helps pathologists make quick decisions. It reveals overlooked findings when analyzing WSI by the pathologist. Therefore, it reduces workload and eliminates objectivity. In the first studies using computer-based methods, after obtaining the determining features such as shape, texture, and color of the image then machine learning techniques were applied [10]–[15].

Although these studies are successful up to a certain level, it can be time-consuming and inefficient considering the feature selection process. There is a huge increase in the amount of medical data especially visual data with the technological developments in hardware and software. The use of a convolutional neural network (CNN) is inevitable in this abundance of data because the success of CNN depends on seeing a lot of data. The most important benefit

of using CNN is one doesn't need to choose features for the medical image tasks. Also, it gives results in a short time with high performance [16]. There are several studies that have been using CNN for histopathological image, for example WSI classification, cancer metastasis detection, mitotic cells detection, tumor proliferation score prediction, and so on [8], [17]–[19]. A systematic review of the use of deep learning histopathological images can be found in [20], [21].

Segmentation of histopathological images has attracted considerable attention, with deep learning architectures originally developed for natural image segmentation being adapted for these applications [22], [23]. However, training these complex and deep networks is often time-consuming, highlighting the need for a network specifically adapted to biomedical images that can be trained quickly while effectively capturing the contextual information of the images.

Recent advances in biomedical image segmentation have focused on improving computational efficiency while maintaining accuracy. For instance, FU-Net employs bottleneck convolutional layers, which significantly reduce the number of parameters and accelerate the training process without compromising segmentation performance [24]. Similarly, Sharp U-Net enhances feature fusion through deep convolution, minimizing artifacts and improving segmentation quality without increasing model complexity [25]. These studies, among others, underscore the critical importance of developing lightweight and efficient architectures to address the computational challenges inherent in deep learning models for biomedical image segmentation [26]–[29].

In this study, we present a new approach that is one of the first approaches to use the convolution block used for increasing image resolution to task of histopathological image segmentation. To the best of our knowledge, it is the first segmentation method to segment tumors in histopathological images of H&E-stained breast lymph nodes using convolution blocks from increasing image resolution. The novelty of this work can be summarized as:

- A unique convolutional neural network (CNN) architecture with a multi-scale feature fusion strategy is introduced for tumor segmentation in histopathological images.
- The proposed model achieves excellent results with fewer parameters, making it computationally efficient and accurate.
- Comprehensive ablation studies provide detailed insights into the network's efficiency, distinguishing it from existing segmentation networks.

Related works

Recently, deep learning has proven its success in many areas, especially in computer vision. Networks used for vision tasks such as ResNet, DenseNet, Inception are quite deep [30]–[32]. These networks are also used as a decoder in the image segmentation process to reveal the characteristics of the image [33]–[35].

However, they take too much time when they are trained because many parameters need time to learn. We developed an architecture for segmentation that has a small number of parameters to capture and emit image content.

Medical image segmentation

With the development of a fully convolutional network (FCN), it opened a new period in semantic segmentation. The difference between CNN which has made a single prediction output for images and FCN is giving semantic segmented outputs in the desired size. This success is followed by Unet, which performs natural and biomedical image segmentation. Unet also has applied encoder-decoder architecture in the field. The encoder part obtains the features of an input image passing it to low-resolution. The decoder part uses these low-resolution features to get segmented output with high-resolution. Unet has presented the concept of skip connections. Skip connection is the improvement strategy technique applied in the decoder part due to the loss of spatial features of the in the encoder part. The features coming from the encoder section are concentrated with the features of the decoder section and the performance increases with this technique [36][37].

Recently, new segmentation architectures have been developed for biomedical images using different modules such as gated attention mechanism and long-short term memory network (LSTM) [22], [33], [38]. In our study, we analyzed its performance and obtained high performance by using a feature extraction block that was not used in segmentation architectures.

Feature extraction block

With the development of deep learning architectures, many feature extractions blocks have been developed such as the inception module, dense module, and residual module. These blocks used different kernel sizes and different convolution combinations. In all areas related to the image, such as classification, generation, detection, and semantic segmentation tasks have been used these blocks and gotten shown high performance [30]–[32].

Li et al. are developed a multi-scale residual block to obtain a high-level image from a low-level image. We have been generated a segmentation network using this block. Our segmentation network, which we will be explained in detail later, has achieved good performance [39]. A considerable body of research has leveraged the multi-scale block technique in various applications [40]–[42].

Proposed method

In this section, we are presented the segmentation network we developed. It is illustrated in Fig 1. Our network has an

encoder-decoder architecture. The encoder stream reveals contextual contexts in an image. The decoder stream

connects the low-level features coming from the encoder stream with skip connections.

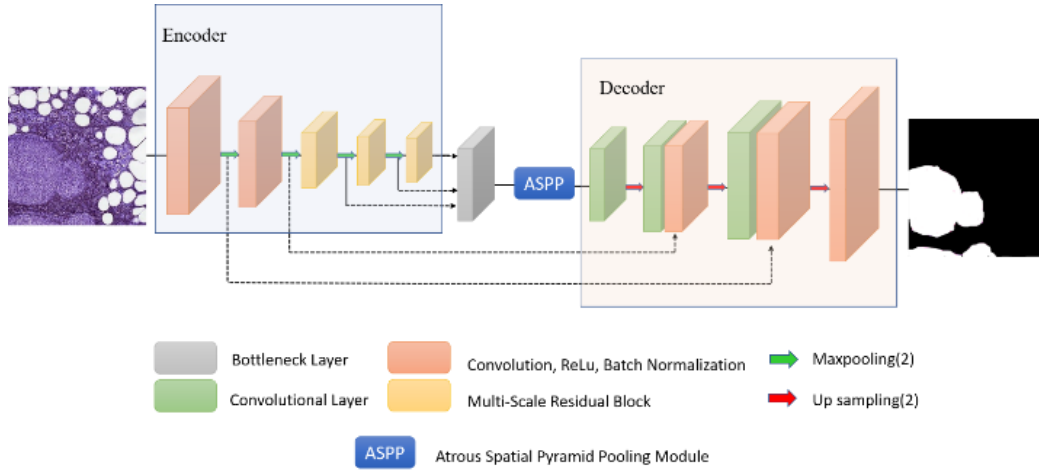


Figure 1: An illustration of the proposed segmentation network for histopathological images.

Encoder stream. Denoted as $\mathcal{E}_\theta(I)$ with parameters θ , takes input image $I \in \mathbb{R}^{C \times H \times W}$ with channel C (3), with height H , and weight W . This stream produces dense pixel features. The first two blocks of the encoder consist of convolution, activation function (ReLU) and batch normalization. Subsequently, the features in the image are extracted using three Multi-scale Residual Blocks (MSRB). Each scale features from MSRBS are collected in a bottleneck layer. We denote the output features from each MSRB as $e_i \in \mathbb{R}^{C \times \frac{H}{m} \times \frac{W}{m}}$, where m is the stride of the encoder stream and i represents MSRB number.

Fusion stream. Each MSRB's output has specific features. The bottleneck layer is used to prevent these features from disappearing between convolutional layers. The bottleneck layer also performs dimension reduction to avoid computational cost with convolution layer (1x1 kernel). In Equation (1) is given output of the bottleneck layer, where $e_0, e_1, \text{ and } e_2$ are the output features from MSRBS. BL represents the bottleneck layer, which concatenates and processes the input features to produce the combined feature e . Combined features pass through the Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) module to preserve multi-scale contextual information. Atrous convolution, also known as dilated convolution, differs from regular convolution by inserting zeros (or gaps) between kernel elements based on a defined dilation rate. This expands the receptive field exponentially, allowing the network to capture more extensive spatial context without increasing the kernel size or the number of learnable parameters. As a result, the ASPP module effectively extracts features at multiple scales, making it a valuable component in contemporary segmentation [43]. We denoted as $ASPP(e)$, takes the bottleneck layer's output as an input, as an output features representation F formulate in Equation (2). $ASPP(e)$ applies multiple dilated convolutions with different dilation rates to the input features e , expanding the receptive field without increasing the number of parameters.

$$e = BL([e_0, e_1, e_2]) \quad (1)$$

$$F = ASPP(e) \quad (2)$$

Decoder stream. Finally, low-resolution features merge with skip connections from the initial blocks of the network. Skip connections are essential for segmentation networks because they keep spatial properties that may be lost passing through many convolution layers. This stream, denoted as \mathcal{D}_γ with parameters γ , takes input the dense feature representation F coming from the ASPP module and produce a refined segmentation output

Multi-scale residual block

Different convolution blocks have been developed to capture wide and rich contextual representations. Li et al. used a Multi-scale Residual Block (MSRB) to improve image resolution [39]. Until today, this block has not been used for semantic segmentation in our knowledge. MSRB block is given in Fig 2. As seen, the block consists of two parts. The first part is multi-scale features merge, the second part is the residual part.

Multi-scale features fusion: There are two bypass networks. Each network has different convolution kernels. The purpose of the bypass is to share information between networks and to detect features on different scales. The process is defined by the Equation (3), (4), (5), (6), (7) are given below,

$$S_1 = \sigma(\omega_{3 \times 3}^1 * F_{n-1} + b^1) \quad (3)$$

$$P_1 = \sigma(\omega_{5 \times 5}^1 * F_{n-1} + b^1) \quad (4)$$

$$S_2 = \sigma(\omega_{3 \times 3}^2 * [S_1, P_1] + b^2) \quad (5)$$

$$P_2 = \sigma(\omega_{5 \times 5}^2 * [P_1, S_1] + b^2) \quad (6)$$

$$S' = \omega_{1 \times 1}^3 * [S_2, P_2] + b^3 \quad (7)$$

where b^1 , b^2 and b^3 represent bias of first, second and third layers of the block respectively. Same as bias ω^1 , ω^2 , and ω^3 represent weights of first, second and third layer of the block respectively. F denote the number of feature maps pass to the MSRB. σ represent an activation function (ReLU). The number of input features of the first layer and output layer are the same, but the number of middle layer features is twice of them. Equation (8) gives the description of MSRB.

$$F_n = S' + F_{n-1} \quad (8)$$

where F_n and F_{n-1} represent the input and output features of the MSRB. F_{n-1} helps to preserve information to pass the next block. The operation between F_{n-1} and S' are element-wise addition. Adding a shortcut connection to the output of block increases the performance of the network. At the end of each block, we put the pooling layer to reduce the computational cost.

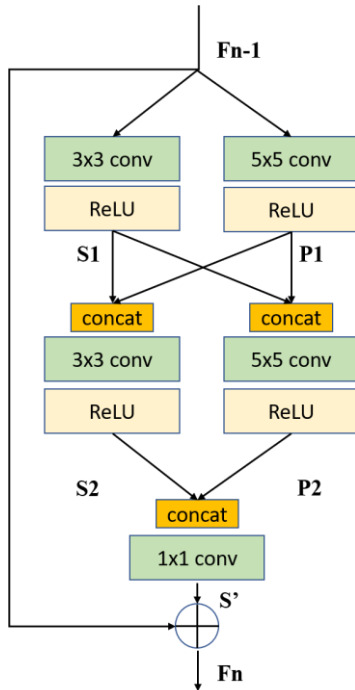


Figure 2: Multi-scale residual block (MSRB) structure.

Pyramid feature fusion module

We are used many blocks consecutively to get contextual features of image, during this transmission important features may be gradually disappearing. To prevent this loss, many methods have been developed in the literature. The effortless and useful of these methods is using skip connections.

To get outperform segmentation accuracy, we have been collected all the output features of multi-scale residual blocks. While doing this, we are brought the properties of different sizes to the first block output size by up-sampling. All these features pass through a convolutional layer with

kernel size 1x1 to reduce channel size otherwise computational complexity will be increased.

The structure of the fusion module is described as follows:

$$F = w * [F_1, F_2, F_3] + b \quad (9)$$

where F_1 , F_2 , and F_3 represents the concatenation of features from different MSRB blocks. b is the bias term. w is the weight of the final convolution layer.

Image segmentation

To obtain the output in the input size, the features maps must pass through the decoder section. The task of the decoder is to complete segmentation bypassing low-resolution feature maps into a set of convolution layers. During this task, bilinear interpolation is applied to increment the feature maps size. Bilinear interpolation helps to find out unknown pixel value by taking the weighted average of the known pixels surrounding. We use a fixed upscaling factor (x2) for the whole network.

The spatial information of contextual feature maps obtained by decreasing to low resolution is lost. As a solution, we have been applied skip connection, a technique used by many segmentation networks. In this technique, the feature maps of the encoder section received in certain scales are fused with certain scale feature maps as seen in Fig 1.

Results and discussion

To evaluate the success of the proposed segmentation network we have been used histopathological images that have tumors. First, the dataset and evaluation metrics used have been introduced. Then, the implementation of network and training details is given. Eventually, we have obtained results of the ablation studies and compared the network result with state-of-the-art segmentation networks. In addition, the quantitative results of the proposed network and segmentation networks are presented.

Dataset and evaluation metrics

In our experiments, we used Whole Slide Images (WSI) that we have obtained from the competition called Camelyon16 [44]. Camelyon16 is organized for automatic tumor detection in breast lymph nodes. The competition gives 400 WSIs. Table 2 provides detailed information about the dataset. The WSI size ranges from 1 to 4 gigabytes. They have a pyramid structure with multiple levels which are between 0 to 7. The competition has provided mask information for WSI which contains tumors.

Table 2-CAMELYON16 dataset

	Normal	Tumor	Total
Train	160	111	271
Test	80	49	129
Total	240	160	400

For training and testing the network, patches with 512x512 size have been prepared from level 3 of WSIs which have the tumor and normal tissue. The dataset contains 10,000

samples, with 9,000 used for training and 1,000 for testing purposes. During the training, 256x256 size patches are cropped randomly from images. Also, data augmentation techniques have been applied to the patches. In Fig 3, the images are cropped from a 512x512 image is given.

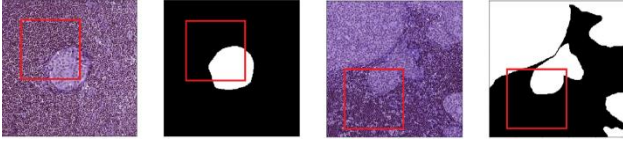


Figure 3: Histopathological images and their masks. The sizes of images are 512x512. The red square patches are randomly cropped with 256x256 size.

Evaluation metrics. In semantic segmentation, intersection over union (IoU) is the standard unit of measure. The Equation (10) is given IoU's formula for class i . Abbreviations our case tp denotes correctly classified pixels, fn denotes pixels not detected, and fp denotes background pixels classified as parts of the class. mIoU is obtained by dividing the sum of the IoU of each class by the number of classes. And Equation (11) is shown the formula of mIoU. N is the number of the classes.

$$IoU_i = \frac{tp}{tp+fp+fn} \quad (10)$$

$$mIoU = \frac{1}{N} \sum IoU_i \quad (11)$$

Pixel Accuracy (PA) also is used in the evaluation of the segmentation network performance. In Equation (12) is given the formula of PA ;

$$PA = \frac{tp+tn}{tp+fp+fn+tn} \quad (12)$$

where tn denotes the background pixels which are classified correctly.

Training and Implementation Details

We applied Stochastic Gradient Descent (SGD) optimizer with the momentum of 0.9 and the weight decay of 0.0001.

We have been used the learning rate of 0.0001 and batch size of 2. The total epochs number for all network training is 10. All our networks are implemented in Pytorch. Training is performed on a server computer with NVIDIA QUARD 4000 GPU under CUDA 9.0 without other ongoing programs.

We use the cross-entropy as the loss function of our network. The cross-entropy function;

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N (y_n \log y'_n + (1 - y_n) \log (1 - y'_n)) \quad (13)$$

where y is the ground truth, y' denotes the counterpart prediction segmentation maps, N is the total number of the pixels.

Ablation Study on the Proposed Network

Applied MSRB block and ASPP to catch content features for better histopathological image understanding. To confirm the performance of the network, we conducted experiments with different settings in Table 2. The first column of the table gives names of varieties of the network, the second, third, fourth and fifth columns give the number of kernels of their first, second, third and fourth blogs respectively. The last column shows if ASPP is used.

Table 3 gives the pixel accuracy (PA) and mIOU results of networks given in Table 2. As shown in Table 3, we are used 4 MSRBs for the first developed network, it yields a result of 62.69% mIOU and 78.00% PA . In the second experiment, we achieved a performance improvement of about 5% mIOU with 3 blocks. It is observed that adding more blocks to the network doesn't improve the performance. After the second experiment, kept the number of blocks fixed to 3 for other experiments. In the third experiment, to measure the effect of ASPP is been removed from the network which brings around %5 mIOU decline. Finally, the success of the network is tested by keeping the kernel size different for each block. This tactic has not improved the performance.

Table 2: Ablation study on the proposed network.

Network Name	1. MSRB	2. MSRB	3. MSRB	4. MSRB	ASPP
	Kernel Size	Kernel Size	Kernel Size	Kernel Size	
MSRSegNet_V1	5, 3	5, 3	5, 3	5, 3	Yes
MSRSegNet_V2	5, 3	5, 3	5, 3		Yes
MSRSegNet_V3	5, 3	5, 3	5, 3		No
MSRSegNet_V4	15, 7	7, 5	5, 3		Yes

Table 3: Ablation study on different proposed network on the histopathological image dataset.

Network	mIoU (%)	PA (%)
MSRSegNet_V1	62.69	78.00
MSRSegNet_V2	67.29	81.85
MSRSegNet_V3	63.14	78.47
MSRSegNet_V4	65.46	80.37

Table 4: Performance comparison between using and not using dropout.

Network	Dropout (0.05)	mIoU (%)	PA (%)
MSRSegNet_V1	Yes	69.21	83.66
MSRSegNet_V2	No	67.29	81.85

We adopted a dropout strategy to improve performance further. Dropout usually has been used by deep networks. We are gotten around 2.0% mIOU and pixel accuracy

improvement with a very small probability value for dropping out nodes. The results show in Table 4.

Comparisons with State-of-the-art Methods

Table 5 shows the results from state-of-art segmentation networks. Compared to the mIOU criterion, the segmentation network we developed has great success among others. There is a difference of approximately 5.0% between the second successful network and ours. These segmentation networks have a strong backbone. Compared to the PA criteria, the Deeplabv3+ [45] segmentation network is the most successful. There is a 2.0% difference with our network.

Table 6 shows the average execution time (seconds) and parameter numbers of the networks that achieved more than 60% mIOU success. The developed network is acceptable according to the number of parameters and time criteria.

Table 5: Performance comparison between the state-of-the-art segmentation networks. * Real-time segmentation networks

Networks	Backbone	Pretrained	mIoU(%)	PA(%)
FCN8s[37]	VGG16	Yes	15.16	30.33
UNet[36]			58.54	79.15
PSPNET [46]	ResNet101	Yes	53.11	78.05
ICNet[47]*			49.20	66.42
SegNet[48]*	VGG19	Yes	61.67	81.92
Deeplabv3+ [45]	Xception	No	61.90	85.65
MSRSegNet_V2			69.21	83.66

Table 6: Performance comparison between the state-of-the-art segmentation networks.

Networks	Average Execution Time (second)	# Parameters (Million)
SegNet[48]	0.072	9.789
Deeplabv3+[45]	0.148	54.612
MSRSegNet_V2	0.061	2.873

In experiments, all networks are trained with a fixed number of epochs. Since DeepLabv3 + has a lot of parameters, it may need more epochs to show better performance. The small epoch number may have been affected its success. Our network, which has a small number of parameters, has been successful compared to DeepLabv3+ as it is trained faster with the same epoch number

Qualitative analysis

A sample of histopathological images, the ground truth mask of it, the mask generated by DeepLabv3+, and the mask generated by the developed network are given in

Figure 4. As can be seen, the tumors are caught in both network masks. It can be observed that there is no network result exactly like the ground truth mask.

We think this is due to tumor border lines. Once the ground truth is examined, it is observed that the edges of the border regions were rounded. While the pathologist draws the boundary of the tumor area, he can draw a little rough. Small normal tissues may remain within the tumor tissue border. Likewise, small tumor tissues may remain within the normal tissue border. Watch out that the boundary lines of the masks created by the networks are indented and protruding. We had been expecting for this situation because the real tumor boundaries are not clear like the ground truth mask. The aim of the network is to reveal the contextual dependencies of the image. Finally, the network places textures with similar content in the same classes.

Qualitative results are given in Figure 5. Histopathological image samples are given in the first column and ground truth masks are given in the second column of Figure 5. In the third and last column give predicted segmentation masks by Deeplabv3+ and our network respectively. The

masks of our network are more like the ground truth mask compared to the other network masks.

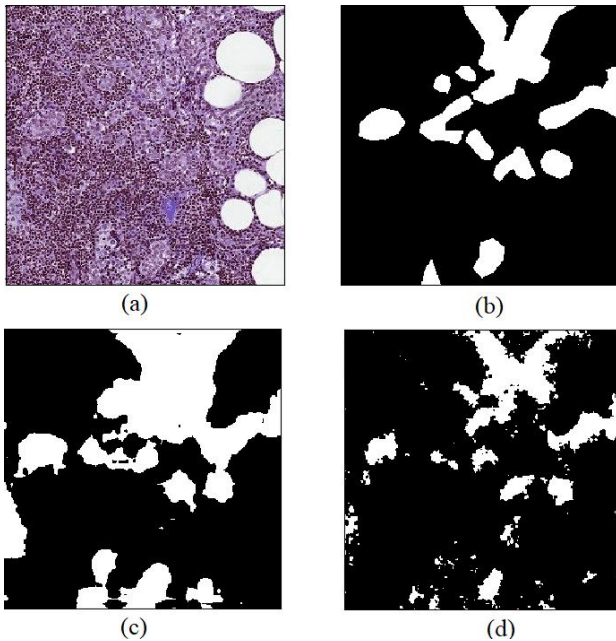


Figure 4: Comparison of the segmentation results of Deeplabv3+ and our method. (a) a sample of histopathological image, (b) the ground truth mask, (c) the prediction mask of Deeplabv3+, (d) the prediction mask of our segmentation network.

Conclusions

Early diagnosis saves lives in cancer patients. Therefore, automatic and rapid tumor segmentation is very important in histopathological images. In this paper, we proposed a new encoder-decoder CNN architecture (named as MSRSegNet) for tumor segmentation in histopathological images. Unlike the classic autoencoder approaches, the

proposed architecture consists of two different properties: 1) Information sharing between encoder and decoder blocks; 2) Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) module. Information sharing (collecting contextual features) allows the coded content to be taken into consideration during the expansion phase and ensures that the local/global features in the image can be captured. ASPP module preserve multi-scale contextual information. A series of ablation experiments have been carried out in order to evaluate the performances of segmentation methods in different characteristic image regions in a healthy way. The ability to achieve higher segmentation accuracy with fewer parameters than the Deeplabv3 method, which is frequently used in medical segmentation, clearly demonstrates the superiority of the proposed method.

In future research, more diverse and comprehensive datasets, including images from a broader range of cancer types, may need to be incorporated to rigorously evaluate and improve the generalizability of MSRSegNet. Furthermore, integrating advanced techniques, such as attention mechanisms or exploring transformer-based architectures, could potentially lead to further improvements in the model's performance. Additionally, developing a lighter version of the proposed architecture, optimized for real-time segmentation, could significantly increase its applicability in clinical settings.

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.

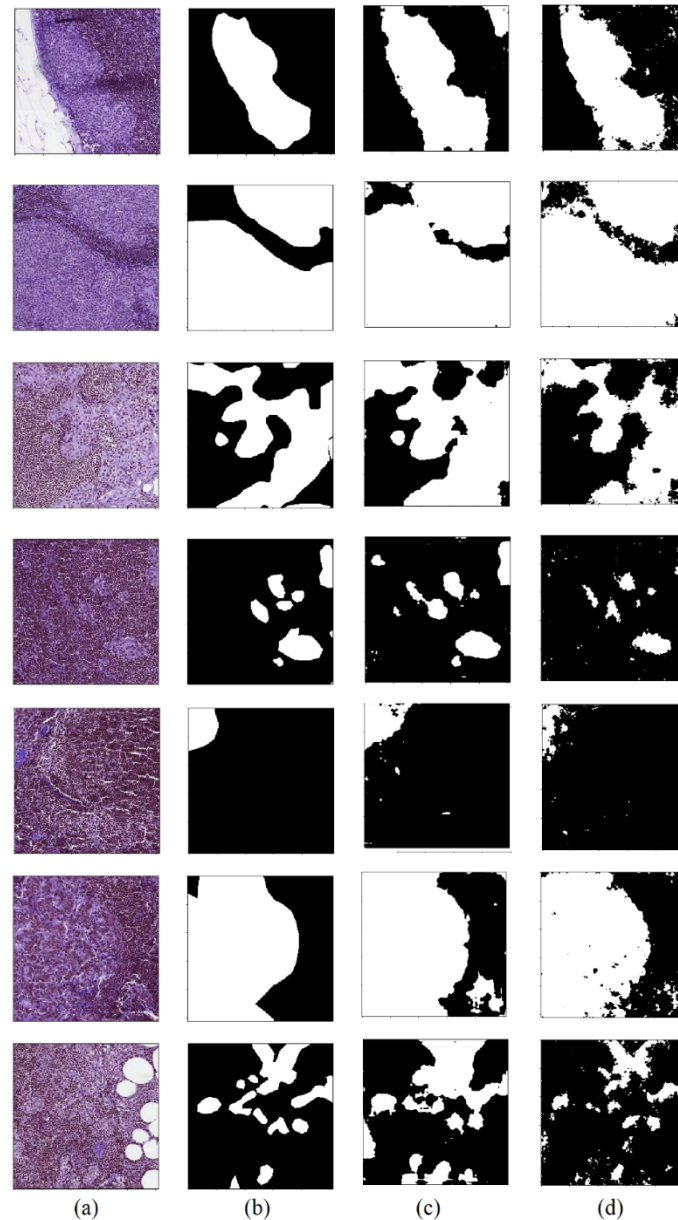


Figure 5: Comparison of the segmentation results of Deeplabv3+ and our method. (a) samples of histopathological image, (b) the ground truth masks, (c) the prediction masks of Deeplabv3+, (d) the prediction masks of our segmentation network.

References

- [1] World Health Organization, "WHO | Breast cancer," *Who*, 2018. <https://www.who.int/cancer/prevention/diagnosis-screening/breast-cancer/en/>.
- [2] M. N. Gurcan, L. E. Boucheron, A. Can, A. Madabhushi, N. M. Rajpoot, and B. Yener, "Histopathological Image Analysis: A Review," *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, 2009, doi: 10.1109/RBME.2009.2034865.
- [3] Z. Gandomkar, P. Brennan, and C. Mello-Thoms, "Computer-based image analysis in breast pathology," *J. Pathol. Inform.*, vol. 7, no. 1, p. 43, 2016, doi: 10.4103/2153-3539.192814.
- [4] K. Das, S. Conjeti, A. G. Roy, J. Chatterjee, and D. Sheet, "Multiple Instance Learning Of Deep Convolutional Neural Networks For Breast Histopathology Whole Slide Classification Kausik Das , Sailesh Conjeti , Abhijit Guha Roy Department of Electrical Engineering , IIT Kharagpur , India School of Medical Science an," no. Isbi, pp. 578–581, 2018.
- [5] F. Gu, N. Burlutskiy, M. Andersson, and L. K. Wilén, "Multi-resolution Networks for Semantic Segmentation in Whole Slide Images," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 11039 LNCS, pp. 11–18, 2018, doi: 10.1007/978-3-030-00949-6_2.

- [6] J. W. Wei, L. J. Tafe, Y. A. Linnik, L. J. Vaickus, N. Tomita, and S. Hassanpour, "Pathologist-level classification of histologic patterns on resected lung adenocarcinoma slides with deep neural networks," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 3358, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-40041-7.
- [7] Y. Celik, M. Talo, O. Yildirim, M. Karabatak, and U. R. Acharya, "Automated Invasive Ductal Carcinoma Detection Based Using Deep Transfer Learning with Whole-Slide Images," *Pattern Recognit. Lett.*, 2020, doi: 10.1016/j.patrec.2020.03.011.
- [8] K. Paeng, S. Hwang, S. Park, M. Kim, and S. Kim, "A Unified Framework for Tumor Proliferation Score Prediction in Breast Histopathology," Dec. 2016.
- [9] J. Wei, J. Wei, C. Jackson, B. Ren, A. Suriawinata, and S. Hassanpour, "Automated detection of celiac disease on duodenal biopsy slides: A deep learning approach," *J. Pathol. Inform.*, vol. 10, no. 1, p. 7, 2019, doi: 10.4103/jpi.jpi_87_18.
- [10] B. E. Bejnordi *et al.*, "Deep Learning-Based Assessment Of Tumor-Associated Stroma For Diagnosing Breast Cancer In Histopathology Images Diagnostic Image Analysis Group , Radboud University Medical Center , Nijmegen , Netherlands , Beth Israel Deaconess Medical Center , Harvard M," *2017 IEEE 14th Int. Symp. Biomed. Imaging (ISBI 2017)*, pp. 929–932, 2017, doi: 10.1109/ISBI.2017.7950668.
- [11] Y. Song, Q. Li, H. Huang, D. Feng, M. Chen, and W. Cai, "Low Dimensional Representation of Fisher Vectors for Microscopy Image Classification," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 36, no. 8, pp. 1636–1649, 2017, doi: 10.1109/TMI.2017.2687466.
- [12] X. Wang, R. Girshick, A. Gupta, and K. He, "Non-local Neural Networks," *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 7794–7803, 2018, doi: 10.1109/CVPR.2018.00813.
- [13] S. Wan *et al.*, "Integrated local binary pattern texture features for classification of breast tissue imaged by optical coherence microscopy," *Med. Image Anal.*, vol. 38, pp. 104–116, 2017, doi: 10.1016/j.media.2017.03.002.
- [14] P. J. Sudharshan, C. Petitjean, F. Spanhol, L. E. Oliveira, L. Heutte, and P. Honeine, "Multiple instance learning for histopathological breast cancer image classification," *Expert Syst. Appl.*, vol. 117, pp. 103–111, 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2018.09.049.
- [15] B. E. Bejnordi, G. Litjens, M. Hermsen, N. Karssemeijer, and J. A. W. M. van der Laak, "A multi-scale superpixel classification approach to the detection of regions of interest in whole slide histopathology images," *Med. Imaging 2015 Digit. Pathol.*, vol. 9420, p. 94200H, 2015, doi: 10.1117/12.2081768.
- [16] C. Higgins and C. Higgins, "Applications and challenges of digital pathology and whole slide imaging Applications and challenges of digital pathology," vol. 0295, 2015, doi: 10.3109/10520295.2015.1044566.
- [17] H. Lin, S. Member, H. Chen, S. Graham, and S. Member, "Fast ScanNet : Fast and Dense Analysis of Multi-Gigapixel Whole-Slide Images for Cancer Metastasis Detection," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018, doi: 10.1109/TMI.2019.2891305.
- [18] D. K. Das and P. K. Dutta, "Efficient automated detection of mitotic cells from breast histological images using deep convolution neutral network with wavelet decomposed patches," *Comput. Biol. Med.*, vol. 104, pp. 29–42, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.compbiomed.2018.11.001.
- [19] G. ÇELİK, "Histopatolojik Görüntülerden Kolon Kanseri Tespiti için EfficientNetB0 ve DVM Tabanlı Yaklaşım," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 2023, doi: 10.35234/fumbd.1323422.
- [20] O. Jimenez-del-Toro *et al.*, "Analysis of Histopathology Images," in *Biomedical Texture Analysis*, Elsevier, 2017, pp. 281–314.
- [21] J.-M. Chen *et al.*, "Computer-aided prognosis on breast cancer with hematoxylin and eosin histopathology images: A review," *Tumor Biol.*, vol. 39, no. 3, p. 101042831769455, Mar. 2017, doi: 10.1177/1010428317694550.
- [22] W. T. Xiao, L. J. Chang, and W. M. Liu, "Semantic Segmentation of Colorectal Polyps with DeepLab and LSTM Networks," 2018, doi: 10.1109/ICCE-China.2018.8448568.
- [23] M. Sebai, T. Wang, and S. A. Al-Fadhli, "PartMitosis: A Partially Supervised Deep Learning Framework for Mitosis Detection in Breast Cancer Histopathology Images," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45133–45147, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978754.
- [24] B. Olimov, K. Sanjar, S. Din, A. Ahmad, A. Paul, and J. Kim, "FU-Net: fast biomedical image segmentation model based on bottleneck convolution layers," 2021, doi: 10.1007/s00530-020-00726-w.
- [25] H. Zunair and A. Ben Hamza, "Sharp U-Net: Depthwise convolutional network for biomedical image segmentation," *Comput. Biol. Med.*, 2021, doi: 10.1016/j.compbiomed.2021.104699.
- [26] Z. Bozdag and M. F. Talu, "Pyramidal position attention model for histopathological image segmentation," *Biomed. Signal Process. Control*, 2023, doi: 10.1016/j.bspc.2022.104374.
- [27] Z. Bozdağ and F. M. Talu, "Pyramidal Nonlocal Network for Histopathological Image of Breast Lymph Node Segmentation," *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, 2020, doi: 10.2991/ijcis.d.201030.001.
- [28] J. M. J. Valanarasu, V. A. Sindagi, I. Hacihaliloglu, and V. M. Patel, "KiU-Net: Overcomplete Convolutional Architectures for Biomedical Image and Volumetric Segmentation," *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2022, doi:

- 10.1109/TMI.2021.3130469.
- [29] A. Srivastava *et al.*, “MSRF-Net: A Multi-Scale Residual Fusion Network for Biomedical Image Segmentation,” *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, 2022, doi: 10.1109/JBHI.2021.3138024.
- [30] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, “Densely connected convolutional networks,” 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.243.
- [31] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep Residual Learning for Image Recognition,” *2016 IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 770–778, Dec. 2015, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [32] C. Szegedy *et al.*, “Going deeper with convolutions,” in *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Jun. 2015, pp. 1–9, doi: 10.1109/CVPR.2015.7298594.
- [33] T. Takikawa, D. Acuna, V. Jampani, and S. Fidler, “Gated-SCNN: Gated Shape CNNs for Semantic Segmentation,” in *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Oct. 2019, pp. 5228–5237, doi: 10.1109/ICCV.2019.00533.
- [34] J. Fu *et al.*, “Dual Attention Network for Scene Segmentation,” *2019 IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 3141–3149, Sep. 2018, doi: 10.1109/CVPR.2019.00326.
- [35] Z. Zhu, M. Xu, S. Bai, T. Huang, and X. Bai, “Asymmetric Non-Local Neural Networks for Semantic Segmentation,” in *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Oct. 2019, pp. 593–602, doi: 10.1109/ICCV.2019.00068.
- [36] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation,” in *MICCAI2015*, 2015, pp. 234–241.
- [37] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell, “Fully convolutional networks for semantic segmentation,” in *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Jun. 2015, pp. 3431–3440, doi: 10.1109/CVPR.2015.7298965.
- [38] A. Pfeuffer, K. Schulz, and K. Dietmayer, “Semantic Segmentation of Video Sequences with Convolutional LSTMs,” *IEEE Intell. Veh. Symp. Proc.*, May 2019, doi: 10.1109/IVS.2019.8813852.
- [39] J. Li, F. Fang, K. Mei, and G. Zhang, “Multi-scale Residual Network for Image Super-Resolution,” *Eur. Conf. Comput. Vis.*, pp. 527–542, 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01237-3_32.
- [40] R. Lan, L. Sun, Z. Liu, H. Lu, C. Pang, and X. Luo, “MADNet: A Fast and Lightweight Network for Single-Image Super Resolution,” *IEEE Trans. Cybern.*, 2021, doi: 10.1109/TCYB.2020.2970104.
- [41] Y. Chen, R. Xia, K. Yang, and K. Zou, “MFFN: image super-resolution via multi-level features fusion network,” *Vis. Comput.*, 2024, doi: 10.1007/s00371-023-02795-0.
- [42] C. He *et al.*, “Camouflaged Object Detection with Feature Decomposition and Edge Reconstruction,” 2023, doi: 10.1109/CVPR52729.2023.02111.
- [43] L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam, “Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation,” 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_49.
- [44] B. Ehteshami Bejnordi *et al.*, “Diagnostic Assessment of Deep Learning Algorithms for Detection of Lymph Node Metastases in Women With Breast Cancer,” *JAMA*, vol. 318, no. 22, p. 2199, Dec. 2017, doi: 10.1001/jama.2017.14585.
- [45] L. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam, “Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation,” pp. 833–851, Feb. 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01234-2_49.
- [46] H. Zhao, J. Shi, X. Qi, X. Wang, and J. Jia, “Pyramid scene parsing network,” in *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*, 2017, vol. 2017-Janua, pp. 6230–6239, doi: 10.1109/CVPR.2017.660.
- [47] H. Zhao, X. Qi, X. Shen, J. Shi, and J. Jia, “ICNet for Real-Time Semantic Segmentation on High-Resolution Images,” 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01219-9_25.
- [48] V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, “SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2644615.



Çift-yönlü dokuma kumaş takviyeli kompozit levhalarda mekanik özelliklerin anizotropiye bağlı değişimi ve optimum laminasyon tasarımı önerisi

Variation in mechanical properties with anisotropy and proposal for optimal design of lamination in bidirectional woven fabric reinforced composite sheets

Raif Sakin^{1,2*}

¹Balıkesir Üniversitesi Edremit Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, rsakin@balikesir.edu.tr

²Balıkesir Üniversitesi, Kompozit Araştırma Eğitim-Simülasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6009-9573>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 12 Nisan 2024
Revizyon 10 Temmuz 2024
Kabul 11 Temmuz 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

kompozit levha, laminasyon tasarımı, istifleme sırası, mekanik özellikler, anizotropi

ÖZ

Bu çalışmanın ilk amacı, çift-yönlü dokuma kumaş takviyeli kompozit levhalarda mekanik özelliklerin anizotropiye bağlı değişimini incelemektir. Diğer amaç ise kompozit levha üretiminde mekanik özelliklere ve anizotropiye dayalı optimum laminasyon tasarımını (istifleme sırası) belirlemede kullanılabilecek grafiksel bir yöntemi açıklamaktır. Bu amaçlar için gerekli levhaların imalatında reçine transfer kalıplama yönteminden yararlanılmıştır. Matris ve fiber malzeme olarak sırasıyla, düşük viskoziteli ticari bir polyeester reçine ile dört farklı alansal yoğunluğa sahip çift-yönlü düz cam-dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Her bir levhada kullanılan fiber ağırlığı 750 g ve levhanın merkezinden geçen orta-düzleme göre simetrik olmak şartıyla on farklı laminasyon tasarımı denenmiştir. İmalat prosesi sonunda kalıptan 50 × 50 cm boyutlarında farklı katman sayısı, farklı kalınlık ve fiber hacimlerine sahip olan kompozit levhalar elde edilmiştir. Levhalardan 0°, 15°, 30° ve 45° yönlerinde standartlara uygun numuneler kesilerek, bunların çekme ve eğilme gibi mekanik özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, her bir levhanın laminasyon tasarımı ve fiber oryantasyonuna bağlı olarak mekanik anizotropi faktörleri hesaplanmıştır. Toplam 365 adet numune test edilmiş ve veriler SPSS-24 yazılımıyla istatistik olarak analiz edilmiştir. Mekanik özelliklerin tahmini için fiber hacmi, katman sayısı, levha kalınlığı ve fiber oryantasyonu gibi değişkenlere bağlı olarak regresyon denklemleri elde edilmiştir. Bütün çekme, eğilme mukavemeti ve modül verileri MS-Excel'e taşınarak radar (spider) grafikleri çizilmiş ve bu grafikler okunarak optimum laminasyon tasarımları önerilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 April 2024
Received in revised form 10 July 2024
Accepted 11 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

composite sheet, laminate design, stacking sequences, mechanical properties, anisotropy

Doi: [10.24012/dumf.1467637](https://doi.org/10.24012/dumf.1467637)

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The first aim of this study is to investigate the variation in the mechanical properties with the anisotropy of bidirectional woven fabric-reinforced composite sheets. The other aim is to describe a graphical method that can be used to determine the optimum lamination design (stacking sequences) based on the mechanical properties and anisotropy in composite sheet production. The resin transfer molding method was used to manufacture the plates required for these purposes. Composite sheets were fabricated using low-viscosity commercial polyester resin as the matrix and bidirectional woven glass fabrics with four different areal densities as the fibers. It was tested ten different lamination designs, which were symmetric about the mid-plane, and the total fiber weight of the sheets was 750 g. Composite sheets of dimensions 50 × 50 cm with different numbers of layers, thicknesses, and fiber volumes were produced at the end of the process. Standard specimens were cut from the sheets in the 0°, 15°, 30°, and 45° directions, and their mechanical properties, such as tensile and flexural properties, were tested. In addition, the mechanical anisotropy factors were calculated for each sheet, depending on the lamination design and fiber orientation. SPSS-24 software was used to statistically analyze the data from a total of 365 specimens. Regression equations were obtained to predict the mechanical properties based on variables such as fiber volume, number of layers, sheet thickness, and fiber orientation. All tensile, flexural, and modulus data were transferred to MS Excel, and spider graphs were drawn. The optimum lamination designs were suggested by reading these graphs.

Giriş

Üretim teknolojisinde kullanılan elyaf (fiber) takviyeli polimer (FRP) kompozitler ve kullanım alanları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. FRP'ler uygulama yerine bağlı olarak birçok önemli özelliğe sahip olmaları nedeniyle savunma, havacılık ve otomotiv sanayi başta olmak üzere, deniz, kara araçları ile inşaat ve enerji sektörlerinde de oldukça yaygın kullanılmaktadır [1-3]. Düşük özgül ağırlıkları nedeniyle tüm FRP kompozitlerin en önemli avantajı, metal ve alaşımları dahil bilinen geleneksel bir çok malzemeye göre daha hafif, daha yüksek mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranlarına sahip olmalarıdır [4]. FRP'ler bahsedilen yüksek mekanik özellikleri yanında, kontrol edilebilir elektrik iletkenliği, düşük termal genleşme katsayısı, iyi yorulma direnci ve karmaşık şekilli malzemelerin üretimi için uygunluk gibi birçok mükemmel özelliğe de sahiptir. Bu üstün özellikleri sayesinde FRP'ler birçok uygulamada metallerin yanı sıra ahşap, plastik veya alüminyum gibi bilinen malzemelerin de alternatifi haline gelmiştir. FRP'lerin temelini oluşturan bileşenlerden karbon, kevlar, bor ve cam gibi elyaflar, hafif, ısıya dayanıklı ve mukavemeti yüksek malzemelerdir. Mukavemet özellikleri karbon ve kevlara kıyasla daha düşük olsa da, cam elyafı daha az kırılğan ve daha ekonomiktir. Cam elyafının dokunmasıyla elde edilen tek veya çift yönlü kumaşlarla takviyeli polimer kompozitler (GFRP) ise maliyet dahil bahsedilen fiziksel ve mekanik özelliklerin iyi bir kombinasyonunu oluşturur. Bu nedenle GFRP'ler özellikle gıda ve kimyasal ürün depolama tankları, silolar, ulaştırma (otomotiv, tren, tekne, yat, uçak, vb.), elektrik-elektronik ve alt-üst yapı (köprü, bina, profil, boru, vb.) sektörlerinin vazgeçilmezi haline gelmiştir [5-8]. Ancak bütün bu olumlu özelliklerine rağmen, genel olarak FRP'ler anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı mekanik özellikleri fiber oryantasyonu ve laminasyon tasarımına bağlı olarak ciddi oranda azalma göstermektedir [9]. Bu olumsuzluğun en aza indirilmesi için GFRP laminatların tasarım çeşitliliğinden faydalanılır. Örneğin, bir laminatta birden fazla katman ve elyaf yapısı kullanılabilir. Elyaf her hangi bir yöndeki yüke dayanacak şekilde yerleştirilebilir veya son ürün farklı oryantasyonlarda kesilerek amaca uygun olarak kullanılabilir. Böylece izotropik malzemelerde olduğu gibi "her yönde eşit mukavemet yerine GFRP'lerde istenilen yönde mukavemet" elde edilerek olumsuzluk azaltılabilir. Literatürde elyaf ve dokuma cinsi, istifleme sırası, katman sayısı ve fiber oryantasyonunun kompozit levhaların mekanik özelliklerine olan etkileri üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [10-14]. Buna rağmen tasarım parametreleri ve elde edilen optimum değerler çok sınırlıdır [15]. Çok sayıda tasarım değişkeninin dahil olmasından dolayı, çeşitli kısıtlamalara sahip kompozit laminatların istifleme dizisi veya tabaka sayısı tasarımı için "etkili, verimli, amaca uygun ve basit optimizasyon algoritmaları oluşturmak" halen önemini koruyan konulardan biridir [16]. Bu konuda çok sayıda kombinasyondan oluşan gerçek test sonuçlarına dayalı deneysel ve istatistiksel çalışmalar oldukça zahmetli, pahalı ve zaman alıcı olması nedeniyle sayıca azdır. Bu nedenle literatürde genellikle gerçek test kombinasyonlarını azaltmaya, ideal kombinasyonları bulmaya veya doğrulamaya yönelik istatistiksel (simülasyon) deney

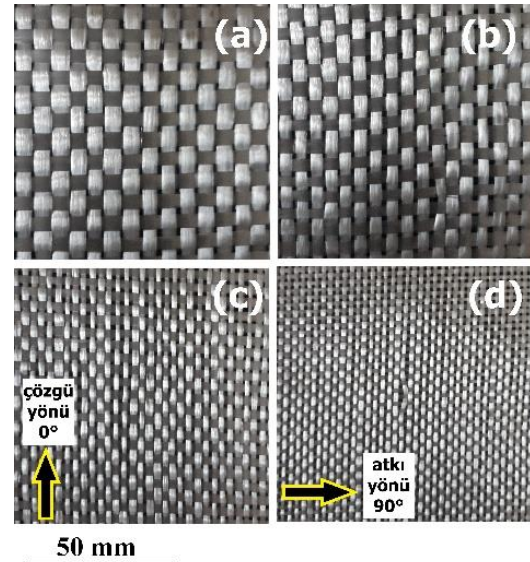
tasarımları yapılmaktadır [11]. Bu kapsamda; epoksi veya polyester matrisli çift yönlü cam, karbon, kevlar, bor elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerine ilişkin laminat tasarım optimizasyonları Taguchi, yanıt yüzey (RSM) ve genetik algoritma gibi yöntemler kullanılarak yapılmıştır [1,17-25].

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak, istatistiksel analiz ve optimizasyonda kombinasyonları azaltmak için herhangi bir modele uymak veya bir deney tasarımı kullanmak yerine gerçek test verileri kullanılmıştır. Test verileri anlaşılabilir basit grafiklere dökülmüş ve bu grafiklerin okunmasıyla, en olumlu veya olumsuz laminasyon tasarımlarının anlaşılacağı bir yöntem sunulmuştur. Ayrıca elde edilen 365 adet test verisi SPSS-24 yazılımıyla analiz edilerek; fiber hacmi, katman sayısı, levha kalınlığı ve fiber oryantasyonu gibi değişkenlere bağlı olarak mekanik özelliklerin tahmini için kullanılacak lineer regresyon denklemleri elde edilmiştir.

Malzeme ve Metot

Kompozit levha üretimi

Bu çalışmada, GFRP kompozit laminatların üretimi için fiber olarak 800, 500, 400, 300 ve 200 g/m² alansal yoğunluğa sahip E-camı dokuma fitil elyaflar ve matris olarak ise yoğunluğu $\rho=1.094 \text{ g/cm}^3$ olan ortoftalik polyester reçine kullanılmıştır. Fiberler, Şekil 1'de görülen ve Şişecam Cam Elyaf A.Ş. tarafından üretilen sürekli cam elyafından (WR) dokunmuş çift eksenli kumaşlardır. Matris ise Poliya Poliester Sanayi ve Tic. A. Ş. tarafından üretilen Polipol™ 336 polyester reçinesidir. Sertleştirici ve hızlandırıcı olarak kullanılan katalizörler ise metil etil keton peroksit (MEKP) ve kobalt (CoNa) naftenat'tır. Cam elyaf, polyester ve diğer bileşenlerin temel mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



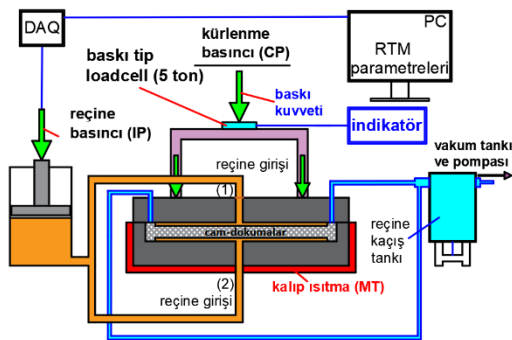
Şekil 1. Cam-dokuma kumaş tipleri; (a) 800, (b) 500, (c) 300 ve (d) 200 g/m²

Kompozit levhaların üretimi için Şekil 2'de şematığı görülen reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi kullanılmıştır. Enjeksiyon sonunda metal kalıba üstten ortalama 134 kPa'lık kütleleme basıncı (CP) uygulanmıştır. Daha sonra levhalar, ortalama 45 °C'ye kadar ısıtılmış sıcak

kalıp içinde ve sabit basınç altında 22–48 saat aralığında kürelemeye tabii tutulmuştur. On farklı istifleme sırasına sahip cam-dokuma kumaşlar, 5, 6, 7, 8 veya 10 katmanlı olarak tasarlanıp kalıp boşluğuna yerleştirilmiştir. Proses sonunda farklı kalınlık (2.49–3.18 mm) ve elyaf hacimlerine (%38.46–48.01) sahip 50 × 50 cm boyutlarında 10 adet kompozit levha elde edilmiştir.

Tablo 1. Laminat bileşenleri ve mekanik özellikleri [11]

Matris	Fiber
Eğilme dayanımı=113 MPa	Yoğunluk, $\rho=2.54 \text{ g/cm}^3$
Eğilme modülü=3.11 GPa	Tipik çap=12-17 μm
Çekme dayanımı=64 MPa	Çekme dayanımı=2.4 GPa
Elastisite modülü=2.8 GPa	Elastisite modülü $\approx 72.4 \text{ GPa}$
Eğmede max. deformasyon=%4.3	Nihai uzama=%2.97
Çekmede nihai uzama=%2.8	Poisson oranı=0.22
Poisson oranı=0.36	

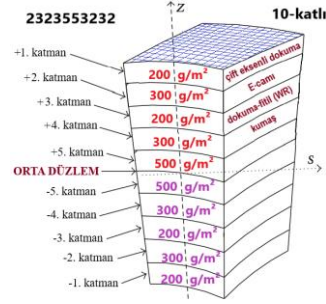


Şekil 2. Reçine transfer kalıplama yönteminin şematığı

Tablo 2’de kompozit levhalar için seçilen laminasyon tasarımları ve bazı malzeme değişkenleri görülmektedir. Burada; SN: sıra numarası, SS: istifleme kodu, NL: katman sayısı (adet), VF: fiber hacim oranı (%), ST_{ort} : ortalama levha kalınlığı (mm), sd: standart sapma, ST_{min} ve ST_{max} ise sırasıyla minimum ve maksimum levha kalınlığıdır. Levha sıra numaraları, cam-dokumaların istifleme kodu ve katman sayısına göre küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. Örneğin 1-nolu levhadaki 38883 kodu, cam dokuma kumaşların sırasıyla 300/800/800/800/300 g/m^2 şeklinde istiflendiği ve 5 katmanlı bir laminat elde edildiği anlamına gelir. Şekil 3’de ise elde edilen simetrik bir levhanın laminat tasarımına ait enine kesit şematığı görülmektedir. İlgili Şekil, 9 sıra numaralı, 2323553232 kodlu ve 10-katmanlı laminat tasarımını ifade etmektedir. Her bir levhada kullanılan fiber ağırlığı 750 gram olarak sabit ve şematik resimde görüldüğü gibi levhanın merkezinden geçen orta-düzleme göre simetrik laminasyon tasarımları elde edilmiştir.

Tablo 2. Laminasyon tasarımları ve malzeme değişkenleri

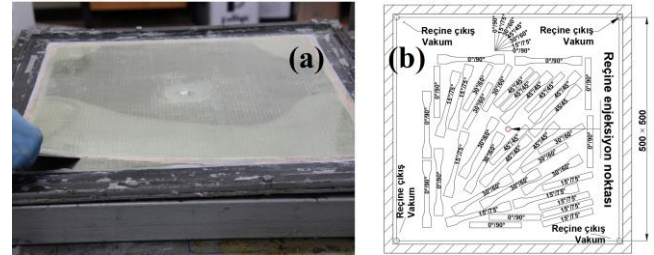
SN	SS kodu	NL	VF	ST_{min}	ST_{max}	$ST_{ort} \pm sd$
1	38883	5	42.05	2.74	3.02	2.85 ± 0.12
2	83838	5	40.84	2.79	3.03	2.94 ± 0.10
3	258852	6	48.01	2.49	2.51	2.50 ± 0.01
4	852258	6	42.62	2.62	2.97	2.80 ± 0.14
5	3538353	7	40.31	2.76	3.17	2.98 ± 0.18
6	5338335	7	42.21	2.64	2.99	2.83 ± 0.11
7	55322355	8	40.51	2.87	2.99	2.96 ± 0.05
8	83222238	8	39.59	2.97	3.10	3.03 ± 0.06
9	2323553232	10	38.46	3.04	3.18	3.11 ± 0.06
10	5323223235	10	40.88	2.80	3.10	2.93 ± 0.12



Şekil 3. Örnek bir levhanın istifleme dizilimi

Mekanik özellikler için çekme ve eğilme testleri

Bu çalışmada üretilen kompozit levhalar, küreleme süresi sonunda Şekil 4(a)’da görüldüğü gibi kalıptan çıkarılmıştır. Kürlenmiş levhalardan Şekil 4(b)’de görüldüğü gibi 0°, 15°, 30° ve 45° yönlerinde, EN-ISO-527-4 standardına uygun dog-bone geometrisinde çekme numuneleri (20×150 mm) ve ASTM-D7264/D7264M standardına uygun eğilme numuneleri (13×115 mm) kesilmiştir [26-27]. Elde edilen numuneler çekme ve üç-noktadan eğilme testlerine tabii tutularak; maksimum çekme mukavemeti (σ_{tu}), elastisite modülü (E_f), maksimum eğilme mukavemeti (σ_{fu}) ve eğilme modülü (E_f) gibi mekanik özellikler elde edilmiştir. Şekil 5 ve 6’da sırasıyla hasara uğrayan bazı çekme ve eğilme numuneleri görülmektedir.



Şekil 4. a) levhanın kalıptan alınışı, b) numune kesim yönleri



Şekil 5. Çekme testi sonucu hasara uğrayan numuneler



Şekil 6. Eğilme testi sonucu hasara uğrayan numuneler

Çift-yönlü dokuma elyaf takviyeli kompozit levhalar için mekanik anizotropi faktörü (AF)

Çift-yönlü dokumalarda çözümlü (0°) ve atkı (90°) yönlerinin (Şekil 1) mekanik özellikleri arasında belirgin bir fark yoktur. Ancak bu dokumalarda çekme ve eğilme gibi mekanik özelliklerin en zayıf olduğu fiber oryantasyonu daima $\pm 45^\circ$ ’lik yöndür. Bu nedenle çift-yönlü dokuma kumaşlarda maksimum mekanik anizotropi faktörü Denklem (1)’deki gibi modüle bağlı olarak veya Denklem (2)’deki gibi mukavemete bağlı olarak hesaplanabilir [11-12,28].

$$AF_{\text{mod}} = E_{0/90} / E_{\pm 45} \quad (1)$$

$$AF_{\text{muk}} = \sigma_{0/90} / \sigma_{\pm 45} \quad (2)$$

Burada; $E_{0/90}$ ve $\sigma_{0/90}$: sırasıyla en yüksek yöndeki ($0^\circ/90^\circ$) modül ve mukavemet, $E_{\pm 45}$ ve $\sigma_{\pm 45}$: sırasıyla en zayıf yöndeki ($\pm 45^\circ$) modül ve mukavemettir. Bu çalışmada çift-yönlü cam-dokuma kumaşlar için mekanik anizotropi faktörleri, çekme ve eğilme testlerinden elde edilen dört farklı mekanik test verisine bağlı olarak hesaplanmıştır. Maksimum anizotropi faktörleri; çekme mukavemeti için AFT_{s45} , çekme modülü için AFT_{m45} , eğilme mukavemeti için AFF_{s45} ve eğilme modülü için AFF_{m45} kısaltmalarıyla ifade edilmiştir. Tasarımcı, hangi anizotropi faktörlerini (AF) esas alacağını kompozit levhanın kullanım amacına göre karar vermelidir [29].

İstatistik analizler

Mekanik özellikler (anizotropi faktörleri dahil) ile fiber hacmi (VF), katman sayısı (NL), levha kalınlığı (ST) ve fiber oryantasyonu (FO) gibi değişkenler arasındaki ilişkilerin anlaşılabilmesi için önce Pearson korelasyon analizleri yapılmıştır. Daha sonra, mekanik özelliklerin belirtilen değişkenlere bağlı tahmini için Stepwise metodu ile çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Çekme testleri için 190, eğilme testleri için 175 adet olmak üzere toplam 365 adet veri analiz edilmiş olup adı geçen istatistiksel analizler SPSS-24 yazılımı ile yapılmıştır.

Sonuçlar ve tartışma

Mekanik özellikler ile değişkenler arasındaki ilişkiler

Korelasyon analizi sonucunda elde edilen ve mekanik özellikler ile değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları (r) Tablo 3’te görülmektedir. Buradaki katsayı iki veri arasındaki ilişki düzeyini şu şekilde gösterir: $r < 0.20$ ve sıfıra yakın değerler “çok zayıf ilişkiyi”, $r = 0.20 - 0.40$ arasında ise “zayıf ilişkiyi”, $r = 0.41 - 0.60$ arasında ise “orta düzeyde ilişkiyi”, $r = 0.61 - 0.80$ arasında ise “yüksek düzeyde ilişkiyi” ve $r = 0.81 - 1.0$ ise “çok yüksek ilişkiyi” ifade eder [30]. Bahsedilen r katsayısı dışında (*) ve (**) simgeleri, ikili ilişkileri sırasıyla $P < 0.05$ ve $P < 0.01$ düzeyinde anlamlandırır. Yıldız simgesi olmayan değişkenler ise neredeyse “anlamsız” veya “çok zayıf düzeyde etkili” olarak tanımlanabilir. Korelasyon katsayıları önündeki işaretler ise etki yönlerini (- veya +) ifade etmektedir. Buna göre; sırasıyla mekanik özellikleri negatif yönde ve anlamlı düzeyde (** $P < 0.01$) etkileyen değişkenlerin fiber oryantasyonu (FO) ve levha kalınlığı

(ST) kalınlığı olduğu anlaşılmaktadır. Anizotropiyi yüksek düzeyde negatif olarak ve anlamlı yönde (** $P < 0.01$) etkileyen faktör ise doğal olarak fiber oryantasyonudur. İlâveten Tablo 3’de istifleme sırası (SS) ile anizotropi faktörlerinin diğer değişkenlerle olan ikili ilişki düzeyleri anlaşılabilir.

Tablo 3. Korelasyon katsayıları

Çekme	SS	VF	NL	ST	FO
σ_{tu}	-0.046	0.114	-0.054	-0.309**	-0.868**
E_t	-0.180*	0.185*	-0.203**	-0.379**	-0.876**
AFTs	-0.098	0.114	-0.088	0.193	0.945**
AFTm	0.165	-0.124	0.210	0.369*	0.869**
SS	1	-0.522**	0.971**	0.466**	0.000
Eğilme	SS	VF	NL	ST	FO
σ_{fu}	-0.119	0.121	-0.137	-0.355**	-0.943**
E_f	-0.152*	0.192*	-0.175*	-0.447**	-0.882**
AFFs	0.059	-0.022	0.049	0.220	0.964**
AFFm	0.136	-0.083	0.121	0.290	0.896**
SS	1	-0.522**	0.971**	0.446**	0.000

Pearson korelasyonu ** $P < 0.01$ düzeyinde ve * $P < 0.05$ düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü). SS: laminasyon tasarımı, VF (%): fiber hacmi, NL: katman sayısı, ST (mm): levha kalınlığı, FO ($^\circ$): fiber oryantasyonu.

Mekanik özelliklerin tahmini

Mekanik özellikler üzerinde en etkili değişkenlere bağlı olarak lineer regresyon denklemleri elde edilmiş ve Tablo 4’de verilmiştir. Bazı sınır şartlara bağla olmakla birlikte bu denklemler, test verilerinin saçılımını uygun bir doğrulukta (R^2) formülize etmektedir. Dolayısıyla elde edilen lineer denklemler, mekanik özelliklerin tahmininde rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca her ne kadar Tablo 3’deki korelasyonlarda bazı mekanik özellikleri birden fazla etkileyen (*) veya (**) simgeli değişken olduğu görülse de esasen çoklu regresyon analizinde hepsinin aynı anda lineer regresyon denklemine girecek kadar etkili olmadığı anlaşılabilir. Örneğin ilk bakışta Tablo 3’deki ikili ilişkilere göre; E_t ’nin NL, ST ve FO değişkenlerinden negatif yönde, zayıf (*) veya yüksek düzeyde etkilendiği (**) görülmektedir. Buna rağmen, çoklu regresyon analizine göre anlamlı olup Tablo 4’deki denklemde yerini alan etkili değişkenlerin FO ve NL olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Regresyon analizi sonuçları

Regresyon denklemleri *	R^2	df
$\sigma_{tu} = 404.1 - 4.45 \times FO - 53.52 \times ST$	0.771	2, 189
$E_t = 17970 - 228.5 \times FO - 548.7 \times NL$	0.813	2, 189
$\sigma_{fu} = 609.7 - 6.94 \times FO - 53.69 \times ST - 7.68 \times NL$	0.926	3, 174
$E_f = 27950 - 238.5 \times FO - 3415 \times ST - 346.5 \times NL$	0.903	3, 167

*Regresyon denklemleri $P < 0.01$ düzeyinde anlamlıdır. Bazı uç değerler elenmiştir. Sınır şartlar: $0 \leq FO \leq 45$, $5 \leq NL \leq 10$, $2.49 \leq ST \leq 3.18$

Laminasyon tasarımı olarak test edilen on farklı istifleme sırası (SS) 1–10 arasında numaralandırılarak istatistik analizlere dahil edilmesine rağmen ilk bakışta, mekanik özellikler üzerinde çok da etkili olmadığı ($P \geq 0.05$) görülmüştür. Ancak Tablo 3’e dikkat edilirse hem çekme hem de eğilme testlerindeki verilerin korelasyon analizine göre NL ile SS arasında “yüksek düzeyde” ilişki (** $P < 0.01$) vardır. Buradan hareketle bu değişkenlere özel regresyon analizi yapıldığında çekme testi için Denklem (3), eğilme testi için ise Denklem (4) elde edilir. Bu denklemlerden elde edilen NL değeri ise Tablo 4’deki regresyon denklemlerinde yerine konulabilir. Böylece 1 ile 10

arasında numaralanmış laminasyon tasarımlarının mekanik özelliklere etkisi ortaya konulabilir.

$$NL = 3.994 + 0.586 \times SS \quad (R^2=0.944) \quad (3)$$

$$NL = 4.005 + 0.582 \times SS \quad (R^2=0.943) \quad (4)$$

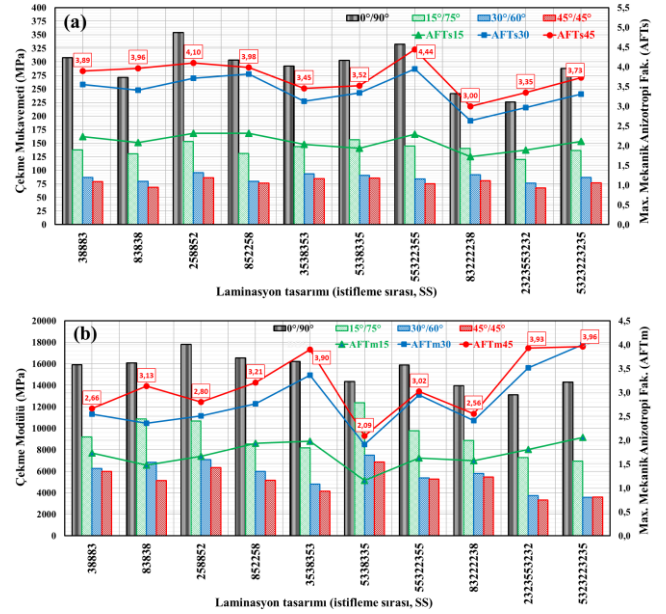
Korelasyon veya regresyon sonuçları tablolarında görülen değişkenlerden ziyade mekanik özellikleri birden fazla değişken aynı anda etkilemektedir. Dolayısıyla, kompozit levhalarda mekanik özellikler ve anizotropiye bağlı laminasyon tasarımına karar vermede, korelasyon ve regresyon sonuçları güçlü ip uçları verse de tam olarak yeterli değildir. Daha güçlü çıkarım yapabilmek için bütün çekme, eğilme mukavemeti ve modül verileri MS-Excel'e taşınmıştır. Öncelikle Şekil 7 (a, b) ve 8 (a, b)'de görüldüğü gibi 0° , 15° , 30° ve 45° 'lik oryantasyonlarda kesilen on farklı laminasyon tasarımındaki levhaların mukavemet, modül ve anizotropi faktörlerini içeren üçlü grafikler elde edilmiştir. Optimum laminasyon tasarımına daha net karar verebilmek için ise radar (spider) grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler okunarak en olumlu veya olumsuz laminasyon tasarımları daha net anlaşılabilir.

Optimum laminasyon tasarımı ve istifleme sırası belirleme

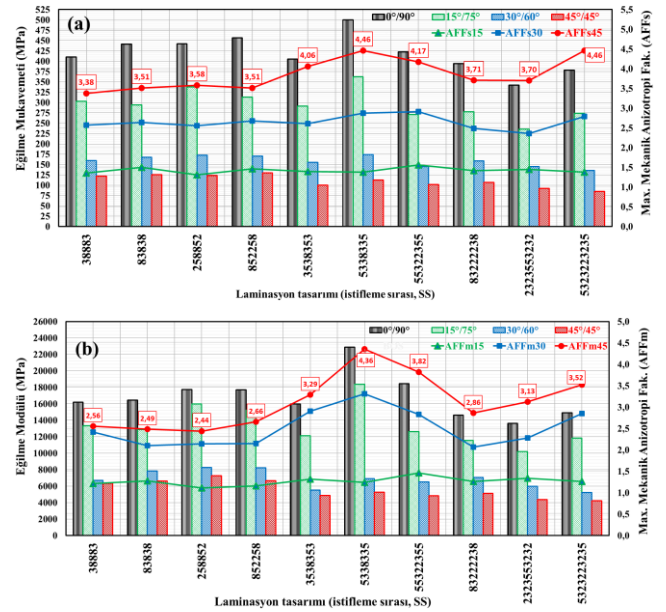
Laminat optimizasyonlarında sadece malzeme değişkenleri değil malzeme üretim parametreleri ile birlikte nihai ürünün yükleme tipi, çevre şartları ve zaman gibi değişkenlerin de dikkate alınması gerekir. Özellikle kritik tasarımların mukavemet hesaplarında laminat istifleme sırası için optimizasyon rutinleri geliştirmek oldukça zordur [31]. Bu tasarımlarda net bir avantajı belirten analiz ve test verileri bulunmadıkça, mukavemet açısından yüksek seviyede anizotrop yapıya sahip laminasyon tasarımlarından kaçınılmalıdır. Bazı çalışmalarda iki-yönlü ($0^\circ/90^\circ$) fiber oryantasyonuna sahip dokuma kumaş takviyeli kompozitlerde fiber oryantasyonu $\pm 45^\circ$ döndürülerek test edildiğinde, ilgili parçanın çekme dayanımının %67–71 oranında düştüğü tespit edilmiştir [32-33]. Özellikle kuvvet (mukavemet) kontrollü tasarımlarda, katman sayısı, dokuma tipi, elyaf cinsi ve oryantasyonları laminatın mekanik anizotropisini en aza veya optimum bir değere indirecek şekilde ve sırada yerleştirilmesiyle oluşturulan SS tasarımları şiddetle tavsiye edilir [31]. Yukarıda bahsedilen zorluklara rağmen ve bütün kriterlerin aynı anda sağlanması mümkün olmamakla birlikte optimum laminasyon tasarımına karar vermede aşağıdaki kriterleri göz önüne almak gerekir:

- Simetrik ve asimetrik istifleme dizileri arasında, fiber hacminden bağımsız olarak, simetrik olan tasarım daha yüksek çekme ve eğilme özelliklerine sahiptir [34]. Dolayısıyla orta eksene göre simetrik bir levha [35],
- Bütün fiber oryantasyonlarında hem minimum anizotropi (\downarrow) hem de maksimum mukavemet (\uparrow) ve modüle (\uparrow) sahip bir levha [11],
- Anizotropiyi düşürdüğü (\downarrow) için daha çok katmanlı (\uparrow) levha [11],
- Kalınlığın artması ($ST\uparrow$), mukavemet ($\sigma_{tu}\downarrow$ ve $\sigma_{fu}\downarrow$) ve modülleri ($E_t\downarrow$ ve $E_f\downarrow$) düşürdüğü için mümkünse daha ince levha ($ST\downarrow$) [36],

- Daha ince levhadan fazla ödün vermeden; mukavemet ve modülleri arttırdığı (\uparrow) için daha yüksek fiber hacmine ($VF\uparrow$) sahip levha,
- Daha az katman sayısı (\downarrow); daha stabil levha kalınlığı, daha az işçilik (\downarrow), zaman (\downarrow) ve maliyet (\downarrow) anlamına da gelebilir. Ayrıca, etki düzeyi zayıf olmasına rağmen bu çalışma kapsamında katman sayısındaki artış (AFTs hariç) anizotropileri arttırdığı (\uparrow) ve mukavemeti düşürdüğü için mümkünse daha az katmanlı (\downarrow) levha [37], tercih sebebi olmalıdır.



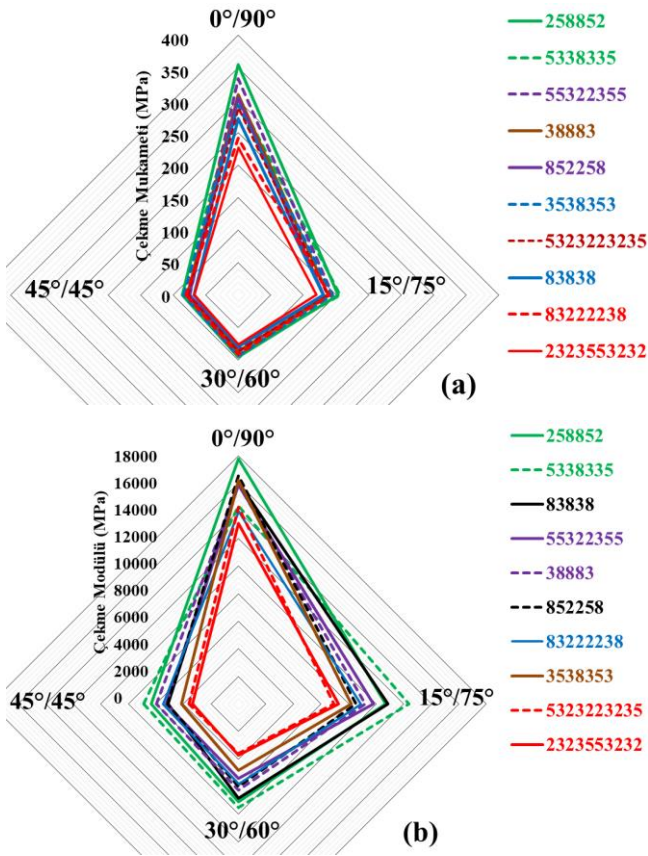
Şekil 7. a) SS- σ_{tu} -AFTs ve b) SS- E_t -AFTm grafikleri



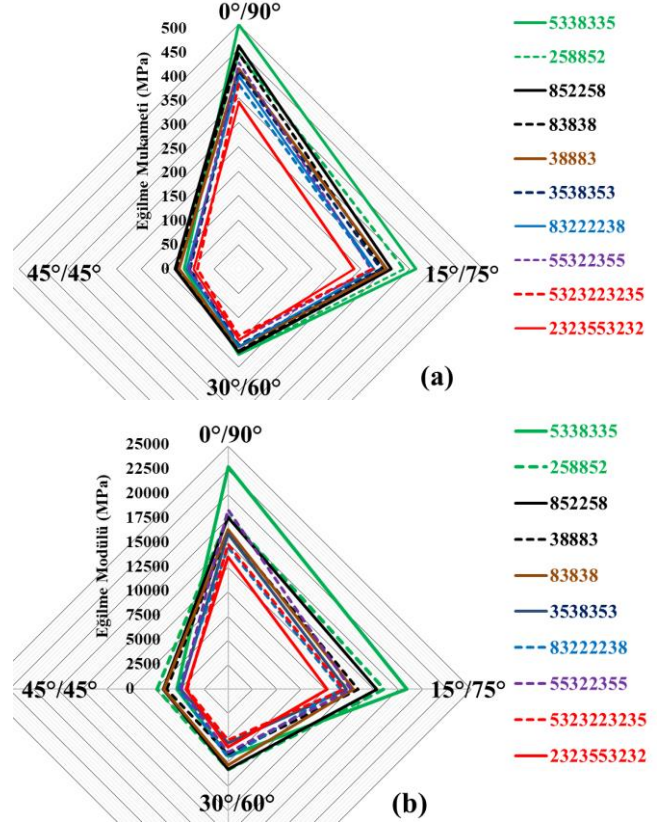
Şekil 8. a) SS- σ_{fu} -AFFs ve b) SS- E_f -AFFm grafikleri

Şekil 7 (a)'ya göre 83222238 kodlu levha minimum AFTs'ye, 258852 kodlu levha ise maksimum σ_{tu} 'ya sahiptir. Şekil 7 (b)'ye göre ise 5338335 kodlu levha minimum AFTm'ye, yine 258852 kodlu levha maksimum E_t 'ye sahiptir. Şekil 8 (a)'ya göre 38883 kodlu levha minimum AFFs'ye, 5338335 kodlu levha maksimum

σ_{fu} 'ya sahiptir. Şekil 8 (b)'ye göre ise yine 38883 kodlu levha minimum AFFm'ye, 5338335 kodlu levha maksimum E_f 'ye sahiptir. Bu kriterlere göre, laminasyon tasarımı seçiminde mekanik anizotropi faktörlerinin minimum veya mukavemet ile modül verilerinin maksimum olduğu laminasyon tasarımının tercih edilmesi gerektiği düşünülebilir. Ancak, "anizotropi düşüklüğü $0^\circ/90^\circ$ yönündeki maksimum mukavemet veya modülün de düşük seviyede olduğu", " $0^\circ/90^\circ$ yönündeki mukavemet veya modülün yüksekliği ise anizotropinin de yüksek olduğu" anlamlarına gelebilir. Dolayısıyla tek kritere bağlı karar vermek mümkün değildir. Bundan dolayı bu çalışmada farklı laminasyon tasarımları arasında, çekme ile eğilme mukavemeti ve modülleri açısından test edilerek amaca en uygun istifleme sırası aranmaktadır. Bu amaca yönelik optimum laminasyon tasarımlarına karar vermede Şekil 8 ve 9'daki radar grafiklerini kullanmak en mantıklı ve basit yöntem olabilir.



Şekil 8. a) σ_{tu} -FO-SS ve b) E_t -FO-SS için radar grafikleri



Şekil 9. a) σ_{fu} -FO-SS ve b) E_f -FO-SS için radar grafikleri

Radar grafiklerinden şu şekilde yararlanılır. Şekil 8 ve 9'da yamuk geometrisindeki grafiğin en dışı yer alan laminasyon en olumlu (optimum) tasarım iken en içteki ise en olumsuz tasarımdır. Buna göre; çekme mukavemeti ve çekme modülü açısından optimum laminasyon 258852 kodlu tasarımdır (Şekil 8 a ve b). Eğilme mukavemeti ve eğilme modülü açısından optimum laminasyon 5338335 kodlu tasarımdır (Şekil 9 a ve b). Test edilen bütün mekanik özelliklere göre, Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi en olumsuz tasarım ise 10 katlı 2323553232 kodlu tasarım olduğu görülmektedir. Çalışma sonunda, çekme mukavemeti ve modülü esas alındığında 5338335 kodlu tasarım, eğilme mukavemeti ve modülü esas alındığında ise 258852 kodlu tasarım optimum laminasyonlar olarak tercih edilmektedir. Kompozit parçaların kalitesi ve mukavemeti öncelikle içerdiği makro/mikro hava kabarcıklarının yüzdesiyle ilgilidir. Yüksek alansal ağırlığa sahip 500 ve 800 g/m² gibi dokuma tipleri 200 ve 300 g/m²'lik dokumalara göre daha yüksek reçine geçirgenliğine sahiptir [11]. Laminasyon tasarımında reçine geçirgenliği yüksek olan dokumaların düşük olanlara göre daha fazla kullanılması veya uygun yere yerleştirilmesiyle daha homojen reçine akışı ve elyafların daha iyi ıslanması sağlanır. Böylece kompozit levhadaki makro ve mikro hava kabarcıklarının oluşumu en aza inerek mukavemetin artmasına sebep olur [11,38]. Bu çalışmada ideal katman sayısının 6-7 adet olduğu, katman sayısı arttıkça (↑) laminatlardaki reçine geçirgenliğinin azaldığı (↓) söylenebilir. Katman sayısındaki artışla birlikte istifleme sırasında 200-300 g/m² gibi dokuma kumaşların üst ve alt katlara yerleştirilmesi reçine geçirgenliğini olumsuz etkilemiştir. Dolayısıyla reçine geçirgenliğindeki bu azalma levha mukavemetlerinin düşmesine neden olmuştur. Bununla birlikte en küçük gözenekli ve en düşük

reçine geçirgenliğine sahip olan 200 g/m²'lik dokuma kumaşların laminat merkezinde bulunması, çekme mukavemetini azaltırken (↓) ve eğilme mukavemetini (↑) arttırmıştır.

Teşekkür

Katkılarından dolayı makine mühendisi Yakup Daban'a teşekkürler.

Kaynaklar

- [1] S. Basavarajappa, K. V. Arun and J. P. Davim, "Effect of filler materials on dry sliding wear behavior of polymer matrix composites—a Taguchi approach," *J. Miner. Mater. Char. Eng.*, vol. 8, no. 05, pp. 79-391, May. 2009. Doi: 10.4236/jmmce.2009.85034.
- [2] Y. Rostamiyan, H. Youseftabar and R. Azadi, "Experimental study on the effect of nano zirconia on mechanical strength and microstructure of damaged epoxy-nanocomposites," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 2, Nov. 2018. Doi: 10.1088/2053-1591/aaef67.
- [3] R. Azadi and Y. Rostamiyan, "Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization," *Constr. Build. Mater.*, vol. 88, no. 0, pp. 212-224, May. 2015. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.018.
- [4] Y. Rostamiyan and M. Rezaei, "The effect of nano Zirconium dioxide and drilling on the buckling strength of epoxy based nanocomposites," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 212, no., pp. 523-532, 2018. Doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.03.018.
- [5] G. Gao and Y. Li, "Mechanical properties of woven glass fiber-reinforced polymer composites," *Emerging Mater. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 201-208, Dec. 2016. Doi: doi.org/10.1680/jemmr.16.00018.
- [6] D. K. Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes and E. Linul, "Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications," *Polymers*, vol. 11, no. 10, pp. 1667-1704, Oct. 2019. Doi: doi.org/10.3390/polym11101667.
- [7] A. Diniță, R. G. Ripeanu, C. N. Ilincă, D. Cursaru, D. Matei, R. I. Naim, M. Tănase and A. I. Portoacă, "Advancements in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Analysis," *Polymers*, vol. 16, no. 1, pp. 2-50, Dec. 2023. Doi: doi.org/10.3390/polym16010002.
- [8] M. A. Karim, M. Z. Abdullah, A. F. Deifalla, M. Azab and A. Waqar, "An assessment of the processing parameters and application of fibre-reinforced polymers (FRPs) in the petroleum and natural gas industries: A review," *Results Eng.*, vol. 18, no. 101091, pp. 1-20, June 2023. Doi: doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101091.
- [9] W. Zhang and K. E. Evans, "Numerical prediction of the mechanical properties of anisotropic composite materials," *Comput. Struct.*, vol. 29, no. 3, pp. 413-422, Feb. 1988. Doi: doi.org/10.1016/0045-7949(88)90394-X.
- [10] J. K. Oleiwi, E. S. Al-Hassani and A. A. Mohammed, "Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Tensile Properties of Unsaturated Polyester Reinforced by Woven Glass Fibers," *Eng. Tech. J.*, vol. 32, no. 3 Part (A) Engineering, pp. 653-666, March 2014. Doi: doi.org/10.30684/etj.32.3A.8.
- [11] R. Sakin, "Layup design optimization for e-glass woven roving fabric reinforced polyester composite laminates produced by VARTM," *Fibers Polym.*, vol. 22, no. 2, pp. 509-527, Jan. 2021. Doi: doi.org/10.1007/s12221-021-0087-x.
- [12] R. Sakin, "Effects of glass-mat on mechanical anisotropy in bidirectional e-glass woven roving reinforced composite sheets produced by RTM method," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 23, no. 8, pp. 967-973, 2017. Doi: 10.5505/pajes.2017.55631.
- [13] A. R. M. Rao and N. Arvind, "Optimal stacking sequence design of laminate composite structures using tabu embedded simulated annealing," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 25, no. 2, pp. 239-268, Jan. 2007. Doi: doi.org/10.12989/sem.2007.25.2.239.
- [14] Y. Mohammed, M. K. Hassan, A. El-Ainin H and A. Hashem, "Effect of stacking sequence and geometric scaling on the brittleness number of glass fiber composite laminate with stress raiser," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 21, no. 2, pp. 281-288, Aug. 2014. Doi: doi.org/10.1515/secm-2013-0038.
- [15] H. Norouzi and Y. Rostamiyan, "Experimental and numerical study of flatwise compression behavior of carbon fiber composite sandwich panels with new lattice cores," *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, no., pp. 22-30, Dec. 2015. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.046.
- [16] Z. Jing, X. Fan and Q. Sun, "Stacking sequence optimization of composite laminates for maximum buckling load using permutation search algorithm," *Compos. Struct.*, vol. 121, no., pp. 225-236, March 2015. Doi: 10.1016/j.compstruct.2014.10.031.
- [17] P. Mandal, D. K. Jesthi, D. Das, A. K. Rout and R. K. Nayak, "Three-body abrasion wear performance of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composites," *Mater. Today-Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 20777-20784, 2018. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.09.046.
- [18] A. Nayak, D. K. Jesthi, B. C. Routara, D. Das and R. K. Nayak, "Tribological properties of glass/carbon hybrid composites through inter-ply arrangement using Response Surface Methodology," *Mater. Today-Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19828-19835, 2018.
- [19] S. Swarup Mohanty, A. Kumar Rout, D. Kumar Jesthi, B. Chandra Routara and R. Kumar Nayak, "Evaluation of mechanical and wear performance of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composite," *Mater. Today-Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19854-19861, 2018. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.350.
- [20] D. K. Jesthi, P. Mandal, A. K. Rout and R. K. Nayak, "Enhancement of mechanical and specific

- wear properties of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composite," *Procedia Manuf.*, vol. 20, no., pp. 536-541, 2018. Doi: doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.080.
- [21] D. K. Jesthi, A. Nayak, B. C. Routara and R. K. Nayak, "Evaluation of Mechanical and Tribological Properties of Glass/Carbon Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composite," *Int. J. Eng.*, vol. 31, no. 7, July 2018. Doi: 10.5829/ije.2018.31.07a.12.
- [22] Siddhartha and K. Gupta, "Mechanical and abrasive wear characterization of bidirectional and chopped E-glass fiber reinforced composite materials," *Mater. Design.*, vol. 35, no., pp. 467-479, March 2012. Doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.010.
- [23] S. Mullaikodi, K. Shanmugasundaram, V. S. Rao and S. Rengarajan, "Synthesis, characterization and machinability studies on thin hybrid composites with SiC nano particles," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 6, pp. 065321, March 2019. Doi: doi.org/10.1088/2053-1591/ab0ddc.
- [24] A. Todoroki and M. Sasai, "Stacking sequence optimizations using GA with zoomed response surface on lamination parameters," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 299-318, July 2002. Doi: 10.1163/156855102762506335.
- [25] A. Todoroki, K. Suenaga and Y. Shimamura, "Stacking sequence optimizations using modified global response surface in lamination parameters," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 12, no. 1, pp. 35-55, Apr. 2003. Doi: 10.1163/156855103322320365.
- [26] EN-ISO-527-4, *Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*, CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland, 2021.
- [27] ASTM-D7264/D7264M, *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, Pennsylvania 19428-2959, USA, 2007.
- [28] B. N. Cox and G. Flanagan, *Handbook of analytical methods for textile composites*, NASA Contractor Report 4750, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19970017583/downloads/19970017583.pdf>. 1997.
- [29] Z. Xu and A. Yokoyama, "Influence of the Woven Structure on the Initial Fracture Behavior of Roving Glass Fabric Reinforced Composites," *Open J. Compos. Mater.*, vol. 08, no. 02, pp. 54-67, 2018. Doi: 10.4236/ojcm.2018.82005.
- [30] J. R. Landis and G. G. Koch, "The measurement of observer agreement for categorical data," *Biometrics*, no., pp. 159-174, 1977.
- [31] USA-Department-of-Defense, *Composite Materials Handbook*. Materials, Usage, Design, and Analysis. Vol. 3 of 5. CRC Press, New York, 1997. <http://assist.daps.dla.mil>.
- [32] T. Sessaiah and V. K. Reddy, "Effect of fiber orientation on the mechanical behavior of e-glass fibre reinforced epoxy composite materials," *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 8, no. 8, pp. 379-396, 2018. Doi: doi.org/10.5505/pajes.2017.55631.
- [33] N. Kumar and A. Singh, "Study the effect of fiber orientation on mechanical properties of bidirectional basalt fiber reinforced epoxy composites," *Mater. Today-Proc.*, vol. 39, no., pp. 1581-1587, 2021. Doi: doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.707.
- [34] M. T. A. Ansari, K. Singh and M. S. Azam. Effect of stacking sequence and fiber volume fraction on the static mechanical properties of woven GFRP Composite. in *Trends in Materials Engineering: Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*. 2019. Springer Nature Singapore Pte Ltd. pp. 51-58.
- [35] G. Ntourmas, F. Glock, S. Deinert, F. Daoud, G. Schuhmacher, D. Chronopoulos, E. Özcan and J. Ninić, "Stacking sequence optimisation of an aircraft wing skin," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 66, no. 2, pp. 31, Jan. 2023. Doi: doi.org/10.1007/s00158-022-03483-8.
- [36] Y. Hu, G. Han, F. Cheng and X. Hu, "Thickness effect on flexural strengths of laminar carbon fibre composites," *Thin-Walled Struct.*, vol. 186, no., pp. 110690, May 2023. Doi: doi.org/10.1016/j.tws.2023.110690.
- [37] W. Sun, Y. Luo and H. Sun, "Experimental studies on the elastic properties of carbon fiber reinforced polymer composites prefabricated of unidirectional carbon fiber fabrics and a modified rule of mixtures in the parallel direction," *Adv. Compos. Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 34-43, Jan. 2018. Doi: doi.org/10.1177/09636935180270.
- [38] Q. Zuo, C. Wang, L. Lin, Y. Li, B. Wang, B. Miao and G. Pan, "Layup optimization of ramie fabric reinforced composite: woven fabric and lamination parameters," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 198, no., pp. 116712, Aug. 2023. Doi: doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116712.



Investigation of Diffusion Welding With SX Steel Itself Using Different Interlayer Materials

Jiyan Güney¹, Selçuk Keskin², Haluk Kejanlı^{3*}

1 Dicle University, Mechanical Department, jiyanguney21@outlook.com, Orcid No: 0000-0003-0168-6983

2 Dicle Üniversitesi, Mechanical Department, mselecek.keskin@dicle.edu.tr Orcid No: 0000-0001-6233-1807

3 Dicle University, Mechanical Department, kejanlih@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-4987-6316

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 May 2024
Received in revised form 4 July 2024
Accepted 5 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

SX steel, interlayer, diffusion welding, microhardness

ABSTRACT

SX steels, a type of stainless steel enriched with high silicon content, are frequently used in critical applications of the industry due to their resistance to many acids. Areas of use are acid tanks, acid coolers, acid pipe systems and acid radiators. Increasing areas of use have increased the need to combine with different materials. This study aimed to join the different layers by diffusion welding method using Cu, Ni, Al7072 and Al8079. The samples were combined by keeping them under 5 MPa pressure for 60 minutes at 1000°C in an argon gas environment. Phase changes occurring in the junction area due to the effect of different interlayers were tried to be determined by SEM-EDS and XRD analyses. The changing metallographic structure of the intermediate layers was examined using an optical microscope, and the microhardness change of the joining region was determined with the HV hardness measuring device. While alpha-ferrite structure was observed in the Cu interlayered connections in the samples, multiphase structures were observed in the Al7072 and SX-Al8079 interconnected samples, and the presence of intermetallic phases was detected in both the interface and diffusion zones in the Ni interlayered samples.

Doi: 10.24012/dumf.1490715

* Corresponding author

Introduction

Diffusion welding is a method of joining two solid surfaces. Metals with sanded and cleaned surfaces are combined by creating bonds at the atomic level using parameters such as temperature, pressure and time [1]. Babayev and his team determined that the optimal bonding temperature was 1200°C by producing Fe/Cu/C and Fe/Zn/C pieces through the diffusion method. They observed that the resulting structures consisted of pearlite and ferrite components. Significant precipitation of Cu at the grain boundaries of the Fe/C alloy was clearly seen through energy-dispersive spectroscopy analysis conducted on the component welded at 1050°C. The accumulation of Cu at the ferrite and grain boundaries reduced hardness. Hardness values were higher in the inner cylindrical section due to the presence of copper composition. Generally, a decrease in hardness was observed in regions close to the welding zone in the inner cylindrical section. The cause of this hardness decrease was the diffusion of copper towards the outer part [2]. Surface roughness plays a crucial role in influencing the diffusion behavior of atoms during the process of diffusion bonding. In the context of diffusion bonding between 304 stainless steel

and pure nickel, it is observed that steel atoms exhibit a higher level of activity, consequently leading to an enhanced diffusion phenomenon. Hence, it is imperative to adjust the surface roughness towards nickel to attain a more robust bond between steel and nickel materials. Additionally, with an increase in temperature, there is a corresponding increase in the number of atoms diffusing towards the opposite side, further influencing the bonding process [3]. SEM analyses conducted on microstructure samples' interfaces revealed a seamless bonding between the Ni interlayer and duplex stainless steel. This occurred simultaneously with the diffusion of Ni, causing a transformation in the original material's ferrite + austenitic grain structure into an austenitic structure within the diffusion zone. Subsequent microhardness analyses performed on the cross-section of microstructure samples exhibited lower hardness in the interlayer as anticipated, in comparison to both the base material and the diffusion zone [4]. Dissimilar welds lacking an interlayer displayed diminished strength, lower notch tensile strength, and reduced impact toughness when compared to their respective parent

materials. Post-weld heat treatment further exacerbated the reduction in toughness compared to the as-welded condition. Conversely, such trends were not evident in welds incorporating a nickel interlayer, suggesting that nickel served as an effective diffusion barrier even during post-weld heat treatment [5]. The present study illustrates that the inclusion of a Ni interlayer improves the viability of welding WC-12Co cermet to SC45 steel using friction stir lap welding. In shear lap tensile tests, the initiation of fracture occurs at the interface between steel and cermet and propagates within the cermet for joints without Ni. In contrast, for joints with Ni, fracture takes place within the base materials. The Ni layer plays a role in forming a solid solution that imparts the joint with a graded coefficient of thermal expansion [6]. The interdiffusion between Al and Fe atoms is exceptionally rapid, with the interdiffusion coefficient being 4 orders of magnitude higher compared to the scenario under thermal equilibrium [7]. A direct diffusion bonded joint of aluminium alloy 5A02 and stainless steel SUS304 has been formed without incorporating any interlayer material. The welding time significantly influences the tensile shear strength of the joint. When the welding time is set at 60 minutes, the strength of the joint reaches a maximum of 101.3 MPa. XRD analysis indicates the presence of intermetallic phases such as Al_5Fe_2 and $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ formed during the reaction. Microstructure investigation reveals that the thickness of the reaction layer monotonously increases with the welding time [8]. The Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) analysis of the joints reveals that the developed layers in zones A, B, and C, progressing from the Mg side towards the Al side, consist of $\gamma(\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17})$, a combination of γ and $\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$, and a blend of γ and β with a relatively higher mass fraction of β , respectively [9]. The utilization of nano-layered interlayers within the Ti/Al system, specifically in the form of a foil with a composition closely approximating equiatomic ratio, has been confirmed to yield flawlessly bonded joints in vacuum diffusion welding. This is particularly evident at reduced welding pressures, showcasing the efficacy of such interlayers in facilitating the creation of defect-free joints in alloys based on γ -TiAl intermetallic compounds [10]. It is clearly seen that hardness values are relatively decreased at locations where the Al sublayer is present. Hardness in areas where the Al sublayer diffuses closely aligns with the hardness values of the base materials [11]. The initiation of Ni/Al/Ni joint formation commences with the interaction between liquid aluminium (Al) and solid nickel (Ni), giving rise to the formation of the Al_3Ni intermetallic phase. Subsequently, solid-state interdiffusion progresses, leading to the sequential development of various phases: Al_3Ni_2 , stoichiometric AlNi , Ni-rich AlNi , and AlNi_3 . During intermediate stages of annealing, it is possible for two to four phases to coexist simultaneously [12]. The composition of the interfacial layer determined by EDX analysis was found to be 53.6% Al, 42.9% Fe, and 3.5% Mg. When the travel

speed in the Al 5754/DP600 lap weld was increased to 45mm/min, another interfacial layer was observed, albeit with fewer observed cracks [13]. At the interface between the steel and Al 99.8 filler, two intermetallic phases, Fe_2Al_5 and FeAl_3 , have been formed. The thickness of the intermetallic phase seam measures approximately 2.3 μm , notably thinner than analogous intermetallic phase seams achieved through other joining processes within the same system. The Fe_2Al_5 phase is characterized by trapezoidal, nearly equiaxial single grains surrounded by aluminium-rich remnants of the steel grains. The growth direction of the Fe_2Al_5 crystals does not align with their longest crystal axis [14]. Cracking of an alloy during solidification is a significant defect in both welds and castings. In welding, it is commonly referred to as solidification cracking [15]. Solidification cracking is prominently observed in the central region of the interlayer due to increased thermal stresses and the presence of rich phases in the central area of the specimens. The density of intermetallic phases increases with rising temperature [16]. Closed-form equations are used to measure the susceptibility to cracking during the solidification process following welding. These equations provide results consistent with crack susceptibility tests of binary Al alloys and are considered a reliable reference in studies in this field [17]. Increasing temperature heals internal cracks. During the recovery process, the previous crack area fills with fine grains. Then, with the rise in temperature, the fine-grained area gradually disappears [18]. The bonding temperature significantly affects the welding performance of joints. At a low bonding temperature, specifically 925°C, inadequate bonds are formed due to the sluggish diffusion of constitutional elements provided by CoCrNi MEA, hindering the diffusion process. Successful diffusion-welded joints can be achieved by employing a bonding temperature of 1075°C with a 1-hour holding time and applying a compressive pressure of 5 MPa [19]. The DSC results reveal that the Al_2O_3 -25 wt% YSZ composite exhibits a higher heat flow compared to both aluminium alloy and other ceramic compounds as the temperature increases to 300°C. Consequently, it is envisaged that, during friction welding, the Al_2O_3 -25 wt% YSZ composite would have the capability to efficiently transmit heat at an accelerated rate, even under low welding speeds. This characteristic is expected to enhance the overall weldability of the material to aluminium alloy [20]. Increased temperatures led to an acceleration of the diffusion mechanism, resulting in a reduced diffusion period necessary to achieve comparable coalescence. However, relatively inadequate coalescence was observed when the process temperatures ranged between 550-575°C [21]. The deformation of surface asperities through plastic flow and creep, the diffusion of atoms to voids across grain boundaries, grain boundary migration, and the volume diffusion of atoms to voids can be delineated as a sequential series of metallurgical stages in the process of diffusion bonding. Particularly, when

working with Ni-Ti alloys, diffusion bonding can be successfully accomplished even when adherent surface oxides are present [22].

The reviewed literature suggests that understanding the effect of the mechanical properties of welded joints on welding performance in welding processes applied will have a significant impact on determining the quality of the process.

In this study, the joining of SX steel by diffusion welding using four different intermediate layers was investigated. In the study, data on microstructure, microhardness, EDS analysis, SEM images and heat maps are presented. This particular material represents the first documented example in the literature of diffusion welding applied using different interlayers.

It is thought that the determined results will be important in future research, studies and also in solving industrial problems on this subject.

2. Material and Method

2.1 Materials

In this study, commercially available SX steel was joined by diffusion welding using different intermediate layers. 7072 and 8079 series pure aluminium, pure nickel and pure copper were selected as a result of literature research as the most suitable interlayer materials for this purpose. The chemical compositions of these materials are detailed in Table 1. The diffusion bonding process is elucidated in Figure 1.

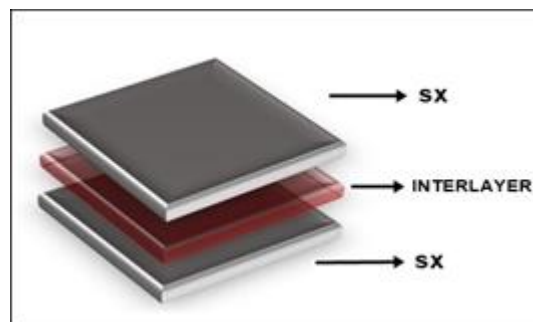


Figure 1. Diffusion welding process

Table 1. Chemical components of metals used in diffusion welding

Element	Fe	Al	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SX	55	-	≤0.025	5.0	0.5	≤0.045	≤0.030	17.5	19.5	0.4	2.0
Cu	99.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	98.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al7072	0.2	98.9	-	0.7	0.1	-	-	-	-	-	0.1
Al8079	0.7-1.3	98.65	-	0.05-0.3	-	-	-	-	-	-	0.05

2.2 Sample Preparation

Materials prepared in dimensions of 10x10x6 mm underwent a precise cutting process in a special liquid. This process was achieved using a cutting machine, ensuring uniformity in dimensions. Prior to the welding process, great care was taken in cleaning the surfaces of the metal elements. This was accomplished through a series of sanding stages using water-based sandpapers with grain sizes of 180, 240, 360, 400, 600, and 800. Surfaces were meticulously cleaned, preparing the metals for the next welding process. To facilitate the welding process, a specially designed clamp was used to compress the cleaned metal surfaces. This step is crucial to align and stabilize the metals during welding. Once securely clamped, the metals were placed in a

specialized diffusion furnace, where they were meticulously prepared for the welding process.

2.3 Diffusion Welding

Following the secure clamping of the samples, a critical stage commenced when they were precisely positioned inside a high-temperature furnace. As the welding process initiated, a pressure of 5 MPa was carefully applied, and argon gas with 99.9% purity penetrated the furnace at a controlled flow rate of 3 liters per minute. The welding process was conducted at a temperature of 1000°C for duration of 60 minutes. For proper reference, the exact parameters used in the diffusion welding process are provided in Table 2.

Table 2. Diffusion welding parameters

Parameter	Materials - Interlayer			
	SX-Cu	SX-Ni	SX-Al7072	SX-Al8079
Pressure (MPa)	5	5	5	5
Heat (°C)	1000	1000	1000	1000
Time (min)	60	60	60	60

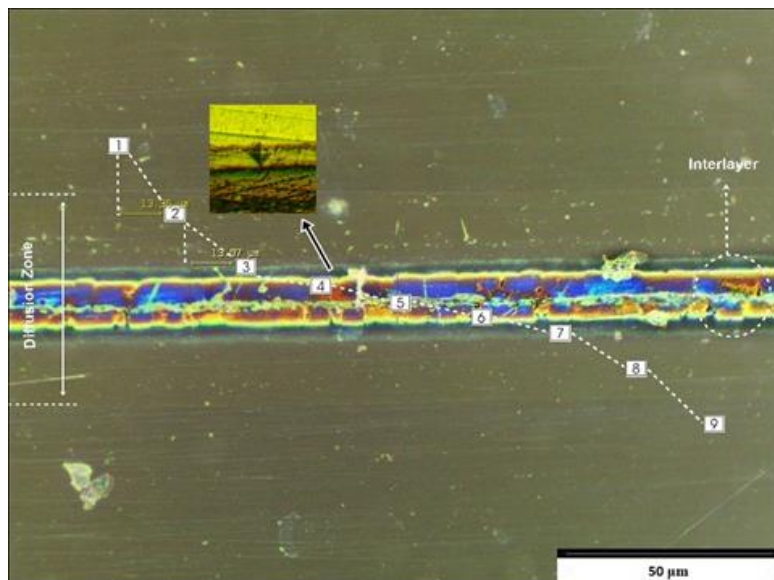
2.4 Microstructure Studies

The samples, which underwent diffusion welding, were cut perpendicular to the interlayer. Subsequently, the surfaces were sequentially corrected with 400, 600, 800, 1000, 1200, and 2000 grit sandpapers. The roughness has a significant impact on the diffusion behaviour of atoms during the diffusion bonding of two different materials [3]. Following the sanding process, the surfaces were polished with 6 μ m diamond paste. To ensure cleanliness, the samples were then cleaned using alcohol in an ultrasonic vibration machine. Considering the high acid corrosion resistance of the SX steel used in the samples, two different etching agents were employed to enhance the visibility of the interlayer and diffusion zone microstructures. As the samples with copper and nickel interlayers were prepared for examination under an optical microscope, they were acidified using a solution containing 6 ml HF, 9 ml HNO₃, and 85 ml H₂O (referred to as King's Water). Conversely, samples with Al7072 and Al8079 interlayers were acidified using a solution containing 2.5 ml HNO₃ and 1.5 ml HCl. Samples requiring Keller

Solutions were treated with a mixture of 1 ml HF and 95 ml H₂O. Subsequently, the samples were thoroughly rinsed with water, cleaned with alcohol, and dried using hot dry air to prepare them for subsequent measurements.

2.5 Microhardness Studies

The evaluation of microhardness values of the samples was conducted using an AOB brand Vickers hardness measurement device. To obtain accurate measurements, a 50 g load was applied for 10 seconds. The calculation of averages involved obtaining three microhardness values at nine separate points, with approximately 13 μ m intervals. Figure 2 illustrates the visual presentation of the sample on which microhardness measurements were performed.

**Figure 2.** Location of microhardness points

3. FINDINGS AND DISCUSSION

3.1 Microstructure Results

SX steel has been welded with itself using diffusion welding, employing Cu, Ni, Al7072, and Al8079

interlayers. Diffusion welding processes were successfully carried out under a constant pressure of 5 MPa, at a fixed temperature of 1000°C, and for duration

of 60 minutes. In Figure 3, the formation of the α -ferrite structure is observed in the steel and copper junction [2]. In diffusion welding applications where nickel is used as a braze alloy, the material joined after welding does not lose its nickel's effective diffusion barrier properties even after undergoing heat treatment [5]. While diffusing SX steel with an Al pair, a significantly varied number of phase regions emerged in this bonding

process. The diffusion welding yielded excellent results in terms of microstructure. This is because the mutual diffusion between Al and Fe atoms is exceptionally rapid [7]. Mostly Al alloys and stainless steels are joined directly by diffusion welding [8]. Microscope images of the diffusion zones of the materials can be seen clearly in Figure 3, 4, 5 and 6.

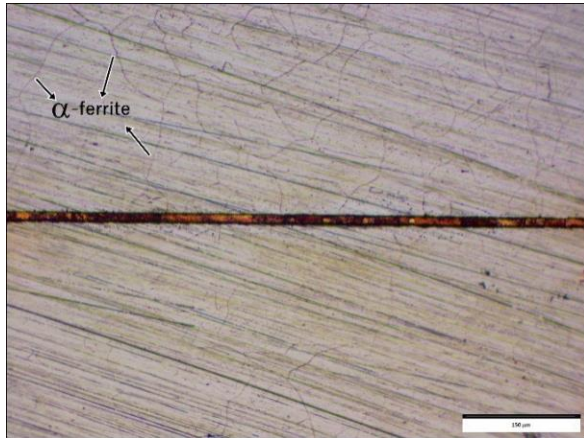


Figure 3. SX-Cu microstructure image

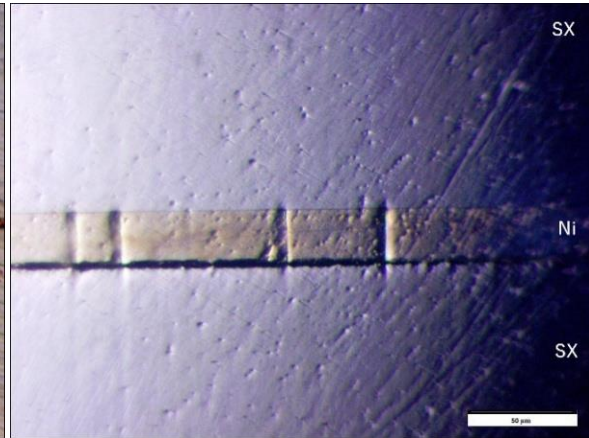


Figure 4. SX-Ni microstructure image

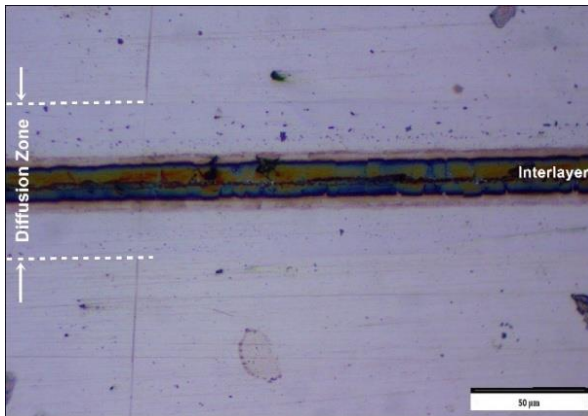


Figure 5. SX-Al7072 microstructure image

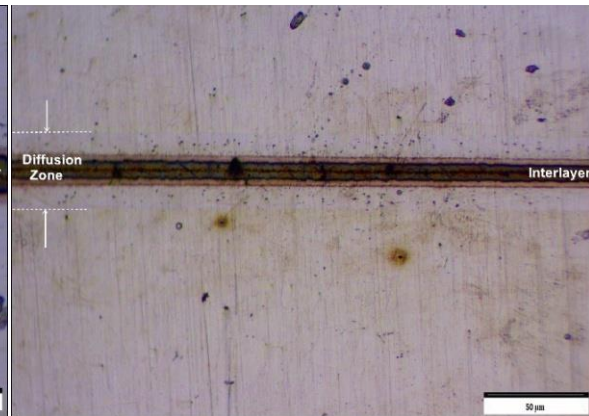


Figure 6. SX-Al8079 microstructure image

EDS Analysis results for all 4 diffusion sources are

shown with their detailed data in Figure 7 and 8.

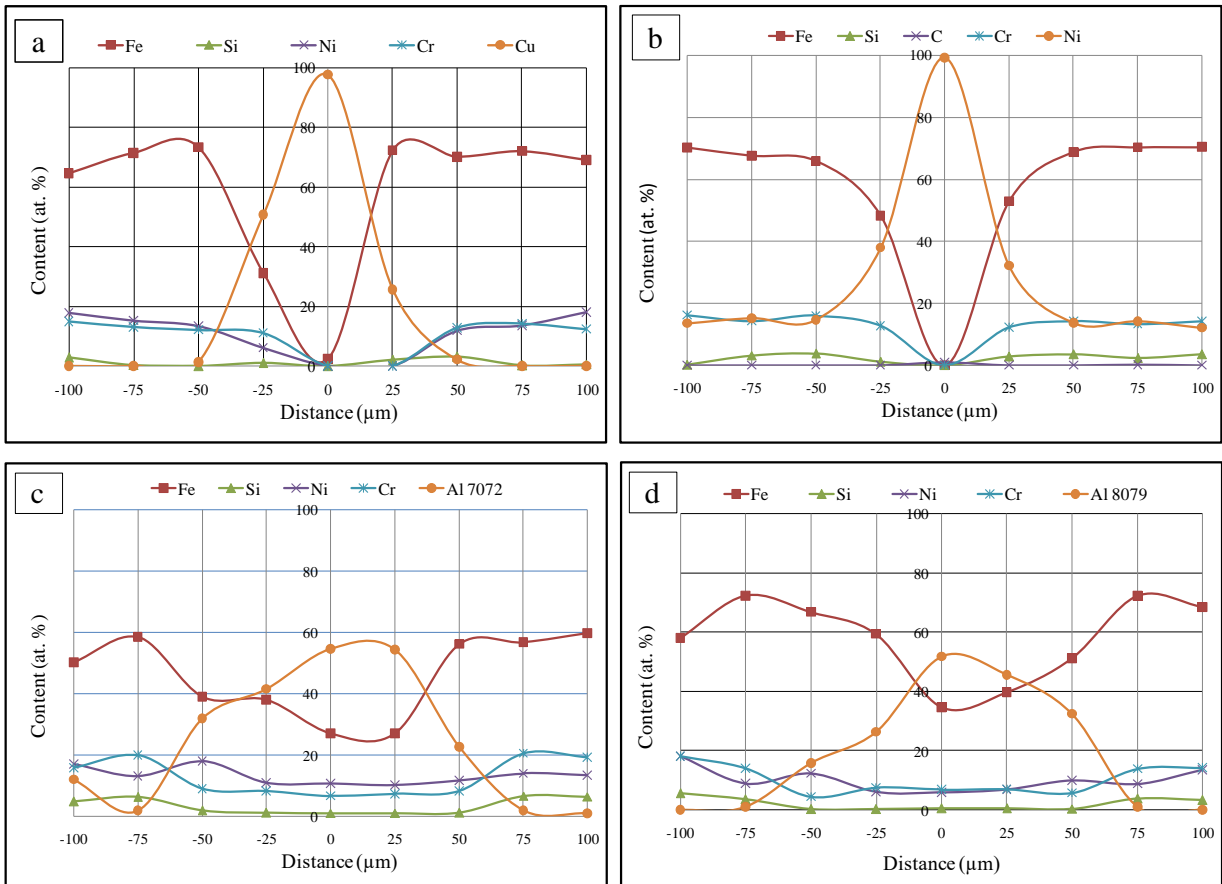


Figure 7. EDS analysis charts a) SX-Cu, b) SX-Ni, c) SX-Al7072, d) SX-Al8079

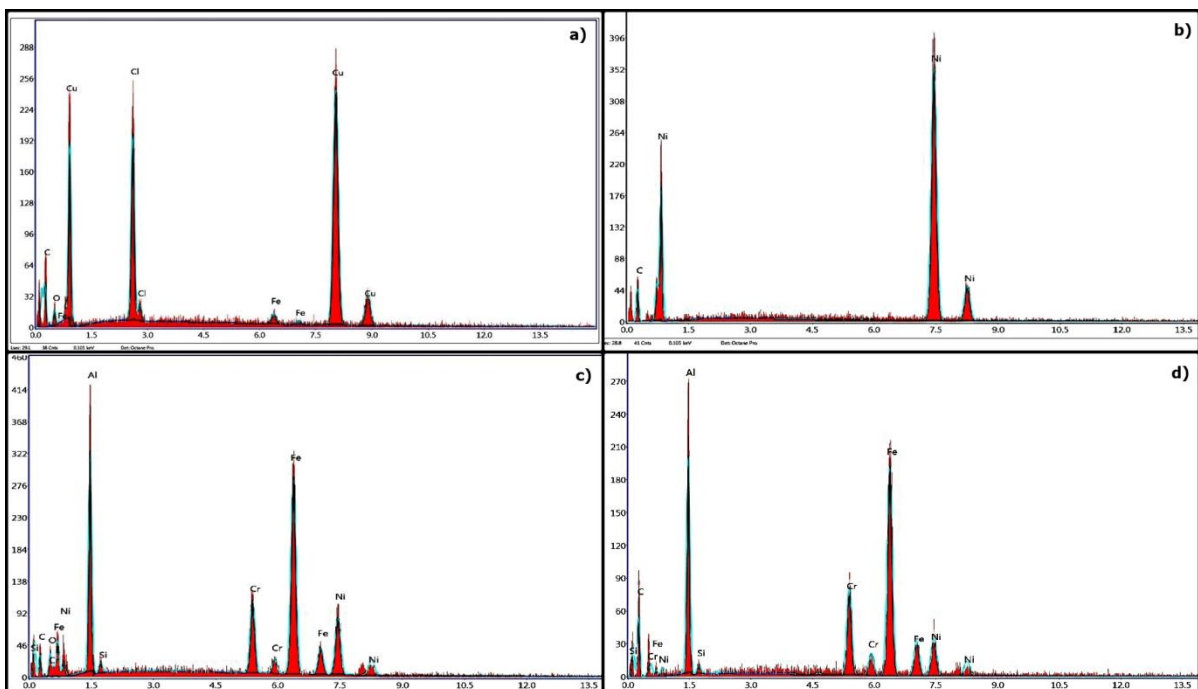


Figure 8. Detailed EDS analysis charts a) SX-Cu, b) SX-Ni, c) SX-Al7072, d) SX-Al8079

Looking at the 2nd and 4th analysis points of copper in Table 3, copper is located at the grain boundaries in the

diffusion region of the steel. EDS analysis values at these points prove this [2]. In diffusion welding

applications where one of the joining materials is steel, the use of nickel as an interlayer enhances the feasibility of diffusion welding. As seen in Table 4, the nickel interlayer has exhibited diffusion and phase formation within the steel, spreading over long

distances [6]. It is generally inevitable to see intermetallic phases in diffusion welding applications consisting of aluminium and steel [8]. EDS analysis values of the materials and the phase atoms formed are shown in Table 3, 4, 5 and 6.

Table 3. SX-Cu EDS analysis table

Analysis Points	C	Fe	Cr	Cu	Ni	Si	Detected Phases
	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	
1	-	73.33	13.19	-	13.48	-	Fe ₆ CrNi
2	-	31.49	10.48	50.7	6.33	0.96	Fe ₁₆ Cr ₆ SiNi ₃ Cu ₂₃
3	-	2.28	-	97.72	-	-	Cu ₁₁₃ Fe ₃
4	-	72.32	-	25.63	-	2.05	Cu ₁₀₅ Fe ₃₃₇ Si ₁₉
5	-	71.21	12.82	-	12.84	3.13	Fe ₁₁ Cr ₂ SiNi ₂

Table 4. SX-Ni EDS analysis table

Analysis Points	C	Fe	Cr	Ni	Si	Detected Phases
	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	
1	-	65.79	15.96	14.58	3.67	Fe ₉ Ni ₂ Cr ₂ Si
2	-	48.2	12.73	37.95	1.12	Fe ₂₂ Ni ₁₆ SiCr ₆
3	0.82	-	-	99.18	-	High nickel point
4	-	52.9	12.14	32.12	2.83	Fe ₉ Ni ₅ SiCr ₂
5	-	68.74	14.22	13.56	3.48	Ni ₂ Fe ₁₀ Cr ₂ Si

Table 5. SX-Al7072 EDS analysis table

Analysis Points	Al7072	C	Fe	Cr	Cu	Ni	Si	Detected Phases
	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	
1	12.10	-	50.24	15.85	-	16.99	4.82	Fe ₅ Cr ₂ SiNi ₂ Al ₃
2	1.99	-	58.45	19.98	-	13.22	6.36	Fe ₁₄ Cr ₃ Si ₃ Ni ₃ Al
3	32.00	-	38.95	9.03	-	18.05	1.97	Fe ₁₀ Cr ₂ SiNi ₄ Al ₁₇
4	41.57	-	37.97	8.26	-	10.93	1.28	Fe ₁₅ Cr ₃ SiNi ₄ Al ₃₄
5	54.55	-	26.98	6.71	-	10.67	1.08	Fe ₁₃ Cr ₃ SiNi ₅ Al ₅₃
6	54.33	-	27	7.35	-	10.23	1.08	Fe ₁₃ Cr ₄ SiNi ₅ Al ₅₂
7	22.63	-	56.18	8.24	-	11.67	1.27	Fe ₂₂ Cr ₄ SiNi ₄ Al ₁₉
8	1.87	-	56.8	20.56	-	14.05	6.72	Fe ₁₅ Cr ₆ Si ₃ Ni ₃ Al
9	0.96	-	59.78	19.31	-	13.45	6.49	Fe ₃₀ Cr ₁₀ Si ₆ Ni ₆ Al

Table 6. SX-Al8079 EDS analysis table

Analysis Points	Al8079	C	Fe	Cr	Cu	Ni	Si	Detected Phases
	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	(at.%)	
1	-	-	58.11	18.2	-	18.07	5.62	Fe ₅ Cr ₂ SiNi ₂
2	1.02	-	72.31	14.07	-	8.94	3.66	Fe ₃₄ Cr ₇ Si ₃ Ni ₄ Al
3	15.84	-	66.88	4.52	-	12.42	0.34	Fe ₉₉ Cr ₇ SiNi ₁₇ Al ₄₈
4	26.42	-	59.5	7.61	-	6.10	0.37	Fe ₈₁ Cr ₁₁ SiNi ₁₈ Al ₇₄
5	51.8	-	34.74	6.93	-	5.95	0.59	Fe ₃₀ Cr ₆ SiNi ₅ Al ₉₁
6	45.65	-	39.77	7.09	-	6.89	0.60	Fe ₃₃ Cr ₆ SiNi ₅ Al ₇₉
7	32.5	-	51.22	5.78	-	10.04	0.45	Fe ₅₇ Cr ₇ SiNi ₁₁ Al ₇₅
8	1.01	-	72.33	13.97	-	8.85	3.83	Fe ₃₅ Cr ₇ Si ₄ Ni ₄ Al
9	-	-	68.58	14.32	-	13.64	3.46	Fe ₁₀ Cr ₂ SiNi ₂

It was observed that different phase regions formed

between iron atoms and aluminium atoms [14].

Solidification cracking is a phenomenon seen in welding and casting applications [15]. Solidification cracking may arise as a result of elevated thermal stresses and the presence of enriched phases at the center of the interlayer. Consequently, the densities of intermetallic phases gradually decrease from the surface towards the center of the interlayer [16]. Closed-form equations, known as crack susceptibility

index, have been derived to calculate the tendency for solidification cracking during diffusion bonding using $|dT/d(f_S)^{1/2}|$. The use of these equations is straightforward and provides insights into cracking during solidification after diffusion bonding [17]. SEM images detect internal cracks if they have formed [18]. The images of my materials under the SEM microscope are shown in Figure 9.

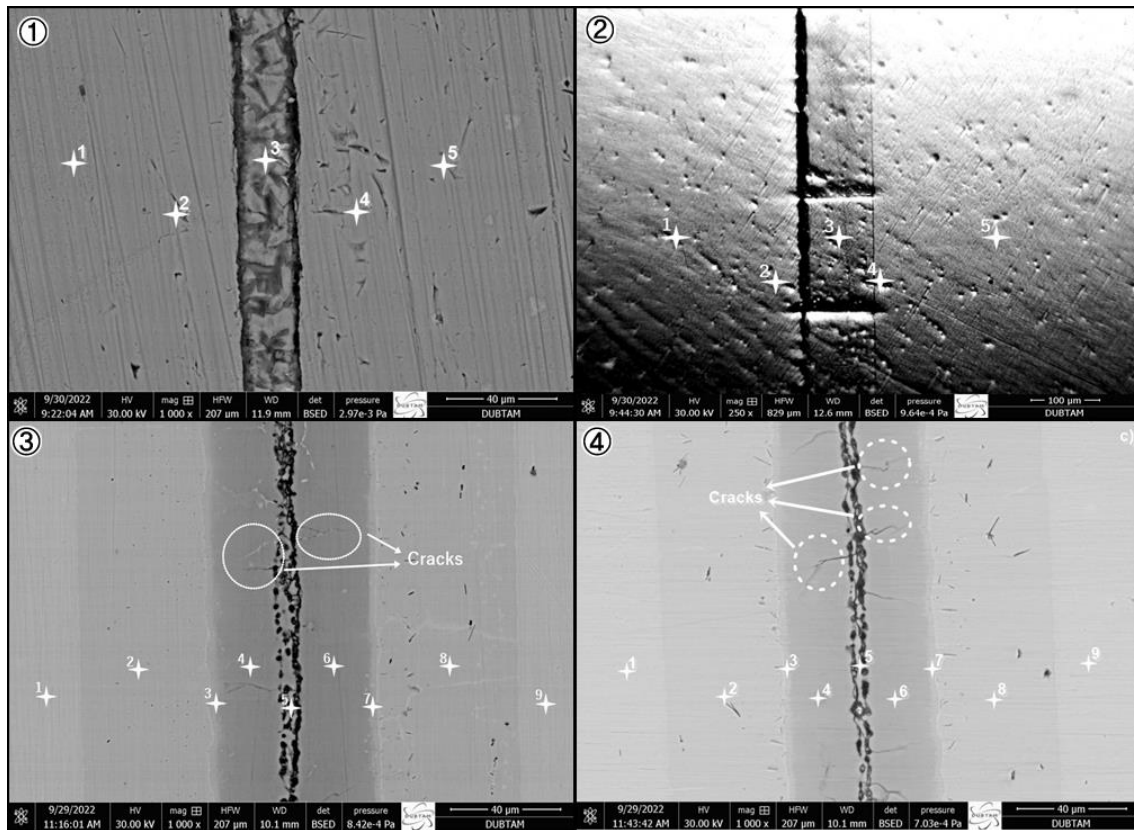


Figure 9. SEM images of materials 1) SX-Cu, 2) SX-Ni, 3) SX-Al7072, 4) SX-Al8079

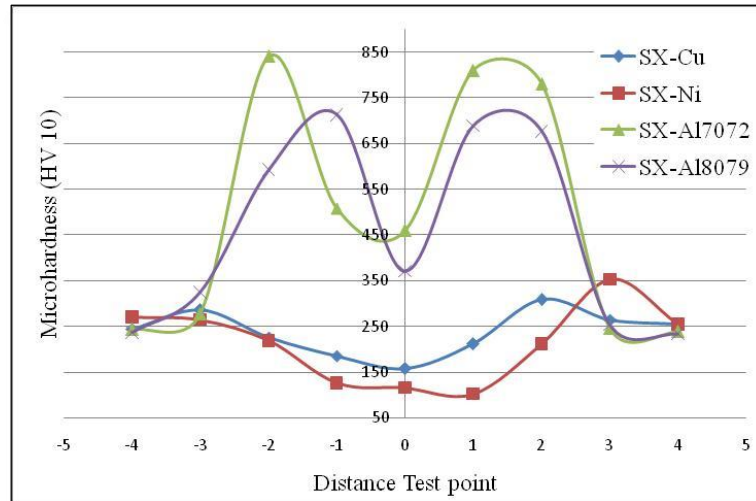
3.2 Microhardness Results

In each of the four joints, Vickers hardness measurements were taken at nine different points. In the SX-Cu joint, as one moves from the steel region to the copper region, the hardness value decreases [2]. When the values for nickel are examined, sequential microhardness analyses performed on cross-sections of microstructure samples revealed lower hardness values in the interlayer compared to both the base material and the diffusion zone, as anticipated [4]. Depending on the

Joined metal, in diffusion studies where the interlayer metal is aluminium, the hardness at points where aluminium sublayer diffuses is close to the hardness of the base material. This is valid in places where phase formation is not observed [11]. However, both Al7072 and Al8079 metals have formed phases to a good extent in the diffusion zone with SX steel. This has resulted in high hardness values at these points. These values are seen in Table 7 and Figure 10.

Table 7. Hardness measurement table of materials

Materials	Distance from the weld centre								
	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
SX-Cu	244.6	286.2	227.2	186.5	158.3	212.3	309.8	265.2	254.3
SX-Ni	271.0	265.2	218.5	126.7	116.6	103.0	212.7	353.3	255.7
SX-Al7072	243.9	277.1	841.0	508.8	459.9	809.9	780.4	246.6	238.9
SX-Al8079	236.5	324.7	593.4	713.5	371.4	689.1	677.4	254.2	234.1

**Figure 10.** Hardness chart of materials

3.3 Heatmap Results

Heat map analysis was conducted for all four diffusion joints. Better heating data was observed in regions where diffusion occurred more prominently. During diffusion bonding, temperature plays a crucial role in interfacial diffusion; as the temperature increases, the number of atoms spreading to the opposite side and diffusion distances also increase [3, 21]. Bonding temperature significantly influences the welding

performance of joints. At a low bonding temperature, poor bonds form due to the slow diffusion of elements, complicating the diffusion process. Successful diffusion-welded joints can be achieved by utilizing an optimal bonding temperature with a 1-hour holding time and applying a compressive pressure of 5MPa [19]. The heat distribution map of all four samples is clearly visible in Figure 11.

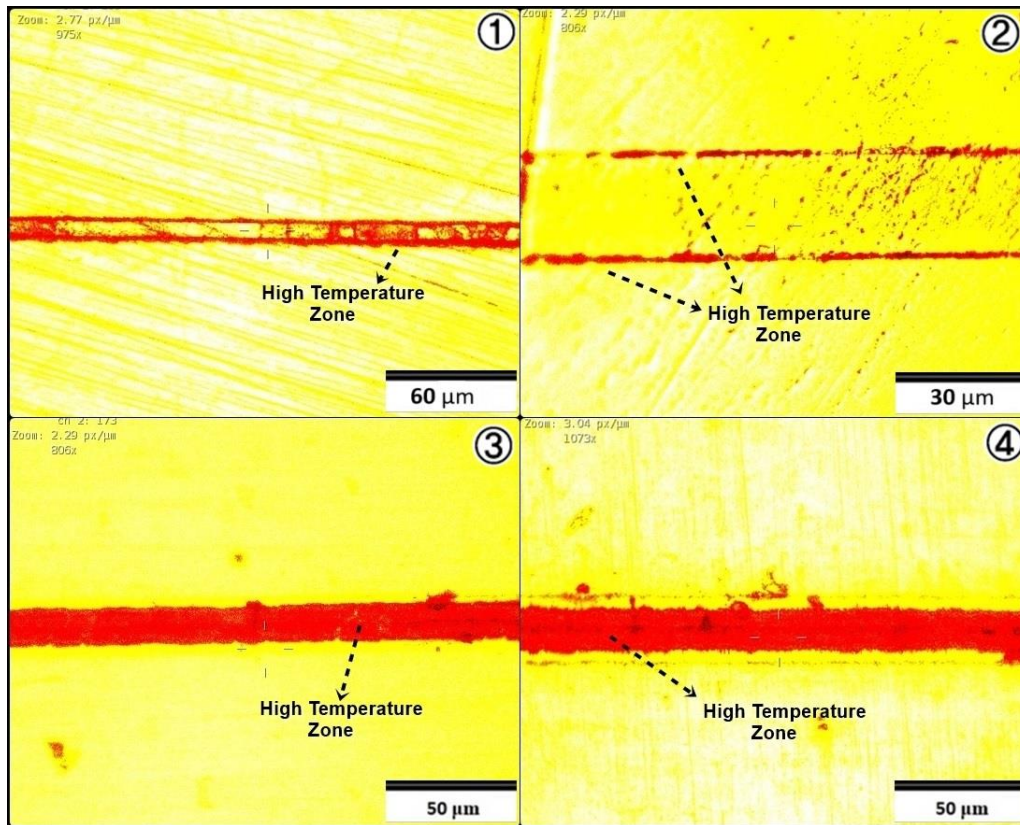


Figure 11. Heatmap of materials 1) SX-Cu, 2) SX-Ni, 3) SX-Al7072, 4) SX-Al8079

4. Conclusions

In this study, SX steel was successfully joined using the diffusion bonding method with copper, nickel,

- When the microstructures of the joints were examined, an alpha-ferrite structure was observed in the copper interlayered joints, while multiphase structures were observed in the SX-Al7072 and SX-Al8079 metal pairs, indicating extensive diffusion of the interlayers.
- EDS analysis results revealed high diffusion rates of intermetallic phases in both the interface and diffusion regions in SX-Cu and SX-Ni joints. On the other hand, high concentrations of iron diffusion were detected in both the interface and diffusion regions of SX-Al7072 and SX-Al8079 connections.
- SEM images showed microcracks on the aluminum (Al) surface in SX-Al7072 and SX-Al8079 joint pairs. This is attributed to the commonly encountered solidification temperature and the high density of intermetallic phases in the aluminum material.
- Hardness analysis conducted at nine points on all four materials indicated a decrease in
- hardness as one approached the diffusion regions for copper and nickel, while hardness values increased in the aluminum diffusion regions. This is believed to be a consequence of the higher ratio of

Al7072, and Al8079 interlayer materials. The obtained results are presented below:

- intermetallic phases in SX-Al pairs.
- Heat map analysis of the materials revealed that diffusion occurred more extensively along the interface boundaries in SX-Cu and SX-Ni pairs. In SX-Al7072 and SX-Al8079 pairs, diffusion was observed from the interface center toward the boundary of the diffusion region. This was attributed to the higher diffusion rate at elevated temperatures, which made thermal heating more effective in Al pairs.
- In this study, a specialized welding technology was employed. Joining was accomplished in a diffusion bonding furnace within a laboratory environment with the aid of specific metallographic materials. While the equipment used in this process entails disadvantages in terms of cost compared to other welding techniques, the study's data on weld quality, microstructure, and microhardness elevate its significance above other welding methods.

This contribution to the literature provides valuable insights into its potential applications in the aerospace industry and the future of welding technology. In the future, researchers can combine these materials with different parameters and try to determine their

mechanical properties and contribute to the literature.

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"

References

- [1] Sathish, T., Kumar, S. D., Muthukumar, K., Karthick, S. Temperature distribution analysis on diffusion bonded joints of Ti-6Al-4V with AISI 4140 medium carbon steel. *Materials Today: Proceedings*, 21, 847-856, 2020.
- [2] Babayev, Y., Kahraman, F., Karadeniz, S. A new approach on diffusion welding of Fe-Cu-C and Fe-Zn-C powder metal parts. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(11), 1292-1296, 2010.
- [3] Zhang, Y., Jiang, S. Atomistic investigation on diffusion welding between stainless steel and pure Ni based on molecular dynamics simulation. *Materials*, 11(10), 1957, 2018.
- [4] Delice U, 1.4462 duplex stainless steel using nickel interlayer with diffusion welding with bonding, master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Nevşehir, 2021.
- [5] Reddy, G. M., Ramana, P. V. Role of nickel as an interlayer in dissimilar metal friction welding of maraging steel to low alloy steel. *Journal of materials processing technology*, 212(1), 66-77, 2012.
- [6] Avettand-Fènoël, M. N., Nagaoka, T., Fujii, H., Taillard, R. Effect of a Ni interlayer on microstructure and mechanical properties of WC-12Co cermet/SC45 steel friction stir welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 40, 1-15, 2019.
- [7] Wei, Y., Xiong, J., Li, J., Zhang, F., Liang, S. Microstructure and enhanced atomic diffusion of friction stir welding aluminium/steel joints. *Materials Science and Technology*, 33(10), 1208-1214, 2017.
- [8] Shi, H., Qiao, S., Qiu, R., Zhang, X., Yu, H. Effect of welding time on the joining phenomena of diffusion welded joint between aluminum alloy and stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(12), 1366-1369, 2012.
- [9] Azizi, A., Alimardan, H. Effect of welding temperature and duration on properties of 7075 Al to AZ31B Mg diffusion bonded joint. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(1), 85-92, 2016.
- [10] Ustinov, A. I., Falchenko, Y. V., Ishchenko, A. Y., Kharchenko, G. K., Melnichenko, T. V., & Muraveynik, A. N. Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, 16(8), 1043-1045, 2008.
- [11] Kejanlı, H., Avcı, M. T/M yöntemiyle üretilmiş Mg-Ti alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesine aratabakanın etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(1), 279-289, 2018.
- [12] Lopez, G. A., Sommadossi, S., Gust, W., Mittemeijer, E. J., Zieba, P. Phase characterization of diffusion soldered Ni/Al/Ni interconnections. *Interface science*, 10, 13-19, 2002.
- [13] Haghshenas, M., Abdel-Gwad, A., Omran, A. M., Gökçe, B., Sahraeinejad, S., Gerlich, A. P. Friction stir weld assisted diffusion bonding of 5754 aluminum alloy to coated high strength steels. *Materials & Design*, 55, 442-449, 2014.
- [14] Agudo, L., Eyidi, D., Schmaranzer, C. H., Arenholz, E., Jank, N., Bruckner, J., Pyzalla, A. R. Intermetallic Fe x Al y-phases in a steel/Al-alloy fusion weld. *Journal of materials science*, 42, 4205-4214, 2007.
- [15] S. Kou, *Welding Metallurgy*, second ed., John Wiley and Sons, Hoboken, 2013, pp. 257-300.
- [16] Ahmad, M., Akhter, J. I., Shahzad, M., Akhtar, M. Cracking during solidification of diffusion bonded Inconel 625 in the presence of Zircaloy-4 interlayer. *Journal of alloys and compounds*, 457(1-2), 131-134., 2008.
- [17] Liu, J., Kou, S. Effect of diffusion on susceptibility to cracking during solidification. *Acta Materialia*, 100, 359-368, 2015.
- [18] Han, J., Zhao, G., Cao, Q. Internal crack recovery of 20MnMo steel. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 40, 164-169, 1997.
- [19] Samiuddin, M., Li, J., Chandio, A. D., Muzamil, M., Siddiqui, S. U., Xiong, J. Diffusion welding of CoCrNi medium entropy alloy (MEA) and SUS 304 stainless steel at different bonding temperatures. *Welding in the World*, 65, 2193-2206, 2021.

[20] Uday, M. B., Fauzi, M. A., Zuhailawati, H., Ismail, A. B. Thermal analysis of friction welding process in relation to the welding of YSZ-alumina composite and 6061 aluminum alloy. *Applied Surface Science*, 258(20), 8264-8272, 2012.

[21] Taşkın, M., Çalgılı, U. Modelling of microhardness values by means of artificial neural networks of Al/SiCp metal matrix composite material couples processed with diffusion method.

Mathematical and Computational Applications, 11(3), 163-172, 2006.

[22] Taskin, M., Dikbas, H., Caligulu, U. Artificial neural network (ann) approach to prediction of diffusion bonding behavior (shear strength) of ni-ti alloys manufactured by powder metalurgy method. *Mathematical and Computational Applications*, 13(3), 183-191, 2008.



Aşırı öğütülmüş kalkopirit konsantresinden bakırın nitrik asit ve dikromat ortamında seçimli kazanımı

Selective recovery of copper from intensively milled chalcopyrite concentrate in nitric acid and dichromate medium

Zeynel Abidin Sarı^{1*}, Mehmet Deniz Turan²

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü/Metalurji Programı, zeynel.sari@iste.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5932-2141>

²Fırat Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, mdturan@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2136-1425>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 2 Haziran 2024
Revizyon 24 Haziran 2024
Kabul 19 Temmuz 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Kalkopirit Konsantresi, Aşırı Öğütme, Seçimli Liç, Potasyum Dikromat, Bakır

ÖZ

Kalkopiritin liçi, kompakt altıgen kristal yapısından dolayı çoğunlukla zordur. Kalkopiritten metal ekstraksiyonunu geliştirmenin yöntemlerinden biri de aşırı öğütmeyle mekanik aktivasyon işleminin uygulanmasıdır. Bu çalışmada, aşırı öğütmeyle tabii tutulmuş kalkopirit konsantresinin nitrik asit (HNO₃) ve potasyum dikromat (K₂Cr₂O₇) varlığında selektif liç işlemi incelenmiştir. Bunun için öncelikle kalkopirit konsantresi paslanmaz çelik hazne ve bilyelere sahip speks tipi bir öğütücüde belirli sürelerde öğütme işlemine tabii tutulmuştur. Daha sonra elde edilen ürün, sıcaklığı ayarlanabilen kuvvet düzenekli çoklu bir manyetik karıştırıcı vasıtasıyla liç işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan liç sıcaklığı ve liç süresi ile birlikte bakır kazanımının arttığı diğer taraftan selektifliği azaltan demirin ise sınırlı oranda çözündüğü belirlenmiştir. Optimum şartlar olarak 25 dk speks öğütme süresi, 1,5 M HNO₃ konsantrasyonu, 0,3 M K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu, 65 °C liç sıcaklığı, 120 dk liç süresi, 25 mL/g sıvı-katı oranı ve 400 rpm karıştırma hızında Cu ve Fe ekstraksiyon verimleri sırasıyla %98,6 ve %1,6 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan öğütmesiz koşullarda yapılan özdeş şartlardaki liç deneylerinde ise bakır ekstraksiyonunun %50 civarında olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca optimum şartlardaki deneylerde seçimliliği azaltan demirin liç artığında K-Cr-jarosit olarak kaldığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra demirin jarosit olarak çökmesinde ortam sıcaklığı ve çözelti pH değerinin oldukça etkin olduğu saptanmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 June 2024
Received in revised form 24 June 2024
Accepted 19 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Chalcopyrite Concentrate, Intensive Milling, Selective Leaching, Potassium Dichromate, Copper

Doi: 10.24012/dumf.1494580

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The leaching of chalcopyrite is generally difficult due to its compact hexagonal crystal structure. One of the methods to improve metal extraction from chalcopyrite is the application of mechanical activation through intensive milling. In this study, the selective leaching process of intensively milled chalcopyrite concentrate in the presence of nitric acid (HNO₃) and potassium dichromate (K₂Cr₂O₇) was examined. For this purpose, chalcopyrite concentrate was first milling for specific periods in a spex mill with stainless steel vessel and balls. Then, the obtained product was leached using a multiple magnetic stirrer with a temperature-adjustable bathtub device. According to the obtained results, it has been determined that copper recovery increases with increasing leaching temperature and leaching time, while iron, which reduces selectivity, dissolves in limited amounts. The optimum conditions were determined as follows: 25 minutes of spex milling time, 1.5 M HNO₃ concentration, 0.3 M K₂Cr₂O₇ concentration, 65°C leaching temperature, 120 minutes of leaching time, 25 mL/g liquid-solid ratio, and a stirring speed of 400 rpm. Under these conditions, the extraction efficiencies for Cu and Fe were determined as 98.6% and 1.6%, respectively. On the other hand, in similar leaching experiments conducted without milling, the copper extraction was calculated to be around 50%. Additionally, in experiments under optimum conditions, it was determined that iron, which reduces selectivity, remained in the leaching residue as K-Cr-jarosite. In addition, it has been determined that temperature and solution pH are very effective in the precipitation of iron as jarosite.

Giriş

Bakır, insan uygarlığının başlangıcından beri kullanılan temel metallere birisidir. Bakır ilk endüstriyel metallere birisi olup farklı endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda bakır, bilgisayarlar, cep telefonları ve elektronik cihazlarda ve hatta elektrikli araçlarda kullanılması nedeniyle ilerleyen bilgi teknolojisi endüstrisinde önemli bir metal olarak yerini almıştır. 4. Sanayi devriminin öncüsü olan bilişim endüstrisinde bu açıdan elektronik üretimin daha da artması beklenmektedir. Çok iyi bir elektrik iletkenliğine sahip olan bakır, neredeyse tüm cihazlarda çok önemli bir unsur olduğundan, bilgi teknolojisi geliştikçe talebi de artacaktır [1].

Ancak uygarlık tarihinden beri bakırın yüksek talebi ve tüketimi nedeniyle bakır cevherleri ve tenör değerleri azalmış durumdadır. Daha önceleri, bakır oksitler veya ikincil bakır sülfür cevherleri yüzeye yakın halde bol miktarda bulunurken daha sonra yer yüzeyinin derinliklerindeki yataklarda bulunmaya başlanmıştır. Diğer taraftan sülfürlü bakır cevherlerinin mineral yapılarından dolayı refrakter yapıya sahip oldukları iyi bilinmektedir [2], [3]. Bu cevherlerden bakır üretimi ise daha yüksek maliyetli bir durumu meydana getirmektedir. Birincil bakır sülfür mineralinin en bilinen ve kullanılan örneklerinden biri kalkopirit (CuFeS₂). Kalkopirit, dünya bakır rezervlerinin yaklaşık %70'ini meydana getiren, en bol bulunan birincil bakır sülfür minerallerinden birisidir [4]. Kalkopirit mineralinden bakır üretmek amacıyla genellikle geleneksel bir bakır üretim prosesi olan pirometalurjik işlemler uygulanmaktadır. İşlem sırasında öncelikle cevher hazırlama tesislerinde bakır konsantresi elde edilmekte ve daha sonra konsantrelerden bir takım ergitme proseslerinden sonra blister bakır üretilmektedir. Daha sonra ileri endüstriyel uygulamalara yönelik %99,99 saflıkta katodik bakır elde etmek amacıyla elektrorafinasyon prosesi uygulanmaktadır [5], [6]. Ancak pirometalurjik işlemler sırasında oluşan SO_{x,2,3} gaz emisyonunun çevresel kaygıları nedeniyle proses zararlı olabilmektedir. Ayrıca pirometalurjik olarak, düşük tenör değerine sahip sülfür cevherlerini işlemek hedefleniyorsa bu çok dezavantajlı olmaktadır. Diğer taraftan süreç, hedef metallerin yanı sıra gangları da eritmek için yüksek miktarda enerji gerektirmekte ve bu da yüksek karbon ayak izine neden olmaktadır. Bununla birlikte burada bir izabe tesisinin sermaye maliyeti genel hidrometalurjik proseslerden yaklaşık üç kat daha yüksek olmaktadır [7]. Hidrometalurjik prosesler, daha çok liç işlemi ve çözelti saflaştırılması ile ilgilidir. Bu proses, düşük tenörlü sülfür cevherlerinin işlenmesi için uygun bir yöntem olabilir. Ama buradaki süreç cevher mineralojisine ve bakırın tenörüne göre değişmektedir. Bakır hidrometalurjisi, genel olarak bakırın liç işlemi ile sulu faza alınmasını, ardından çözeltilsinin saflaştırılmasını ve %99,99 saflıkta bakır katot üretmek için elektrokimyasal işlemi içermektedir [8]. Liç prosesinde, bakırın iyonik formda elde edilmesi için çeşitli liç reaktiflerine ihtiyaç duyulmaktadır. 25 °C'de suda Cu-S-O-H₂O için Pourbaix diyagramı incelendiğinde, iyonik bakırın, 5'in altındaki çözelti pH'sında sulu faz olarak mevcut olabilmektedir [9]. Bu, bakırın asidik durumda çözülebileceği anlamına gelmektedir. Sülfürik asit, hidroklorik asit ve nitrik asit bakırın liç işleminde sıklıkla kullanılan çözücülerdir. Tenorit (CuO), malakit (CuCO₃.Cu(OH)₂) ve krikozol (CuO.SiO₂) gibi bakır oksitli

mineraller söz konusu asitlerde kolaylıkla çözünebilmektedir. Ama kalkopirit gibi kompakt altıgen kristal yapıya sahip bakır sülfür cevherleri liçi durumunda Fe³⁺, O₂, H₂O₂, O₃, KMnO₄ ve Cr₂O₇²⁻ gibi çeşitli güçlü oksitleyici maddelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların dışında birçok sülfürlü cevher yapılarının oksidasyonuna dayanan çok çeşitli bakteri kültürleri kullanılarak yapılan liç işlemleriyle metal ekstraksiyonlarının incelendiği biyoliç çalışmaları da mevcuttur [10]. Bununla birlikte çoğu zamanda asidik çözeltilerle birlikte, ultrason yöntemi, mikrodalgalar yöntemi, otoklav ve mekanik aktifleştirme gibi çeşitli liç yöntemleri de denenmiştir.

Kalkopiritin liçi, çözünmesi zor olduğundan ve güçlü kimyasal bağlara sahip olduğu için güçlü oksidantlar ve etkili liç koşulları gerektirmektedir. Ayrıca çözünme oranını arttırmak için araştırmacılar basınç liçi ve mekanik aktivasyon gibi bazı kombine yöntemlere odaklanmışlardır [11]–[13]. Öğütme yoluyla gerçekleştirilen mekanik aktivasyon, katı maddelerin yapısının, kimyasal bileşiminin ve özelliklerinin değiştirilmesini içeren karmaşık bir süreçtir. Örneğin yapılan bir çalışmada araştırmacılar, oksitleyici reaktif olarak hidrojen peroksit ve EDTA gibi şelatlayıcı bir ajan varlığında kalkopiritin geleneksel liç, mekanik aktivasyon ve ultrason liç işlemini incelemişlerdir. Kalkopirit konsantresinden metallerin çözünmesi için oksitleyici reaktifin gerekliliği ortaya konmuştur. Ayrıca artan metal ekstraksiyonu için mekanik aktivasyonun önemli bir parametre olduğu vurgulanmaktadır. Örneğin, 30 dk gibi bir öğütme işleminden sonra yapılan liç işleminde bakır ekstraksiyonunun öğütme ile birlikte %47'den %83'e yükseldiği belirtilmektedir [14]. Hidrojen peroksit sülfürlü mineraller için oksidant olarak uygun bir reaktiftir. Ama hidrojen peroksitin kararsız bir bileşik olması nedeniyle mineral yüzeyi ve çözünebilir iyonların varlığında hızlı bir şekilde katalizlenir. Bu durumda da peroksitin hızlı ekzotermik reaksiyonu neticesinde ortaya çıkan aktif oksijen, liç sistemindeki sülfür minerallerinin oksidasyonu için yeterince kullanılamaz. Bu durumu önlemek için deneylerde genellikle aseton, etilen glikol, alkoller, sitrik asit ve asetik asit gibi reaktifler eş zamanlı olarak kullanılmıştır. Hidrojen peroksit ve asetik asit varlığında RSM modelleme ile kalkopiritin liçi üzerine yapılan bir çalışmada spex tipi bir öğütücüde mekanik aktivasyon sonrası liç işleminin hidrojen peroksit kullanımını azalttığı ve daha düşük sıvı-katı oranlarında neredeyse bakırın tamamının ekstrakte edildiği belirtilmektedir [15], [16]. Liç davranışı ve mekanizması üzerine mekanik aktivasyonun etkisinin incelendiği bir başka çalışmada kalkopiritin liç kinetiğinin, onun refrakter doğası ve pasif katmanların oluşumundan dolayı yavaş olduğu belirtilmektedir. Mekanik aktivasyonun kalkopiritin liç kinetiğini büyük ölçüde geliştirdiği ve sulu ortamda demir ile birlikte bakır ekstraksiyonunu %14,1'den %91,8'e kadar artırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca elektrokimyasal çalışma neticesinde mekanik aktivasyonun katodik reaksiyon kinetiğini değiştirmediği ancak anodik çözünme kinetiğini önemli ölçüde artırdığı belirtilmektedir [17]. Kalkopirit liçi, düşük maliyeti nedeniyle hem araştırma çalışmalarında hem de endüstriyel uygulamalarda büyük ilgi görmüştür. Bununla birlikte, kalkopirit çözünme işlemi sırasında Cu liç hızının yavaş olması, geniş uygulamasını sınırlamaktadır. Bu durumu aşmak amacıyla yapılan bir çalışmada kalkopirit ve oksidant olarak Fe₂(SO₄)₃.xH₂O birlikte öğütülüp aktive edilerek çözünebilir bakır sülfat reaksiyonlarının elde edildiği ve dolayısıyla Cu ekstraksiyon hızının önemli ölçüde arttığı

belirlenmektedir. Aktivasyondan sonra bakırın %98'inden fazlasının, 1,5 saat boyunca 348 K'de tutulan pH 1,0 sülfürik asit çözeltisi içerisinde ekstrakte edildiği rapor edilmiştir. Ama seçimliliği azaltan demirin ise sulu ortamda yoğun şekilde çözündüğü söylenebilir [18]. Diğer taraftan başka bir çalışmada ise %1,6 Cu oranına sahip bir kalkopirit cevherinin nitrat (NaNO_3 , KNO_3)-sülfürik asit-deniz suyu sistemi kullanılarak liç verimi incelenmiştir. Sülfürik asitteki nitratların sülfid cevherleri için iyi oksitleyici olduğu ifade edilmektedir. Liç testlerinde klorür iyonları mevcut olduğunda asit nitrat ortamında daha yüksek oranda bakır ekstraksiyonu elde edildiği bildirilmektedir. Ayrıca, en yüksek bakır ekstraksiyon oranı %97,2 ile 70 °C'de yüksek sülfürik asit (1 M) ve sodyum nitrat (1 M) konsantrasyonlarında elde edildiği belirtilmektedir. Nitrat yokluğunda, aynı liç koşulları altında, yalnızca ağırlıkça %28'lik bir bakır ekstraksiyonu elde edilebildiği vurgulanmaktadır [19]. Sülfürik asit ve potasyum dikromat mevcudiyetinde kalkopirit konsantresinin liçi üzerine yapılan bir çalışmada optimum şartlar olarak 97 °C, 150 dakika, 0,4 M H_2SO_4 ve 0,1 M $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ konsantrasyonu koşullarında bakırın yaklaşık %82 civarında ekstrakte edildiği bunun yanı sıra oksidasyon neticesinde hem kalkopiritten hem de piritten gelen demirinde ortamda yoğun şekilde çözündüğü ifade edilmiştir [20]. Sonuç olarak atmosferik koşullarda kalkopiritin şimdiye kadar asidik şartlarda yapılan liç çalışmalarında, ya bakır çözünürlüğünün sınırlı olduğu ya da liç ortamında seçimliliği azaltan demirin yüksek oranda çözündüğü belirlenmiştir.

Potasyum dikromat ve nitrik asit kombinasyonu, kalkopirit gibi sülfid minerallerini çözmekte etkilidir. Bu kombinasyon, bakırın çözünürlüğünü artırır ve demirin çözünürlüğünü sınırlayarak seçici yüksek metal kazanımı sağlamaktadır. Bu reaktifler, diğer liç yöntemlerine kıyasla daha hızlı reaksiyon hızları sağlayabilir. Bu, süreç süresini kısaltarak verimliliği artırmaktadır. Potasyum dikromat ve nitrik asit kullanımı, bakır ve demirin seçici olarak liç edilmesini sağlar, diğer istenmeyen metal bileşenlerin çözünmesini minimize eder.

Bu çalışmada, aşırı öğütmeye tabii tutulmuş kalkopirit konsantresinin nitrik asit ve potasyum dikromat varlığında selektif liç işlemi incelenmiştir. Bu amaçla öğütme süresi, nitrik asit ve dikromat konsantrasyonu, süre ve sıcaklık gibi değişkenlerin ekstraksiyon verimine etkisi araştırılmıştır. Böylelikle kalkopiritin aşırı öğütme neticesinde dikromat ve ve nitrik asit çözeltileriyle liçi sonunda bakırın tamamen kazanılması ve selektifliği azaltan demirin ise oldukça sınırlı oranda çözünerek demir çözünme probleminin aşılması amaçlanmıştır.

Materyal ve metot

Ergani konsantresi olarak bilinen ve deneylerde kullanılan kalkopirit konsantresi faaliyet gösterdiği dönemlerde Elazığ ili Maden ilçesindeki flotasyon tesisinden temin edilmiştir. Bu konsantre öncelikle topaklanmaları dağıtmak ve belirli tane boyutunu elde etmek amacıyla bir halkalı değirmenden geçirildi ve -200 mesh tane boyutuna sahip kısmı elenerek tüm deneylerde kullanılmıştır. Bu tane boyutuna elenmiş konsantre, daha homojen ve tekdüze bir numune sağlamaktadır. Elenen konsantre önce havada bir gün boyunca, daha sonra bir gece 50 °C'ye ısıtılmış etüvde kurutulmuştur. Kurutulan örneklerin kimyasal analizlerini gerçekleştirmek üzere mikrodalga parçalama ünitesi yardımı ile örneklerin tamamının çözeltiye alınmasını takiben metaller yönünden analizi atomik absorpsiyon spektrometresi

(AAS, Perkin-Elmer- AAnalyst 400 Modeli) vasıtasıyla gerçekleştirildi. Diğer taraftan kükürt (S) içeriklerinin belirlenmesi ise X-ışını floresans (Bruker-S8 Tiger) ve gravimetrik olarak BaSO_4 yöntemiyle gerçekleştirildi. Konsantrenin kimyasal bileşimi Tablo. 1'de görülmektedir. Konsantresinin, mineralojik yapısının aydınlatılması için X ışını difraksiyon (XRD) (Shimadzu XRD-6000) analizi yapılmıştır. XRD analizi sonuçlarına göre mevcut mineral fazlarının baskın olarak kalkopirit (CuFeS_2) ve pirit (FeS_2) bileşiklerinden meydana geldiği belirlendi (Şekil. 1).

Orijinal ve aşırı öğütmeye tabii tutulmuş kalkopirit konsantresinin atmosferik liç deneylerinde, liç çözeltisi kuvvet düzenekli çoklu bir manyetik karıştırıcı (Velp Scientifica MultiStirrer 15) ile 0,1 L 'lik şilifli cam balonlarda liç işlemine tabii tutulmuştur. Gerekli olan liç sıcaklığı ise, bir su banyosu yardımı ile ısıtılan suyun kuvete gönderilmesi ve burada liç işleminin gerçekleştirilmesiyle sağlandı. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerde buharlaşma kayıplarını önlemek amacıyla deneysel sistemde geri soğutucu kullanılmıştır. Aşırı öğütme işlemleri ise 2 kademeli devir hızına sahip (numune hareket hızı 1000 devir/dk olarak ayarlanmış) C-LIN (HHS4P-M) marka speks tipi bilyeli bir değirmende gerçekleştirilmiştir. Speks tipi bilyeli değirmen öğütülecek malzeme ile aktarılan ortamın bir arada tutulduğu çeliktan kabin, cihaz üzerinde bulunan hareketli bir tabla üzerine yerleştirilmesi ve cihazın yüksek bir devirle bu tablayı hareket ettirmesi sonucu öğütme işleminin gerçekleştirdiği bir öğütme sistemidir. Deneyler, 80 ml hacmindeki paslanmaz çelik öğütme hücresinde kuru olarak yapılmıştır. Öğütme esnasında öğütme haznesi içerisinde meydana gelebilecek sıcaklık artışını minimum düzeyde tutabilmek amacıyla cihaz 15 dakika çalıştırılıp 15 dakika durdurularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm öğütme işlemlerinde bilye-partikül oranı 10 ve öğütme haznesi doluluk oranı % 11 olacak şekilde sabit bırakılmıştır.

Liç işlemleri HNO_3 (Merck) ve $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Merck) varlığında hazırlanan çözeltiler ile gerçekleştirilmiştir. Liç deneylerinde 25 ml/g sıvı-katı oranı ve 400 rpm karıştırma hızı olacak şekilde sabit bırakılmıştır. Liç deneylerinin sonunda içerikler mavi bant süzgeç kâğıdından süzülükten sonra elde edilen çözeltilerde bakır ve demir metal içerikleri AAS cihazı kullanılarak metaller açısından analiz edilmiştir.

Deneysel bulgular ve tartışma

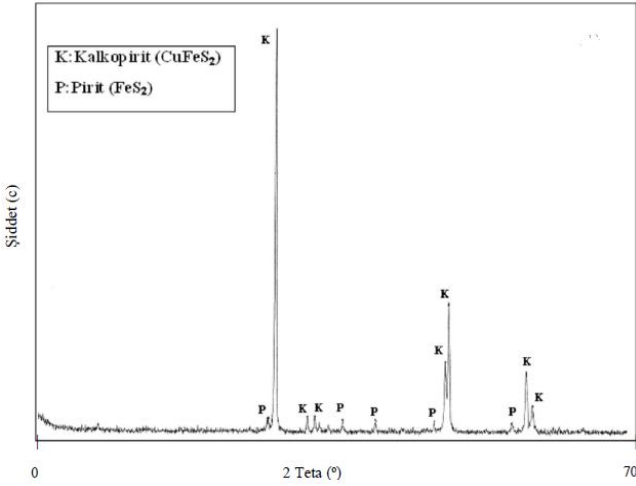
Deneysel çalışmalarda, aşırı öğütmeye tabii tutulmuş kalkopirit konsantresinin HNO_3 ve $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ varlığında selektif liç işlemi incelenmiştir. Bu amaçla atmosferik şartlarda yapılan deneylerde sırasıyla, öğütme süresi (0-40 dk), HNO_3 konsantrasyonu (0-2 M), $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ konsantrasyonu (0-0,5 M), liç süresi (1-120 dk) ve liç sıcaklığı (25-65 °C) gibi parametreler incelenmiştir.

Öğütme süresinin etkisi

Sülfürlü cevherlerden demir dışı metallerin üretilmesi teknolojik açıdan zor ve ekonomik açıdan önemli görevler arasındadır. Sülfür kimyasal olarak stabil olduğu ölçüde ekstraksiyon zorlaşır.

Tablo 1. Kalkopirit konsantresinin kütlece kimyasal bileşimi.

Element	Cu	Fe	S	Si	Pb	Al
%	28,31	28,52	29,36	1,12	0,37	0,30

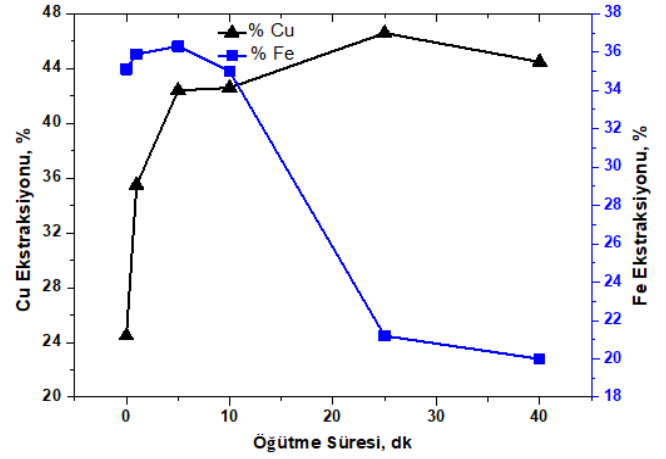


Şekil 1. Kalkopirit konsantrisinin X-ışını difraktogramı ve belirlenen mineral fazları.

Bu nedenle, ya yoğun oksidatif reaksiyon koşulları uygulanmalı ya da sülfürlerin kimyasal stabilitesi uygun seçilmiş bir ön liç işlemiyle değiştirilmelidir. Cevherin aşırı öğütme yoluyla mekanik aktivasyonu, ikinci yolun tipik bir örneğidir. Bu açıdan sülfürlü bir yapıya sahip olan kalkopiritin liçi, kalkopiritin refrakter doğasından ve pasif katmanların oluşumundan dolayı yavaştır [21]. Aşırı öğütme, maddelerin kimyasal ve fizikokimyasal dönüşümlerini içerir; özellikle sülfürlerin aşırı öğütülmesi, reaksiyon hızlarını ve hedef minerallerin çözünabilirliğini önemli ölçüde artırabilir [22]. Ayrıca aşırı öğütmeyle parçacık yüzeyinde yeni aktif yüzeyler elde edilebilir ve böylece bu malzeme kimyasal reaktiflerle kolayca reaksiyona girebilir. Bunun sonucunda ince parçacıkların oluşması, spesifik yüzey alanının artması ve kusurlu yapıların oluşması, liç işlemini hızlandırır [23]. Bu aşamadaki çalışmalarda, kalkopirit konsantrisi öncelikle speks tipi bir değirmende 1, 5, 10, 25 ve 40 dk gibi farklı zamanlarda öğütülmüştür. Daha sonra öğütmesiz koşullar ve farklı sürelerde öğütme neticesinde elde edilen ürünler daha önce belirlenen bazı optimum şartlar olan; 1 M HNO₃ konsantrasyonu, 0,2 M K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu, 45 °C liç sıcaklığı, ve 30 dk liç süresi gibi sabit parametrelerde liç deneyleri yapılmıştır. Buna göre Şekil 2'de görüldüğü gibi artan öğütme süresine bağlı olarak bakır metali çözünme verimi artmıştır. Örneğin, öğütmesiz ortamda ve 25 dk öğütme neticesinde yapılan liç deneylerinde bakır ekstraksiyonu sırasıyla %24,5 ve %46,6 olarak elde edilmiştir. Ayrıca demir çözünmesinin ise öğütme süresi ile pek fazla değişmediği ama ilk 10 dk öğütmeden sonra azalarak %21 civarında çözüldüğü belirlenmiştir. Diğer taraftan 25 dk 'ya kadar artan öğütme sürelerinde bakır ekstraksiyon verimi artar iken bu süreden sonra ekstraksiyon veriminin pek değişmediği ya da azaldığı belirlenmiştir. Yani burada öğütme miktarının daha fazla artışı, partiküllerin giderek kümeleşmesiyle sıvı/katı temas yüzeyini küçülterek oksidasyon hızını azaltmaktadır. Ayrıca Palaniandy [24], tarafından yapılan bir çalışmada da benzer nedenlerden kaynaklanan sonuçlar elde edildiği bildirilmektedir. Bu yüzden optimum öğütme süresi 25 dk olarak belirlenmiştir.

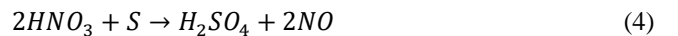
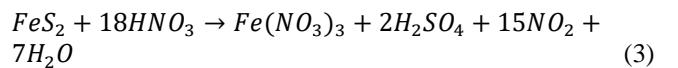
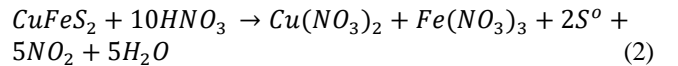
HNO₃ Konsantrasyonunun Etkisi

Nitrik asit sulu ortamda Denklem 1'deki gibi hidronyum iyonları (H⁺) ve nitrat (NO₃⁻) olarak çözünmektedir. NO₃⁻, ferrik iyon ile karşılaştırıldığında daha yüksek indirgeme potansiyeline sahiptir (NO₃⁻ → NO (g) için E = 0,96 V veya



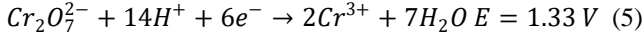
Şekil 2. Metal ekstraksiyonu üzerine öğütme süresinin etkisi (HNO₃ konsantrasyonu: 1 M; K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu: 0,2 M; liç süresi: 30 dk; liç sıcaklığı: 45 °C)

NO₃⁻ → NO₂ (g) için E= 0,80 V) [25]. Burada nitrat nitrik oksit (NO) veya nitrojen dioksit (NO₂) gazlarına indirgenir ve tüm redoks potansiyelleri ferrik iyondan daha yüksektir. Kalkopirit, pirit ve nitrik asit arasındaki reaksiyon yüksek derecede ekzotermiktir. Bu reaksiyon Denklem 2 ve 3'deki gibi tarif edilebilir. Burada kalkopirit liçi sırasında kalkopirit, bakır ve demir iyonuna çözünür ve sülfür, elementel kükürt'e oksitlenir. Kalkopirit oksitlenirken nitrat ya NO ya da NO₂'ye indirgenir. Üretilen elementel kükürt, Denklem 4'de gösterildiği gibi nitrik asit ile sülfata oksitlenir. Bu durumda kalkopiritin artan çözünmesi ile birlikte meydana gelecek elementel kükürtten oluşan poröz kül tabakası da engellenmiş olur. Çünkü oluşan elementel kükürt tabakası, çözülmüş türlerin ve reaktantların difüzyonunu engelleyen bariyer oluşturarak sınırlar ve bu durum mineral çözünmesi oranını olumsuz etkiler [26].



Metal çözünmesi üzerine HNO₃ konsantrasyonunun etkisi 0, 0,1, 1, 1,5 ve 2 M asit çözeltisi kullanılarak incelenmiştir. HNO₃ konsantrasyonunun kalkopirit çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi, artan asit konsantrasyonuyla birlikte bakır ekstraksiyonunun arttığını göstermektedir. 0,2 M K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu, 30 dk liç süresi ve 45 °C sabit sıcaklıkta 0,1 M ve 1,5 M HNO₃ konsantrasyonlarında bakır kazanımı sırasıyla %5 ve %61 civarında elde edilmiştir. Bunun yanı sıra daha da artan asit konsantrasyonlarında bakır çözünürlüğü artarak %88 civarına ulaşmasına rağmen %70 dolaylarında da yoğun miktarda demir çözülmüştür. Asit'in ekonomik kullanımı ve çözelti selektifliği de dikkate alınarak yapılan değerlendirmede optimum asit konsantrasyonu 1,5 M olarak belirlenmiştir. Ayrıca artan asit konsantrasyonu konsantrasyonunun çözünmesi üzerinde oksitleyici bir özelliğe sahip olan dikromat redüksiyonunu da Denklem 5'de görüldüğü gibi arttıracaktır [27]. Yani Nernst denkleminin Denklem (5)'e

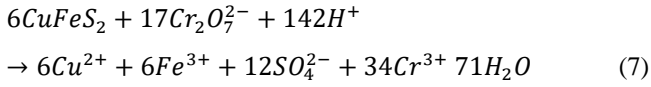
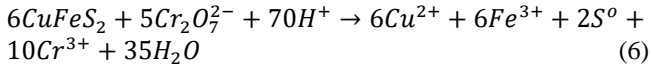
uygulanmasıyla, hidrojen iyonu konsantrasyonunun artırılmasının dikromat iyonunun indirgeme potansiyelini arttırdığı söylenebilir.



Bu potansiyel değer (1,33 V) hemen hemen tüm metal sülfürleri oksitlemeye yeterlidir.

K₂Cr₂O₇ Konsantrasyonunun Etkisi

Dikromat iyonu (Cr₂O₇²⁻), diğer oksitleyici liç reaktifleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek oksidasyon potansiyelleri nedeniyle son zamanlarda kalkopiritin sülfürik asitli ortamda çözülmesi için kullanılmıştır. Kalkopiritin asidik bir ortamda dikromat iyonları tarafından oksidatif çözünmesi, aşağıdaki reaksiyonlara göre (Denklem 6 ve 7) elementel kükürt veya sülfat oluşumuna yol açar [28].

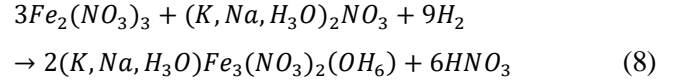


Dikromat konsantrasyonunun kalkopirit oksidasyonu üzerindeki etkisi, 1,5 M HNO₃ konsantrasyonu, 30 dk liç süresi ve 45 °C sabit sıcaklıkta başlangıç potasyum dikromat konsantrasyonunun 0-0,5 M aralığında değiştirilmesiyle araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3(b)'de görülmektedir. Buna göre dikromatın bulunmadığı şartlarda 30 dakikalık liç süresi sonunda %4 civarında bakır kazanılırken 0,3 M oluncaya kadar artan dikromat konsantrasyonlarında bakır kazanımı %68'e kadar ulaşmıştır. Bundan sonra artan dikromat konsantrasyonlarında ise bakır çözünürlüğünün pek etkilenmediği belirlenmiştir. Bunun muhtemel nedeni olarak ise, kalkopirit yüzeyinin krom (VI) ile kaplanarak, artan dikromat konsantrasyonunun oksidasyon hızı üzerinde esasen hiçbir etkisinin olmamasıdır [29]. Diğer taraftan demir çözünürlüğünün ise tüm konsantrasyon çalışmalarında neredeyse %40 civarında kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca daha önceki yapılan çalışmalarda örneğin, sülfürik asit - potasyum dikromat çözeltisindeki sonuçlar, potasyum dikromat konsantrasyonundaki artışın kalkopirit oksidasyon hızını hem olumlu hem de olumsuz etkileyebileceğini gösterirken, diğer çalışmalarda adı geçen sistemdeki kalkopirit oksidasyon hızının yalnızca sülfürik asit konsantrasyonuna bağlı arttığı tespit edilmiştir [28]. Burada yapılan çalışmalarda ise oksidasyon hızının dikromat konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Liç Süresinin Etkisi

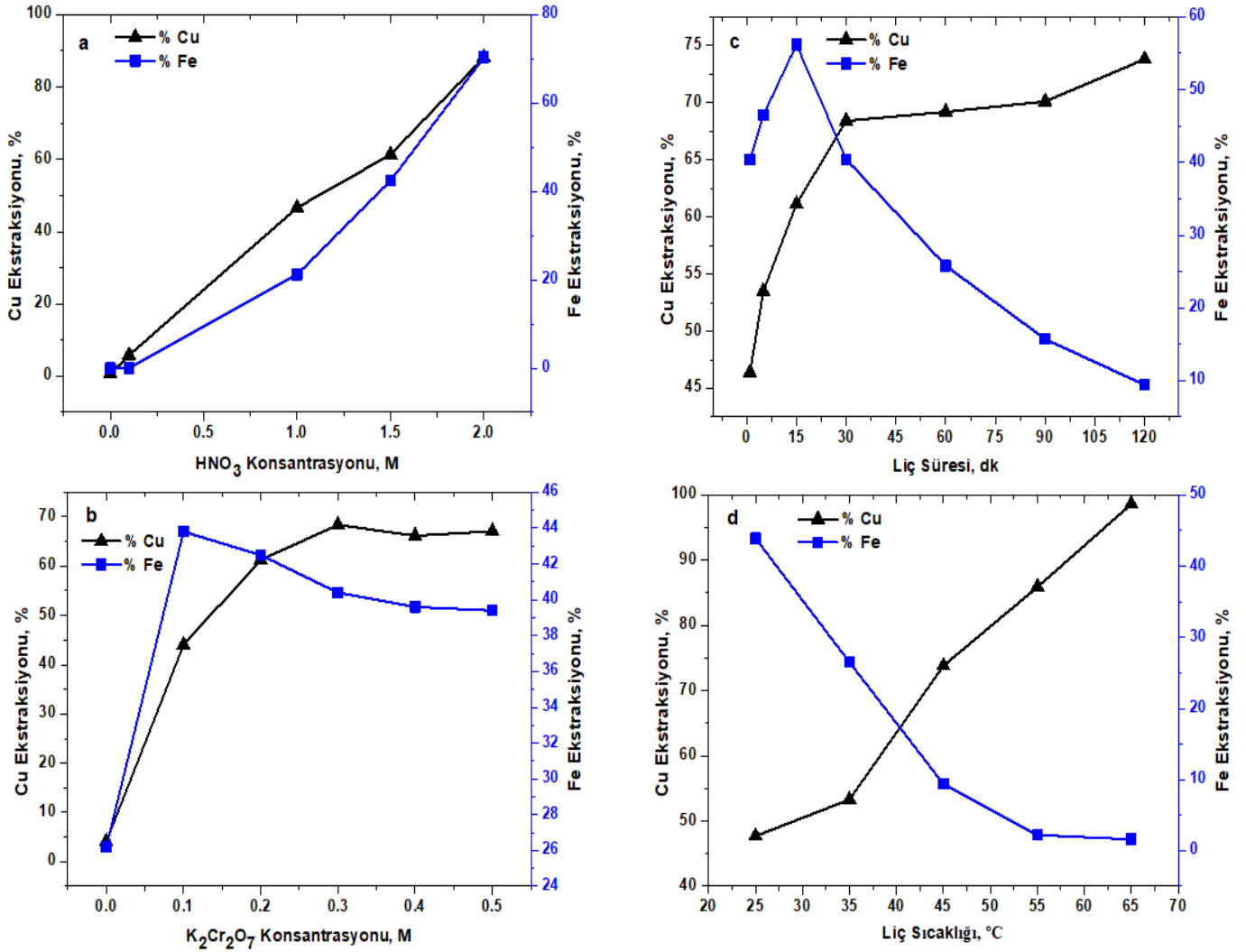
1.5 M HNO₃ konsantrasyonu, 0,3 M K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu ve 45 °C sabit sıcaklıkta liç süresi ile yapılan çalışmalarda, liç süresinin esasen bakır ekstraksiyonu üzerinde pek etkin bir parametre olmadığı belirlenmiştir. Şekil 3(c)'de görülen grafikte liç reaksiyonunun esasen hızlı olduğu söylenebilir. Liç işleminin ilk 1 dakikası içinde bakırın yaklaşık %46 'sı ekstrakte edilirken, 120 dk gibi yeterli miktarda tanınan uzun liç sürelerinde ise bakır ekstraksiyonun ancak %73 dolaylarında olduğu belirlenmiştir. Ama ilginç şekilde demir ekstraksiyonun ise 1 dakikalık liç süresinde %40 civarında olduğu, buna karşın 15 dakikadan sonra artan liç süresi ile birlikte giderek azaldığı ve 120 dakikalık liç süresi sonunda

%9 dolaylarında olduğu saptanmıştır. Bu açıdan selektifliği sağlamak amacıyla optimum liç süresi olarak 120 dakika seçilmiştir. Demirin artan liç süresi ile birlikte azalarak çökmesi ise HNO₃-dikromat liçi sırasında potasyum krom jarosit (KFe₃(CrO₄)₂(OH)₆) çökmesi için uygun koşulların oluştuğunu göstermektedir. Çünkü çözelti pH'sı bu çökeltinin oluşabilmesi için etkin bir parametredir [30]. Örneğin 1 dakikalık liç süresi sonunda çözelti pH'sı 0,86 olarak ölçülmüş, ama artan liç süresi ile birlikte pH'nın giderek arttığı ve 120 dakikalık liç süresi sonunda neredeyse söz konusu jarositin çökme aralığına denk gelen 1,89 civarında olduğu belirlenmiştir. Jarosit, kalkopiritin belirli koşullarda liçi sırasında çökeltilebilir temel ferrik tuzlarından biridir. Bu çalışma için örnek olabilecek jarosit çökmesinin kimyasal reaksiyon denklemi Denklem 8'de gösterilmiştir. Jarosit, ferrik (Fe³⁺) hidrolizi ve K⁺, Na⁺, H₃O⁺ ve NH₄⁺ gibi diğer tek değerli katyonlarla reaksiyona girmesiyle oluşmaktadır [31].



Liç Sıcaklığının Etkisi

1.5 M HNO₃ konsantrasyonu, 0,3 M K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu ve 120 dk sabit liç süresi ile yapılan çalışmalarda metal ekstraksiyonu üzerine liç sıcaklığının etkisi Şekil 3(d)'de görülmektedir. Buna göre 25 °C'de %47,7 olan bakır ekstraksiyonunun 65 °C'ye kadar artan sıcaklık ile birlikte arttığı ve %98,6'ya ulaştığı belirlenmiştir. Bu durumda liç sıcaklığının bu şartlarda bakır kazanımı üzerine etkin bir parametre olduğu söylenebilir. Ama demir çözünmesinin ise artan sıcaklık ile birlikte giderek azaldığı 25 °C'de %43,9 iken 65 °C'de %1,6'ya kadar düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum çözünen demirin yine potasyum krom jarosit olarak çökmesini akla getirmektedir. Çünkü jarosit çökmesini oluşturan sıcaklık, çözelti pH'sı ve Eh gibi çeşitli faktörler vardır [32], [33]. Klauber (2008) yaptığı bir çalışmada jarosit oluşumunun yüksek sıcaklıkta arttığını öne sürmektedir [31]. Reaksiyon 60 °C'nin altındaki düşük sıcaklıkta engellenir, ancak çözelti pH'sı 2,0 civarındaysa jarosit hala stabildir. Jarosit çökme hızı pH 2,0 ile 3,0 arasında maksimumdadır ve pH 1,0'in altında veya 3,0'ün üstünde azalmaktadır. Ayrıca çözelti kimyası, jarosit oluşumunu tetiklemek üzere Fe³⁺ hidrolize etmek için yüksek düzeyde oksidatif durumda olmalıdır [30]. Ayrıca yapılan çalışmalarda K-jarositin meydana geldikten sonra hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda oldukça düşük çözünürlük değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Örneğin 1,5 ile 3 arasındaki pH değerinde sentetik K-jarositin çözünürlüğünün incelendiği bir çalışmada 25 °C'de logK_{sp} değerinin -11 [34] olduğu başka bir çalışmada ise 100 °C'de -15,8 [35] olduğu bildirilmektedir. Bu bilgilere dayanarak jarosit oluşumu için Eh, pH ve sıcaklık koşulları Şekil 4 (a) gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi esasen belirli bir pH değerine kadar artan sıcaklık ile birlikte jarosit oluşumu gözlemlenmektedir. Örneğin bizim buradaki sıcaklık parametresi çalışmasında sıcaklığın demir çözünmesi ve çözelti pH'sı ile değişimini gösteren grafik Şekil 4 (b)'de görülmektedir. Şekle göre 25 °C'de yapılan deneylerde pH değeri 1,6 civarında iken çözelti ortamında pH-sıcaklık grafiğine göre Fe³⁺ türleri etkindir. Ama artan sıcaklık ile birlikte pH değeri de artmakta 45 °C'den sonra 2 üzerine çıkarak maksimum sıcaklıkta demir çözünmesi %1,6 civarında olmaktadır.



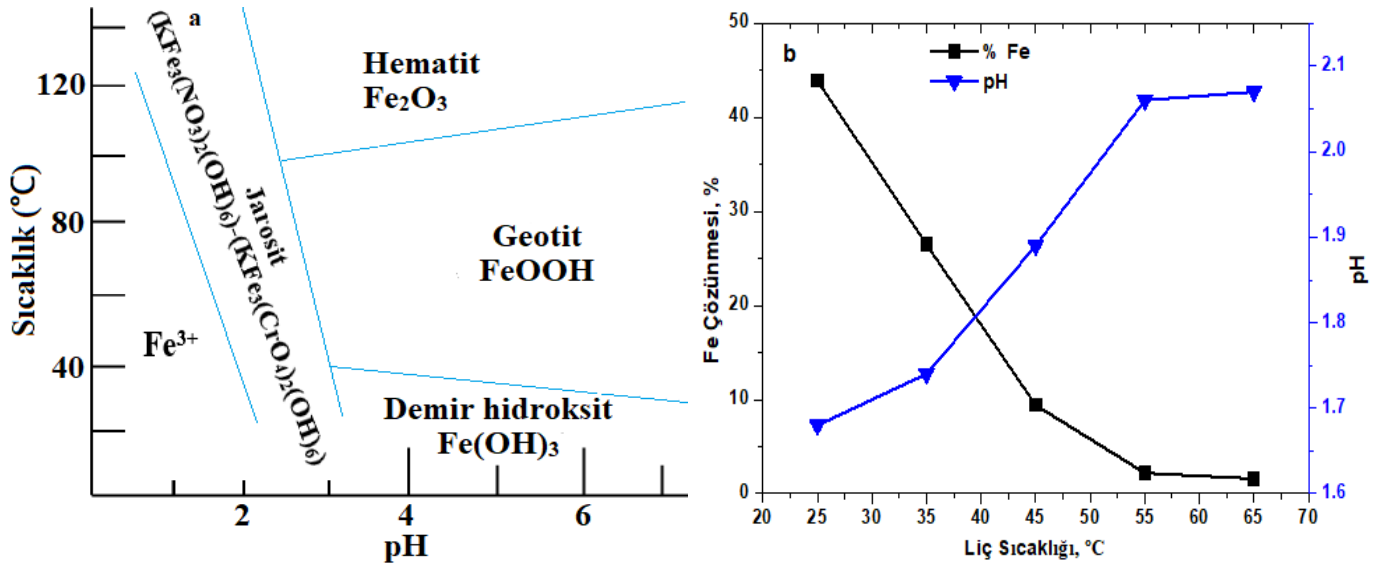
Şekil 3. Metal ekstraksiyonu üzerine **a.** HNO₃ konsantrasyonu, **b.** K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu, **c.** liç süresi, **d.** liç sıcaklığının etkisi

Bu durumda jarosit çökeltisinin oluşabilmesi için artan sıcaklık ve pH değeri ile birlikte çözeltide demir miktarının azalması söz konusu jarosit çökeltme prosesinin başarı ile gerçekleştirilerek selektif bir sulu bakır çözeltisinin elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca jarosit oluşumunu ispatlamak amacıyla optimum şartlarda elde edilen liç artığına XRD faz analizi uygulanmıştır. Liç artığının X-ışını difraktogramı ve belirlenen mineral fazları Şekil 5'de görülmektedir. Analiz neticesinde katı artıktaki baskın olarak potasyum krom jarosit ($\text{KFe}_3(\text{CrO}_4)_2(\text{OH})_6$) piklerine rastlanılmıştır. Bunun yanı sıra kısmen minör pikler halinde geotit (FeOOH), butlerite ($(\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O})$) ve elementel sülfür (S) tabakasının oluşumu belirlenmiştir. Burada oldukça başarılı bir liç işleminin gerçekleştirilmesinin yanı sıra kullanılan liç kimyasallarının da bazı dezavantajları vardır. Örneğin, nitrik asitin diğer asitlere kıyasla daha pahalı olması, çevreye toksik gazlar salabilmesi ve kullanılan ekipmanlarda korozyona neden olabilmesi gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Benzer şekilde potasyum dikromatında diğer kimyasallara kıyasla maliyet ve çevresel açıdan dezavantajlı yanlarının bulunduğu söylenebilir. Diğer taraftan sulu çözeltide son adımda elektro kazanım yöntemi ile elektrolitik bakır üretimine gitmeden önce bakır iyonlarının nitrik asit veya nitrat sulu sisteminden seçici olarak organik faza transferi daha uygun olacaktır. Çünkü

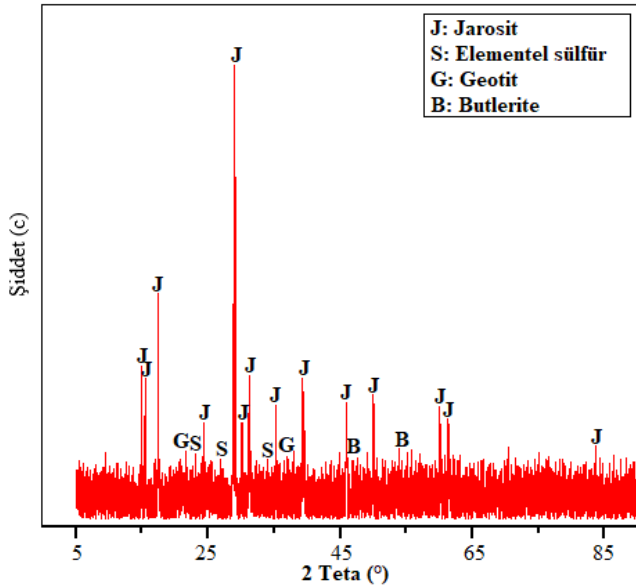
elektroliz safhasında zararlı NO_x gazları açığa çıkabilmektedir. Bu açıdan Lazorova (2005) tarafından yapılan bir çalışmada, LIX reaktifleri ile nitrat ortamından bakırın başarılı şekilde solvent ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir [36]. Bu açıdan çözücü ekstraksiyon devresine uyumluluk durumunda nitrat ortamının uygulanması diğer alternatif oksidantlara göre nispeten daha kolay olabilir. Diğer taraftan selektif olarak elde edilen bakır nitrat ($(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2)$) çözeltisi tekstil, seramik, elektronik, elektro kaplama sanayinde, kaplama olarak ve diğer metaller için parlatma aracı olarak da kullanılabilir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, kalkopirit konsantrasyonunun speks tipi bir değirmende aşırı öğütülmesi neticesinde elde edilen ürünün nitrik asit ve potasyum dikromat varlığında atmosferik koşullarda liç işlemine tabii tutularak seçimli bakır çözeltisi elde edildi. Metal çözünmesi üzerine selektifliğin sağlanması için çalışılan liç parametreleri içerisinde liç sıcaklığı ve süresinin oldukça etkin olduğu belirlendi. Elde edilen sonuçlara göre 25 dk speks öğütme süresi, 1,5 M HNO₃ konsantrasyonu, 0,3 M K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu, 65 °C liç sıcaklığı, 120 dk liç süresi, 25 mL/g sıvı-katı oranı ve 400 rpm karıştırma hızında Cu ve Fe ekstraksiyon verimleri sırasıyla %98,6 ve %1,6 olarak belirlendi.



Şekil 4. a. Jarosit ve diğer demir çöktürlerinin pH ve sıcaklığa göre stabilitesi [37], b. Bu deneysel çalışma için bazı sabit koşullarda demir çözünmesinin sıcaklık ve pH'ya göre değişimi (Öğütme süresi: 25 dk; HNO₃ konsantrasyonu: 1,5 M; K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu: 0,3 M; Liç süresi: 120 dk; Liç sıcaklığı: 65 °C)



Şekil 5. Optimum şartlarda elde edilen liç artığının X-ışını difraktogramı ve belirlenen mineral fazları (Öğütme süresi: 25 dk; HNO₃ konsantrasyonu: 1,5 M; K₂Cr₂O₇ konsantrasyonu: 0,3 M; Liç süresi: 120 dk; Liç sıcaklığı: 65 °C)

Diğer taraftan öğütmesiz koşullarda yapılan benzer şartlardaki liç deneylerinde ise bakır ekstraksiyonunun %50 civarında kaldığı hesaplandı. Bu açıdan kalkopiritten metallerin ekstraksiyonu üzerine öğütme ile sağlanan aktivasyonun belirli bir süreye kadar gerekli ve faydalı olduğu gözlemlendi. Nitrik asit ve dikromat liç sisteminde 65 °C'ye kadar artan liç sıcaklığı karşısında elde edilen pH:2 civarında, demirin, liç atığında K-Cr-jarosit olarak çıktığı tespit edildi.

Sonuç olarak, kalkopiritin aşırı öğütme neticesinde potasyum dikromat ve nitrik asit çözeltileriyle liçi sonunda bakırın neredeyse tamamen kazanılarak bakır ekstraksiyonun iyileştirildiği selektifliği azaltan demirin ise oldukça sınırlı

oranda çözünerek demir çözünme probleminin aşıldığı belirlendi. Ayrıca optimum şartlarda elde edilen metal kazanımı değerleri benzer kazanım çalışmalarına göre daha düşük sıcaklık ve zaman koşullarında yapıldığından bu çalışmanın daha avantajlı olduğu görüldü.

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

Sarı: Çalışma konsepti ve tasarım, deneysel çalışma, verilerin analizi ve yorumlanması, makalenin yazılması, revizyon
Turan: Çalışma konsepti ve tasarım, verilerin analizi ve yorumlanması, revizyon

Teşekkür

Desteklerinden dolayı İskenderun Teknik Üniversitesine ve Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] V. Flores, B. Keith, and C. Leiva, "Using artificial intelligence techniques to improve the prediction of copper recovery by leaching," *J. Sensors*, vol. 2020, pp. 1–12, Feb. 2020, doi: 10.1155/2020/2454875.
- [2] G. Calvo, G. Mudd, A. Valero, and A. Valero, "Decreasing ore grades in global metallic mining: a theoretical issue or a global reality?," *Resources*, vol. 5, no. 4, p. 36, Nov. 2016, doi: 10.3390/resources5040036.
- [3] M. D. M. Vieira, M. J. Goedkoop, P. Storm, and M. A. J. Huijbregts, "Ore grade decrease as life cycle impact indicator for metal scarcity: the case of copper," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 23, pp. 12772–12778, Dec. 2012, doi: 10.1021/es302721t.

- [4] B.W. Chen and J.K. Wen, "Feasibility study on heap bioleaching of chalcopyrite," *Rare Met.*, vol. 32, no. 5, pp. 524–531, Oct. 2013, doi: 10.1007/s12598-013-0114-1.
- [5] R. Padilla, M. Rodriguez, and M. C. Ruiz, "Sulfidation of chalcopyrite with elemental sulfur," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 34, no. 1, pp. 15–23, Feb. 2003, doi: 10.1007/s11663-003-0050-9.
- [6] H. R. Watling, "Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 1. Review of acidic sulfate, sulfate–chloride and sulfate–nitrate process options," *Hydrometallurgy*, vol. 140, pp. 163–180, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.hydromet.2013.09.013.
- [7] M. Dimitrijević, A. Kostov, V. Tasić, and N. Milosević, "Influence of pyrometallurgical copper production on the environment," *J. Hazard. Mater.*, vol. 164, no. 2–3, pp. 892–899, May 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.08.099.
- [8] J. Paynter, "A review of copper hydrometallurgy," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 74, no. 4, pp. 158–172, 1973.
- [9] G. Schlesinger, M. E. Davenport, W. G. Sole, G. C. Flores, *Extractive Metallurgy of Copper*. Elsevier, 2022.
- [10] S. Panda, P. K. Parhi, B. D. Nayak, N. Pradhan, U. B. Mohapatra, and L. B. Sukla, "Two step meso-acidophilic bioleaching of chalcopyrite containing ball mill spillage and removal of the surface passivation layer," *Bioresour. Technol.*, vol. 130, pp. 332–338, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.12.071.
- [11] M. D. Turan and H. S. Altundoğan, "Leaching of a copper flotation concentrate with ammonium persulfate in an autoclave system," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 21, no. 9, pp. 862–870, Sep. 2014, doi: 10.1007/s12613-014-0982-x.
- [12] K. Tkáčová and P. Baláž, "Reactivity of mechanically activated chalcopyrite," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 44–45, pp. 197–208, Mar. 1996, doi: 10.1016/0301-7516(95)00036-4.
- [13] M. D. Turan, Z. A. Sarı, and H. Nizamoğlu, "Pressure leaching of chalcopyrite with oxalic acid and hydrogen peroxide," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 118, pp. 112–120, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jtice.2020.10.021.
- [14] M. D. Turan, J. P. Silva, Z. A. Sarı, R. Nadirov, and N. Toro, "Dissolution of chalcopyrite in presence of chelating agent and hydrogen peroxide," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 75, no. 1, pp. 273–280, Jan. 2022, doi: 10.1007/s12666-021-02426-z.
- [15] M. D. Turan, Z. A. Sarı, H. Nizamoğlu and Y. Elmas, "Optimization of copper extraction from advanced milled chalcopyrite concentrate with hydrogen peroxide leaching," *J. Undergr. Resour.*, vol. 11, no. 6, pp. 47–51, 2017.
- [16] M. D. Turan, M. Sarıkaya, Z. A. Sarı and A. Haxhiaj, "Investigating and optimization of copper extraction from chalcopyrite concentrate with hydrogen peroxide in presence of acetic acid," *Curr. Phys. Chem.*, vol. 7, no. 4, Dec. 2017, doi: 10.2174/1877946807666170808114115.
- [17] Y. Bai, W. Wang, S. Zhao, D. Lu, F. Xie, and D. Dreisinger, "Effect of mechanical activation on leaching behavior and mechanism of chalcopyrite," *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, vol. 43, no. 4, pp. 440–452, May 2022, doi: 10.1080/08827508.2021.1906239.
- [18] Y. Li, B. Wang, Q. Xiao, C. Lartey, and Q. Zhang, "The mechanisms of improved chalcopyrite leaching due to mechanical activation," *Hydrometallurgy*, vol. 173, pp. 149–155, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.hydromet.2017.08.014.
- [19] P. Hernández, M. Taboada, O. Herreros, T. Graber, and Y. Ghorbani, "Leaching of chalcopyrite in acidified nitrate using seawater-based media," *Minerals*, vol. 8, no. 6, p. 238, Jun. 2018, doi: 10.3390/min8060238.
- [20] S. Aydogan, G. Ucar, and M. Canbazoglu, "Dissolution kinetics of chalcopyrite in acidic potassium dichromate solution," *Hydrometallurgy*, vol. 81, no. 1, pp. 45–51, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.hydromet.2005.10.003.
- [21] G. Viramontes-Gamboa, M. M. Peña-Gomar, and D. G. Dixon, "Electrochemical hysteresis and bistability in chalcopyrite passivation," *Hydrometallurgy*, vol. 105, no. 1–2, pp. 140–147, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.hydromet.2010.08.012.
- [22] Y. Xu, T. Jiang, M. Zhou, J. Wen, W. Chen, and X. Xue, "Effects of mechanical activation on physicochemical properties and alkaline leaching of boron concentrate," *Hydrometallurgy*, vol. 173, pp. 32–42, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.hydromet.2017.05.014.
- [23] M. D. Turan, H. S. Altundoğan, M. Boyrazlı, Z. A. Sarı, H. Nizamoğlu, and A. Demiraslan, "Basic leaching behavior of mechanically activated zinc plant residue," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 72, no. 9, pp. 2359–2364, Sep. 2019, doi: 10.1007/s12666-019-01687-z.
- [24] S. Palaniandy, "Impact of mechanochemical effect on chalcopyrite leaching," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 136, pp. 56–65, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.minpro.2014.10.005.
- [25] M. D. Sokić, B. Marković, and D. Živković, "Kinetics of chalcopyrite leaching by sodium nitrate in sulphuric acid," *Hydrometallurgy*, vol. 95, no. 3–4, pp. 273–279, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.hydromet.2008.06.012.
- [26] M. Z. Mubarak, K. Sukamto, Z. T. Ichlas, and A. T. Sugiarto, "Direct sulfuric acid leaching of zinc sulfide concentrate using ozone as oxidant under atmospheric pressure," *Miner. Metall. Process.*, vol. 35, no. 3, pp. 133–140, Aug. 2018, doi: 10.19150/mmp.8462.
- [27] F. M. Doyle, "Hydrometallurgical extraction and reclamation. By E. Jackson, Ellis Horwood Limited, Halsted Press, Chichester, 1986, 266 pp.," *AIChE J.*, vol. 33, no. 9, pp. 1580–1580, Sep. 1987, doi: 10.1002/aic.690330923.
- [28] M. M. Antonijević, Z. Janković, and M. Dimitrijević,

- “Investigation of the kinetics of chalcopyrite oxidation by potassium dichromate,” *Hydrometallurgy*, vol. 35, no. 2, pp. 187–201, Apr. 1994, doi: 10.1016/0304-386X(94)90051-5.
- [29] L. E. Murr and J. B. Hiskey, “Kinetic effects of particle-size and crystal dislocation density on the dichromate leaching of chalcopyrite,” *Metall. Trans. B*, vol. 12, no. 2, pp. 255–267, Jun. 1981, doi: 10.1007/BF02654458.
- [30] E. M. Córdoba, J. A. Muñoz, M. L. Blázquez, F. González, and A. Ballester, “Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part II: Effect of redox potential,” *Hydrometallurgy*, vol. 93, no. 3–4, pp. 88–96, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.hydromet.2008.04.016.
- [31] C. Klauber, “A critical review of the surface chemistry of acidic ferric sulphate dissolution of chalcopyrite with regards to hindered dissolution,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 86, no. 1–4, pp. 1–17, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.minpro.2007.09.003.
- [32] J. E. Dutrizac and T. T. Chen, “Factors affecting the precipitation of chromium(III) in jarosite-type compounds,” *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 36, no. 1, pp. 33–42, Feb. 2005, doi: 10.1007/s11663-005-0003-6.
- [33] I. A. Reyes, I. Mireles, F. Patino, T. Pandiyan, M.U. Flores, E.G. Palacios, E.J. Gutierrez and M. Reyes, “A study on the dissolution rates of K-Cr(VI)-jarosites: kinetic analysis and implications,” *Geochem. Trans.*, vol. 17, no. 1, p. 3, Dec. 2016, doi: 10.1186/s12932-016-0035-7.
- [34] D. Baron and C. D. Palmer, “Solubility of jarosite at 4–35 °C,” *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 60, no. 2, pp. 185–195, Jan. 1996, doi: 10.1016/0016-7037(95)00392-4.
- [35] C. Kashkay, Y. Borovskaya, and M. Babazade, “Determination of $G^{\circ}_f, 298$ of synthetic jarosite and its sulfate analogues,” *Geochem. Intl*, vol. 12, no. 3, pp. 115–121, 1975.
- [36] Z. Lazarova, M. Lazarova, “Solvent extraction of copper from nitratemedia with chelating LIX-reagents: comparative equilibrium study,” *Solvent Extr. Ion Exch.*, vol. 23, pp. 695–711, 2005.
- [37] P.M. Swash, J. Monhemius, *The Scorodite Process: A technology for the disposal of arsenic in the 21st Century*. University of Concepción, Concepción, Chile, 1998.



Betonarme Perde Duvarların Eğilme ve Kesme Etkilerine Karşı Güçlendirilmesi Üzerine Literatür Değerlendirmesi

Literature Review on Retrofitting of Reinforced Concrete Shear Walls Against Flexural and Shear Effects

Yunus EFE^{1*}, İdris BEDİRHANOĞLU²

¹Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, yefe_21@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5296-2195>

²Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ibedirhanoglu@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6852-3041>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 15 Ocak 2024
Revizyon 25 Ocak 2024
Kabul 27 Temmuz 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Betonarme perde duvar, Eğilme
Güçlendirme, Lifli polimer,
Sargılama

ÖZ

Bölgemizde son yaşanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri dahil olmak üzere depremler sonrası yapılan saha çalışmalarında iyi bir perde duvara sahip bir binada deprem etkisi karşısında iyi çalışmış perde duvarın, yapının rijitliğini artırarak, ötelenmesini azalttığı ve bu şekilde binanın göçmesinin ve ağır hasar almasının önüne geçildiği görülmüştür. Buna karşılık binalardaki kusurlu perdelerin ise deprem esnasında ağır hasar aldığı ve binanın toptan göçme riskini oldukça artırdığı gözlemlenmiştir. Kusurlu betonarme perdelerin davranışlarını iyileştirecek alternatif güçlendirme yöntemlerinin geliştirilmesi ya da bu perdelerin belirlenip, güçlendirilerek etkin hale getirilmesi önem kazanmaktadır. Perde duvarın güçlendirilmesi binanın deprem performansına katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada yanıl yükler nedeni ile betonarme perde duvarlarda eğilme ve kesme etkileri sonucu oluşabilecek hasarların güçlendirilmesine yönelik literatürde birçok çalışma bulunmasına karşılık farklı detayların incelenebileceği deneysel çalışma yapılması gerekliliği görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 January 2024
Received in revised form 25
January 2024
Accepted 27 July 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Confinement, Fibre reinforced
polymer (FRP), Retrofitting,
Flexure, Shear wall

ABSTRACT

After The February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquakes in our region reconnaissance studies carried out. If building had shear walls with well-detailed and well-functioned, it was observed that against the earthquake effect shear wall was increased the stiffness and rigidity of building and preventing heavy damage and collapsing of building. On the other hand, it was observed that defective shear walls in the building increase the risk of severe damage and total collapse of the building during an earthquake. It is important to develop alternative retrofitting methods to improve the effects of these defective concrete shear wall or to identify these shear wall problems to strengthen and make the building wall effective. Besides, Strengthening the shear wall will contribute to the earthquake performance of the building. A lot of studies carried out in the literature related to damages resulting from bending and shear forces in reinforced concrete shear walls. However, it was deemed necessary to conduct more different details of experimental studies and examination of these studies.

Doi: 10.24012/dumf.1420105

* Sorumlu Yazar

Giriş

Depremlerden sonra hasar gören yapılar üzerinde yapılan teknik incelemeler sonucunda perde duvarlarda oluşan hasarlar, perde duvarların binanın genel deprem davranışına katkısı ve perdesiz yüksek binaların ne kadar zayıf oldukları özellikle 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası sahada gözlemlenmiştir.

Türkiye’de son yaşanan 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası da sahada incelemeler gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmalarında betonarme perde duvara sahip yapıların deprem esnasında ağır hasar almasına rağmen diğer yapısal elemanlarda hasarları azaltarak yapının toptan göçmesini engellediği gözlemlenmiştir. Bu da bir kez daha yapının perde duvar içermesinin yaşam kaybını büyük oranda düşürdüğünü göstermektedir. Eğer bir yapı da perde duvar mevcut ise meydana gelen deprem büyüklüğünün etkilerinin büyük bir çoğunluğu betonarme perde duvarlar tarafından karşılanmaktadır.

Ülkemizde genel olarak beton kalitesinin çok düşük olması, düz yüzeyli donatı kullanılması, enine donatı aralık ve detaylarının yeterli olmaması, tasarım hataları, perde uç bölgesi oluşturulmaması, yetersiz etriye ve uygulama hataları gibi uygulamada sık karşılaşılan hatalar betonarme perde elamanın dış etkilere karşı davranışını etkilemekte ve sünekliğini ciddi bir şekilde azaltmaktadır.

Bu çalışmanın amacı perde duvarların genel davranışı, yönetmeliklerde yer alan sınır koşulları, özellikle deprem sonrası sahada karşılaşılan ve tespit edilen eksiklikler ve kusurlar, bu eksikliklerin giderilmesi için yapılan çalışmalar, literatürde Lifli Polimerler (LP/FRP) ile gerçekleştirilen güçlendirme çalışmaları ve son olarak perde duvarlar ile ilgili literatürde açıklığı, eksikliği olduğu değerlendirilen tevzi demirin yanlış kullanımı ve etkileri, perde uç bölgesinin yönetmeliğe uygun oluşturulmaması ve etkileri konularının incelenmesi ve değerlendirilmesidir.

Materyal ve Metot

Bu bölümde betonarme perde duvarların tasarım esasları, davranışı, literatürdeki yeri, gelişimi, perde duvar tasarımına esas standartlar yönetmelikler ile belirlenen kıstaslar ve deprem sonrası yerinde gözlemlenen hasar ve göçme türlerinden bahsedilmiştir.

Betonarme Perde Duvar

Yapıların artan yüksekliği ile ağırlıkları yani yükü artmaktadır. Bu büyük yüke ilave olarak meydana gelebilecek yanal yük (deprem, rüzgâr vs.) etkileriyle oluşabilecek ötelenmelere karşı yapının yönetmeliklerce belirlenen deplasman sınırını aşmaması için rijit davranabilmesi istenir. Bu rijitliği sağlayabilmesi için tasarımda ve en etkili yöntem betonarme perde ilavesidir. Geometrik şekilleri itibari ile eğilme rijitlik (EI) değeri yüksek olduğu için yapıya etkiyen yatay yüklerin büyük bir bölümü betonarme perde duvarlar tarafından karşılanır. Perde duvarların bu yükleri karşılayabilmesi ve

bina performansına katkı sağlayabilmesi için tasarım kurallarına uygun üretilmiş olması gerekmektedir.

Literatür incelendiğinde ilk perde duvar yapımı Büyük Kanto depremi (1923) sonrası T. Naito tarafından önerilmiştir. Naito burada betonarme perde duvarlar ile yapıların depreme karşı daha rijit davranış sağlayacağını önermiştir. Tokachioki (1968) depreminde yapılan gözlemler sonucu bina toplam kapalı alanının her bir 1 m^2 'si için yapının her bir yönünde $30 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ miktarında betonarme perde duvar kullanılması ile binanın deprem karşısında ağır hasar görmediği görülmüştür. Naito'nun perde önerisi ise Japonya ve Şili hariç diğer ülkelerde hemen karşılık bulamamıştır. Amerika'da betonarme perde duvara ilk defa 1950 yılında ve Türkiye'de ise 1968 yılı yayınlanan Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliği (ABYYHY-1968) ile yer verilmiştir [1], [2]. Türkiye'de 1968 yılı öncesi yayınlanan 1940, 1944, 1949, 1953 ve 1962 yönetmeliklerinde betonarme elemanlardan bahsedilirken 1968 yılında yayınlanan yönetmelik ile yapısal elemanların temel hesaplama ve boyut koşullarından bahsedilmiştir [3]. Mevcut Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY 2018) betonarme perde duvarlar uzun kenarın kısa kenara oranı 6 olan taşıyıcı sistem yapı elamanı, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları TS500 (2000)'de ise uzun kenarın kısa kenara oranı en az 7 olan düşey taşıyıcı olarak tanımlanmaktadır. Ancak literatürde ve farklı standartlarda bu oran için farklı değerler verilebilmektedir [4], [5].

Perde duvar yatay yük etkisi altında konsol kolon gibi davranır ve göçme şekilleri incelendiğinde ise perde duvarlarda kapasitesi, tasarımı, yükseklik uzunluk oranı vs. etkilere bağlı olarak eğilme göçmesi, kesme göçmesi, eğilme ve kesme etkisinin beraber görüldüğü göçme, toptan göçme, devrilme dönme göçmesi ve burulma göçmesi gibi farklı göçme türleri oluşmaktadır. Bunun yanında Amerika ve Şili'de perde duvarların çok ince olması nedeni ile düzlem dışı burkulma gibi göçme türleri de gözlenmiştir.

Perde duvarın eğilme kapasitesinin kesme kapasitesinden düşük olduğu eğilme göçmesinde genellikle sünek bir davranış oluşmaktadır. Bu davranış genellikle yükseklik/boy oranı 2 ve üzeri olan perdelerde görülmektedir. Eğilme göçme türünde, yanal kuvvetlerin etkisi ile perdenin bir ucunda basınç gerilmeleri oluşurken diğer ucunda çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Basınç etkisinin olduğu bölgede etriyenin düzgün aralıkta ve sayıda olmaması veya eksikliği ile betonun sıkışması, beton kaplamasının dökülmesi, demir donatıda burkulması oluşurken, perdenin diğer ucunda ise çekme gerilmelerinin oluşması ile betonda çatlaklar demir donatı da akma veya kopmalar meydana gelebilmektedir. Ayrıca gövde de tevzi donatısı eksiklikleri nedeniyle büyük kesme gerilme etkileri oluşabilir. Perde elemanda daha sünek göçme olması için standartlar ve yönetmelikler tasarımda perde duvarın eğilme davranışı göstereceği tasarım şartları oluşturmaktadır. Kesme göçmesi, eğilme göçmesinin aksine gevrek bir göçme türüdür. Genellikle yükseklik/boy oranı 2 altında olan perde duvarlarda görülmektedir. Gevrek ve ani bir göçme olduğu için

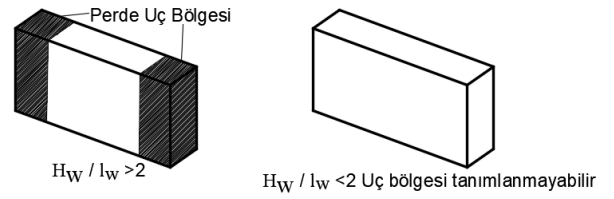
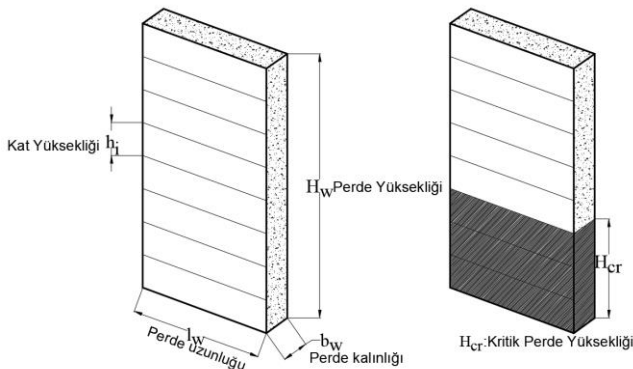
standart ve yönetmelikler bu tür bir hasar ve göçme modunun oluşmasını önlemek istemektedir. Kesme göçmesinde diyagonal çekme hasarı, diyagonal basınç, sık görülen kesme hasarlarıdır. Bununla birlikte perde duvarda eğilme ve kesme davranışının birlikte görüldüğü göçme türleri ile de karşılaşılmaktadır.

Perde duvarların temel kullanım amaçları yapıda yatay elemanlar ile yüklerin aktarımını ve yapının yönetmeliklerce belirlenen rijitliği ve dayanımı sağlamasıdır. Yapıya etkiyecek yatay yüklerin etkin bir şekilde karşılanabilmesi için boyut ve donatı düzen detaylarına ek olarak planda yerleşim şekli de büyük önem göstermektedir. Boyutları gereği yapıya yerleşiminin mümkün olduğu ölçüde simetrik olması beklenmektedir. Perde duvarın bir bölgeye veya belli bir yöne yerleşimi etkin çalışmasını engelleyecek ve yatay yüklerin etkilerine karşı gelemeyecektir [6], [7].

Betonarme Perde Duvar Tasarım Esasları

Perde duvarlar boşluklu ve boşluksuz perde olarak iki gruba ayrılmaktadır [4]. İstenilen rijitliğin sağlanabilmesi ise perde duvarın beton dayanımına, şekline, atalet momentine, perde duvarın yükseklik uzunluk oranına, donatı düzenine ve donatı oranı gibi belli başlı faktörlere bağlıdır.

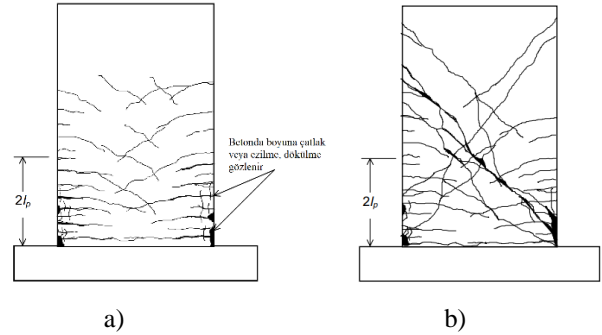
Perde duvar boyutlarına ilişkin tanımlar ve perde duvarın uç bölgesi oluşturma şartı Şekil 1’de paylaşılmıştır. Perde duvar davranışını en çok etkileyen parametre yükseklik/uzunluk (H/L) oranıdır ve bu oran perde duvarın göçme davranışını etkilemektedir. Genel olarak $H/L > 2$ olan perdeler narin (slender) olarak adlandırılmakta ve bu perdelerde eğilme göçmesi hâkimdir. $H/L < 2$ olan perdeler bodur (squat) perde olarak adlandırılmakta ve bu perdelerde kesme veya kesme eğilme hâkim göçme türü görülmektedir. ASCE 41-17’de ise perde boyutları $H/L > 3$ için baskın eğilme davranışı, $H/L < 1.5$ baskın kesme davranışı ve $1.5 < H/L < 3$ için ise eğilme-kesme davranışlı hâkim göçme görüldüğü belirtilmektedir [4], [8].



Şekil 1. Perde duvar boyut tanımları

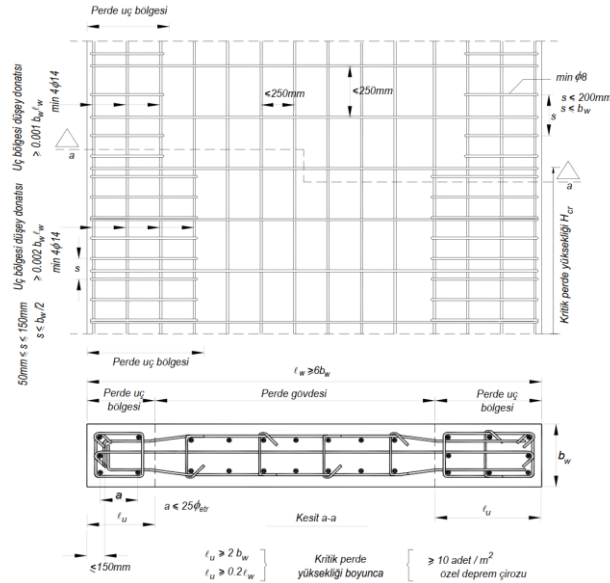
TBDY 2018 ve literatürde genel olarak $H/L > 2$ olan ve süneklik düzeyi yüksek perdelerde yapıya etkiyen yanal kuvvetler nedeni duvarda eğilme etkisi ile perde köşelerinde aksenal basınç ve çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu etkileri azaltmak ve istenilen dayanımı sağlamak için bu tür perdelerin her iki ucunda da perde uç bölgesi oluşturulması gerekmektedir. Uç bölgesi için yönetmelikte ve diğer standartlarda farklı donatı oranları ve şekilleri belirtilse de oluşturulan uç bölgesi ile perde sünek bir davranış sergilemesi amaçlanmaktadır.

Diğer taraftan $H/L < 2$ olan bodur perdelerde ise yapıya etkiyen yükler nedeni ile perde kesitinde kesme kuvveti dayanımı kritik olduğu için TBDY 2018’e göre perde gövdesi, perdenin tamamını temsil etmektedir [4]. Şekil 2’de perde duvarın yanal yük etkisinde göçme davranışı paylaşılmıştır.



Şekil 2. Perde duvar yatay yük etkilerine karşı göçme davranışı a) eğilme göçmesi b) kesme göçmesi [9].

$H/L > 2$ olan perdelerde yapıya etkiyen yanal yükler nedeni ile eğilme momenti etkisi ile uç kısımlarda zorlanmalar meydana gelir. Bu etkiyi karşılamak ve azaltmak için yönetmelik gereği perdenin her iki ucunda kolonlar gibi perde uç bölgesi oluşturulmaktadır. Bu bölge perde duvarın eğilme moment kapasitesini arttırmakta, eğilme momenti etkisi ile oluşacak yoğun basınç etkisini dağıtarak gerilmeyi azaltmakta, perdenin yanal stabilitesini arttırmakta ve oluşturulan uç bölgesine sargı donatılarının yerleşimi ile betonun sargılayıp, yük altında perdenin sünek davranmasını sağlamaktadır. Deprem yönetmeliğinde perde uç bölgesi ve perde gövdesi donatılarının düzenleme koşulları aşağıdaki Şekil 3’te paylaşılmıştır.



Şekil 3. Perde duvar uç bölgesi ve gövde donatılarının yerleşim esaslarına ilişkin koşullar (TBDY 2018)

Deprem yönetmeliklerindeki genel yaklaşım aynı olmakla beraber ülkeler sismik koşullarına göre farklı yaklaşımlar geliştirmektedir. Tablo 1'de TBDY 2018 ile önemli sismik tasarım standartlarına ait belli başlı koşullar ifade edilmektedir. Tablo 1'de paylaşılan Şili'de betonarme eleman tasarım esasları her ne kadar Amerikan Yapısal Eleman Tasarımı Gereksinimleri Standardını (ACI 318), esas alıyorsa da Şili sismik tasarım esasları ile Amerika'daki sismik tasarım esasları ayrılmaktadır. Şili'de yapıların deprem etkilerine karşı çok daha rijit davranmasının istenmesi nedeniyle, tasarım esaslarında belirlenen katlar arası görelî ötelenme limiti $0.002h$ iken diğer üç standartta bu değer 0.01 ile 0.02 mertebesinde. Yani Şili'de yapılan bir yapının Türkiye, Amerika veya Avrupa'ya göre neredeyse 10 kat daha az ötelenme yapması istenmektedir. Aynı özelliklere sahip bir yapının Şili ve Amerikan sismik tasarım esasları ile tasarlandığında Şili yönetmeliklerinde tarif edilen katsayıların neredeyse %50 daha güvenli tarafta olması nedeni ile de yapıya etkiyen kesme kuvveti değeri Amerikan sismik tasarım standardı ile tasarlanan yapıya göre 2 kat daha yüksek kesme kuvvetine maruz kalması istenmektedir. Bu da Japonya ve Şili'de büyük deprem etkilerine rağmen yapıların neden sağlam kaldığının en büyük göstergesidir [4], [10], [11], [12], [13], [14].

Tablo 1. Türkiye, Şili, Amerika ve Avrupa Birliği tarafından kullanılan sismik tasarım standartlarının ve yönetmeliklerinin karşılaştırılması

	Tasarım Yer hareketi
TBDY 2018	AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası ile ifade edilmektedir. 1.Bölge yer ivmesi (PGA)<0.33 g 2. Bölge 0.33g 3. Bölge 0.5g 4.Bölge yer ivmesi (PGA) > 0.75g 1. Bölge – A0 = 0.4 g 2. Bölge – A0 = 0.3 g 3. Bölge – A0 = 0.2 g 4. Bölge – A0 = 0.1 g Ülke üç sismik bölgeye ayrılmıştır. Sıfır periyotlu ivmelenme A0 ile tanımlanarak ifade edilmiştir.
NCh433.OF96	Zone 1 – A0 = 0.2 g Zone 2 – A0 = 0.3 g Zone 3 – A0 = 0.4 g

MCE_R (Maksimum Beklenen deprem etkisi) haritası ile tanımlanmıştır.

ASCE/SEI 7-22

SS – Kısa süreli spektra tepki 2.0g'ye kadar değişmekte

S1 – 1 saniye spektral tepki 0.8g'ye kadar değişmektedir.

Eurocode 8'de ise M deprem büyüklüğü yapının ilgili merkez üssüne uzaklığına bağlı formül ile hesaplanmakta ve maksimum 0.3g değerini almaktadır. $4 < M < 7.3 - 3 \text{ km} < R < 200 \text{ km}$

Eurocode -8

$$\log a_g = -1.48 + 0.27M - 0.92 \log R$$

Yapı sistemi

TBDY 2018

Yeni yapılacak yapılarda ve mevcut binaların güçlendirme tasarımı için uygulanır.

NCh433.OF96

Yeni yapılacak binaların tasarımını kapsamaktadır.

ASCE/SEI 7-22

Yeni yapılacak binaların tasarımını kapsamaktadır.

Eurocode -8

Binaların sismik tasarımı için geçerlidir.

Görelî kat ötelenme sınırları

Her bir deprem doğrultusu için binanın herhangi bir katında hesaplanan görelî kat ötelenmelerinin en büyük değeri verilen koşullara göre değerlendirilip (a) veya (b) koşuluna göre bulunması önerilmektedir. Bu da yaklaşık %2 değeriye denk gelmektedir.

TBDY 2018

$$\lambda \frac{\delta_{i,max}^{(X)}}{h_i} \leq 0.008 \kappa \quad \lambda \frac{\delta_{i,max}^{(X)}}{h_i} \leq 0.016 \kappa$$

NCh433.OF96

Diyafram kütle merkezinde $0.002h$ ve diyaframın diğer noktalarında $0.001h$ 'tan küçük olması istenmektedir.

ASCE/SEI 7-22

Yapı sistemine ve risk kategorisine, analiz yöntemine bağlı olarak $0.015h_{sx}$ ile $0.020h_{sx}$ ötelenme sınırını aşmaması istenmektedir.

Eurocode -8

Katlar arası ötelenme sınırı %1'e eşittir.

Taban kesme kuvveti formülleri

TBDY 2018

$$V_{TE}^{(X)} = m_t S_{AR}(T_p^{(X)}) \geq 0.04 m_t I_{DS} g$$

NCh433.OF96

$$Q_0 = CIP \quad C = \frac{2.75 A_0}{gR} \left(\frac{T'}{T}\right)^n \quad C_{min} = A_0/6g$$

C_{max} NCh433 Tablo 6.4 (R değerine göre)

$$V = C_s W \quad C_s = \left(\frac{S_{DS}}{R}\right) \leq \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)}$$

ASCE/SEI 7-22

$$C_{smin} = 0.044 S_{DS} I_e \geq 0.01$$

$$C_{smin} = 0.5 S_1 / \left(\frac{R}{I_e}\right) \text{ göçmeye yakın}$$

Eurocode -8

$$F_b = S_d(T_1) m. \lambda$$

Burulma düzensizliği

TBDY 2018

Her iki yönde $\pm 5\%$ ek dışmerkezlilik etkileri de göz önüne alınarak, görelî kat ötelemeleri hesaplanacaktır.

Her iki yönde $\pm 5\%$ ek dışmerkezlilik etkileri de göz önüne alınarak, görelî kat ötelemeleri hesaplanacaktır.

NCh433.OF96

Veya $\pm 0.1bk.Zk/H$ her seviyede uygulanan burulma momentleri, o seviye-deki eksantriklik ile çarpılarak hesaplanacaktır.

ASCE/SEI 7-22

Eksantriklik, diyafram boyutunun %5'ine dik yönde dışmerkezlilik etkileri de göz önüne alınarak, hesaplanacaktır.

Eurocode -8

Her iki yönde $\pm 5\%$ ek dışmerkezlilik etkileri de göz önüne alınarak, görelî kat ötelemelerinin hesabı hesaplanacaktır.

Genel Dizayn Spektrumu

TBDY 2018

$$S_{ae}(T) = (0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}) S_{DS} \quad 0 \leq T \leq T_A$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \quad T_A \leq T \leq T_B$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \quad T_B \leq T \leq T_L$$

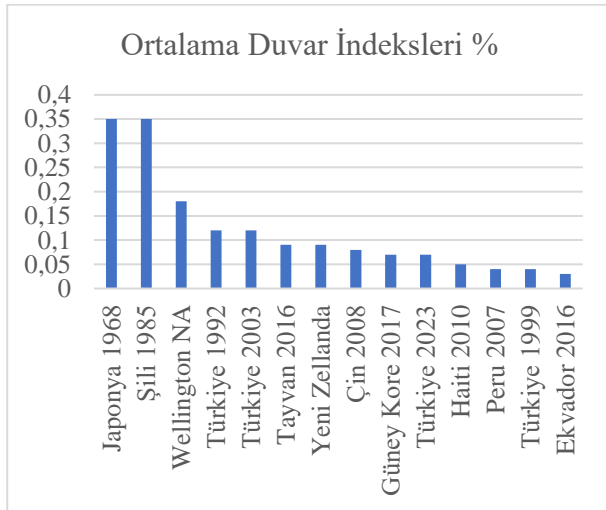
$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_1}{T^2} \quad T_L \leq T$$

NCh433.OF96

$$S_a(T) = \frac{I A_0 \alpha}{R^*} \quad \alpha = \frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_B}{T_0}\right)^p}{1 + \left(\frac{T_B}{T_0}\right)^p}$$

ASCE/SEI 7-22	$0 < T = 0.2 \text{ sec: } S_a(T) = \frac{S_{DS}}{2.5} + \frac{T}{0.2} (0.6S_{DS})$
	$0.2 \text{ sec} < T < T_S: S_a(T) = S_{DS}$
	$T_S < T < T_L: S_a(T) = \frac{S_{D1}}{T}$
	$T_L < T: S_a(T) = \frac{S_{D1}T_L}{T^2}$
Eurocode -8	$0 \leq T \leq T_B: S_c(T) = a_g S [1 + \frac{T}{T_B} (\eta 2,5 - 1)]$
	$T_B \leq T \leq T_C: S_c(T) = a_g S \eta 2,5$
	$T_C \leq T \leq T_D: S_c(T) = a_g S \eta 2,5 [\frac{T_C}{T}]$
	$T_D \leq T \leq 4s: S_c(T) = a_g S \eta 2,5 [\frac{T_C T_D}{T^2}]$

Türkiye deprem yönetmeliğinde ΣA_g herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusu ile aynı yönde çalışan taşıyıcı sistem elemanlarının en kesit alanlarının toplamını, ΣA_p binanın tüm katlarının alanları toplamını, V_t ise yapıya etkiyen deprem yükünü ifade etmektedir. Yönetmelikte herhangi bir katta deprem doğrultusu ile aynı yönde çalışan taşıyıcı eleman oranının minimum 0.002 olması istenmektedir. Bu da Türkiye’de yapılacak beş katlı bir binada beklenen toplam kat alanında minimum betonarme taşıyıcı eleman alanına göre %1’dir. S. Pujol ve diğerleri (2024) tarafından Kahramanmaraş depremleri sonrası saha incelemeleri çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada taşıyıcı eleman oranının toplam kat alanına oranı ile elde edilen indeks yüzdeleri bulunup dünyadaki örnekleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4’te duvar indekslerinin karşılaştırması paylaşılmıştır. Deprem sonrası incelemede hasarlı yapıların çoğunun duvar indeksinin %0,10’a yakın olduğu gözlenmiştir. Binalarda büyük oranda perde duvar yapımına sahip Şili ve Japonya’da ise bu oran ortalama %0.35 olarak görülmektedir. Bu da deprem etkilerine karşı yapıda perde duvar oranının önemini göstermektedir.



Şekil 4. Ortalama duvar indekslerinin Türkiye ve diğer ülkelere göre karşılaştırmaları [1]

Tablo 2’de Türkiye, Amerika ve Avrupa standart ve yönetmelikleri perde duvar tasarım koşulları karşılaştırılması paylaşılmıştır. Tasarım koşulları ve kısaltmalar benzer tanımları ifade etmektedir. TBDY 2018 minimum beton dayanımı, perde genişliği, donatı oranı, detay koşulları, ile Amerikan ve Avrupa standardına göre geliştirilmiştir. Perdelerde aksel yük sınırı koşullarında TBDY 2018 ve ACI 318 beton karakteristik dayanımını baz alırken Eurocode-8 dizayn

tasarım sınıfını almaktadır. Bu da TBDY 2018’e göre yapılan tasarımın daha güvenli tarafta kaldığını ifade etmektedir.

Tablo 2. Betonarme eleman tasarım standartları ve deprem yönetmeliklerinde perde duvar tasarım koşulları

Gereklilik	TBDY 2018	ACI 318	Eurocode -8
Minimum Beton Dayanımı	C25/30	Minimum 2500 psi (17,24 MPa)	C20/25
Boyut Koşulu min l_w	$\geq 6 b_w$	$\geq 2.5 b_w$	$\geq 4 b_w$
Perdelerde Aksel Yük Sınırı	$A_c \geq \frac{N_{dm}}{0.35 f_{ck}}$	$\phi P_{n,max} \geq P_u$ $\geq 0.2 f'_c A_g$	$\frac{N_{ed,EC}}{f_{cd} A_c} \leq 0.35$
Genişlik koşulu min b_w	250 mm, $h_{kat}/16$	Min (101.6 mm (4inch); $h/25$)	200 mm, $h_s/15$
Max s_w ; max s_h	250 mm	Min ($l_w/5$, 3 <i>h</i> , 18 in (457 mm))	250 mm; 25. b_{wo}
Min ϕ_w ; min ϕ_h	8 mm	$\leq No. 5 (\phi 16)$	8 mm
Min ρ_v ; min ρ_h	0.0025; 0.0025	0.0012; 0.0020	0.002; 0.002
Min $\rho_{uç}$	0.002; 0.001 (H_{cr} dışı)	$6 \sqrt{\frac{f'_c}{f_y}}; M_u/3V_u$ (H_{cr} dışı)	0.005; 0.002 (H_{cr} dışı)
Min $A_{s,uç}$	4Ø14	$\leq No. 5 (\phi 16)$	Ø12
Min $l_{uç}$ (H_{cr} iç; dış)	Maks(0.21 <i>w</i> ; 2 <i>b_w</i>) / Maks(0.11 <i>w</i> ; <i>b_w</i>)	0.15. l_w	Maks(0.15 l_w ; 1.50 <i>b_w</i>)
Max $s_{uç}$ (H_{cr} iç; dış)	Min (150 mm; $b_w/2$) / min (200 mm; b_w)	152 mm	Min (100 mm; 8. d_{bi}) /
Perde Duvar Uç Bölge Koşulu	Oluşacak aşırı gerilmelere karşı uç bölgesinin sargılanması istenmektedir. Belli sargılama şekilleri detaylı paylaşılmıştır.	Oluşacak aşırı gerilmelere karşı uç bölgesinin sargılanması istenmektedir.	Oluşacak aşırı gerilmelere karşı uç bölgesinin sargılanması istenmektedir.

Mevcut Perde Davranışının Performansı Üzerine Yapılan Çalışmalar ve Gözlemler

Benjamin ve William (1957) tarafından H/L oranı 0,57 olan bodur perde numuneleri monotonik yükler altında yük deplasman grafikleri, dayanımları, göçme modları ve belirlenen değişkenlerin duvarın nasıl yüke tepki verdiğini incelemiştir [15]. Cardenas ve diğerleri (1972) tarafından H/L oranı 0.5 ve daha az olan yirmi bir perde numunesi test edilerek ACI tarafında da önerilen dayanım formülleri geliştirilmiştir [16]. Alexander vd. (1973) H/L<1.5 olan 5 adet perde duvar farklı yükseklik boy oranları ile farklı yatay yükler etkiyerek perde davranışı incelenmiştir. Farklı oranlardaki enerji yutma kapasiteleri ve süneklik düzeyleri karşılaştırılmıştır [17]. Hiroswa (1975) H/L oranları 1 ila 2.3 arasında değişen 49 numune monotonik ve çevrimsel yüke tabi tutularak deney sonu eğilme ve kesme göçme modları incelenmiş ancak süneklik açısından bilgi paylaşılmamıştır [18]. Barda vd. (1977) uç bölgesi oluşturulmuş 8 adet bodur betonarme perde duvar numunesi çevrimsel yükler altında test edilmiştir. Kesme göçme türünün hüküm olduğu deneylerde eğilme kapasitesinin artırılması

amaçlanmıştır. Deneylerde perde uç bölgesi boyuna ve enine donatılarının ve yükseklik uzunluk oranlarının etkileri ile onarım ve güçlendirme teknikleri incelenmiştir. Çalışmanın çıktıları ACI'da yer almış ve ilgili bölümüne temel teşkil etmiştir [19]. Paulay vd. (1982) çalışmasında bodur perde duvarların çevrimsel yükler altındaki etkisi incelemiş ve göçme türleri açıklanmıştır [20]. Oesterle vd. (1984) H/L oranı 2.4 olan yirmi adet farklı perde uç bölgesi donatı düzenine ve şekline sahip perde duvarlarda, perde uç bölgesinin donatı ile sargılanmasının perde duvarın dayanımına ve deplasman kapasitesine olumlu etki gösterdiği belirtilmiştir [21]. Pilakoutas and Elnashai (1995) H/L oranı 2 olan altı adet perde duvar çevrimsel yükler altında test edilmiş, perde uç bölgesi donatı oranı, sargılama ve etriye tevzi donatısı içeriği deney parametresi olarak kabul edilmiştir [22]. Salonikios vd. (1999) farklı donatı düzenine sahip bodur perde duvarlar Eurocode 8 ve ACI standartlarının deneysel olarak teyidinde yönelik incelenmiş, gövde ve uç donatısı düzeni ile eğilme hâkim göçme davranışı oluşabildiği belirtilmiştir [23]. Hidalgo (2002) gerçekleştirdiği çalışmasında ACI 318 tarafından önerilen düşey donatı oranının en az yatay donatı oranına eşit olması ile ilgili inceleme gerçekleştirmiş ve yatay donatıların süneklik davranışı üzerine katkı sağladığını, donatı oranlarının düşürülmesinin ise ciddi perde hasarlarına sebebiyet vereceğini belirtmiştir [24]. Massone ve Wallace (2004) narin perdelerin eğilme ve kesme davranışı üzerine çalışma gerçekleştiren, Shirai et al. (2007) H/L oranı 2.89 Japon standartlarına göre tasarlanan numune ile eğilme hâkim göçme gerçekleştirilmiş ve yeni standarda göre eğilme hâkim göçme olarak nitelendirilmiştir [25], [26]. Dazio et al. (2009) ve Beyer et al. (2011) çalışmaların narin perdelerin eğilme davranışı üzerine araştırma gerçekleştirmiş, sargılama etkisi ve narin perde de kesme davranışı incelenmiştir [27], [28]. Kuang and Ho (2008) tarafından standart detaylarına uygun olmayan bodur perde detaylandırılıp sünekliliğe etkisi incelenmiştir [29]. Orakçal ve diğerleri (2009) 1950 ve 1970'ler arasında inşa edilen az donatı oranına sahip narin perdeler üzerine araştırma gerçekleştirmiş ve sonuçların standarttaki hesaplamalar ile karşılaştırmıştır [30]. Abdullah ve Wallace (2019) deprem etkileri sonrası beton ezilmelerinin ve donatı burkulmalarının yüksek olduğu görece ince narin perde duvarların uç bölgelerinin ve perdenin yanal dengesizliğe karşı duyarlılığı üzerine literatürde bulunan binden fazla test çalışması incelenerek çeşitli parametrelerle deplasman kapasitesinin tespiti için çalışma gerçekleştirilmiştir. Geçmişten betonarme perde duvar tasarımının gelişimini sağlayan çalışmalardan sonra günümüze ulusal ve uluslararası binlerce deneysel, analitik ve perde modelleme üzerine çalışma yapıldığı görülmektedir [31].

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası sahada gözlenen Şekil 5 a'da perde uç bölgesinde ezilme ve Şekil 5 b'de ise perde duvarın uç kısmında eğilme kuvvetleri sonrası oluşan ezilme ve sonrasında betonun göçmesi ile duvar uzunluğu boyunca gövdede boyuna donatıların burkulmasıyla sonuçlanan perde hasarı oluşmuştur. İlginç bir şekilde boydan boya aynı

aralıklarda tevzi demir çatlakların nedeni tevzi demirinin sıyrılmaya çalıştığı görülmüştür. İki hasar tipinde de uygun perde uç bölgesinin oluşturulmadığı, etriye ve çirozların kancalarının 135°'lik açı yerine 90° olması, tevzi ve gövde donatılarının yönetmelikte belirtilene uygun olarak aralıkta, sayıda ve şekilde yerleştirilmediği, gözlemlenmiştir.



a)

b)

Şekil 5. a) Perde uç bölgesi hasarı b) perde uç bölgesinde beton ezilmesi, kırılması ile başlayıp perde boyunca boyuna donatıların burkulması

Şekil 6'da yönetmeliğe uygun olmayan tevzi donatısı, perde uç bölgesi betonun segregasyona uğramış boşluklu bir beton olması ve etriye detaylarını takip eden uygun olmayan beton yerleşimi ile hem basınç hem de kayma kuvvetleri etkili olmuştur. Tevzi demir donatı detayı ve beton yerleşimine dikkat edilmemesi nedeni ile hem basınç ezilmesi hem de kesme kuvveti aktarımı ile oluşan kayma hasar türlerine rastlanılmıştır. Betonarme sisteminde beton ile donatının beraber çalışması gerekirken, lokal boşluk kaldığı ve onarılmadığı için yapıya gelen bütün kesme kuvvetini demir tek başına karşılayamamıştır.



Şekil 6. Uygun olmayan perde tevzi, gövde donatısı detayı ve hatalı beton yerleşimi sonrası oluşan perde hasarı

Şekil 7'de deprem etkisi ile perde uç bölgesinde betonda ezilme mevcut, ezilme oluşma nedeni ise perde uç bölgesinin yönetmeliğe uygun olarak oluşturulmamış olumasıdır.



Şekil 7. Perde gövde kesme ve uç bölgesi ezilme hasarı

Şekil 8’de uygun olmayan perde yerleşimi sonrası yapı deprem etkisi ile yapıda 1. mod etkisi gözlemlenmiş ve yapı 1. mod da göçmüştür. Planda kırmızı çizgiler perde duvarları ifade ederken mavi çizgiler kolonları ifade etmektedir [1].



Şekil 8. Planda düzensiz perde yerleşimi nedeni ile oluşan hasar ve perde yerleşim planı [1].

Perde Duvarların Lifli Polimer ile Güçlendirilmesi Üzerine Literatürde Yapılan Çalışmalar

Yapıların ve perde duvarların deprem yükleri altındaki davranışı ile ilgili literatür incelendiğinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak konu özelinde perde duvarların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar ve literatür incelendiğinde ise Fiorato vd. (1983), Lefas ve Kotsovas (1990), Vecchio vd. (2002), perde duvarların ilk olarak eski kusurlu betonun kaldırılarak temizlenerek yerine yeni yerleştirilecek betonun, harcın, mevcut donatı ve eski beton ile sağlam bağlantısı yapılarak uygulanmıştır [32], [33], [34]. Sonrasında Fiorato vd. (1983), ve Corazao ve Durani (1989), Alcocer ve Jirsa (1991), beton mantolama uygulaması ile literatürde güçlendirme uygulamaları yapıldığı görülmüştür [32] [35] [36]. Miglacci vd. (1983), Estrada (1990), Alcocer ve

Jirsa (1991), Hoffschild vd. (1993), Biddah (1997), Elnashai ve Pinho (1997), Taghdi vd. (2000), Cho vd. (2004), yapının durumu, uygulama teknikleri ve işçilik faktörlerinin etkisi ile çelik parçaları kullanılarak güçlendirme uygulamaları ile ilgili çalışmalarda yapılmıştır [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42]. Zamanla gelişen yapı malzemesi teknolojisi ile yeni uygulamalar ve güçlendirme teknikleri üzerine çalışma yapıldığı, çalışmaların perde davranışına ve dayanımına göre farklı türlerde ve şekillerde önerildiği görülmektedir.

Son yıllarda uygulama ve kullanım kolaylığı sağlayan LP ile ilgili yapılan çalışmalar sonrası belirlenen esaslar yönetmelik ve standartlarda yer bulmuştur. Güncel TBDY 2018 yönetmeliğine LP ile güçlendirme esasları eklenmiş olsa da perde duvarların LP ile güçlendirilmesine ilişkin detay bulunmamaktadır [4]. Benzer şekilde Amerikan Beton Enstitüsü LP Tasarım ve Yapım Yönetmeliğinde (ACI 440.2R-08) LP ile güçlendirme için belirtilen hükümlerin en boy oranı 2.0’den büyük olan ve boyutları 900 mm’yi aşan elemanlar için, yapılacak testler ile etkinliği gösterilmediği sürece önerilmediği belirtilmektedir [43].

Literatürde perde duvarların LP ile güçlendirilmesine yönelik yapılan ilk çalışmalardan biri, Ehsani vd. (1997) yaşanan deprem sonrası betonarme bir binanın cam lifli polimer (GFRP) ile güçlendirilmesi çalışmasıdır [44]. Güçlendirmenin etkinliğinin perde duvarın birim genişliğinin moment kapasitesinin %74’e yükselmesini sağladığı ve güçlendirilmeyen perdenin kapasitenin %13 civarında olduğu gözlemlenmiştir [44]. Pantelides vd. (1999), köprü ayak ve kirişleri ile birleşim bölgelerini LP ile güçlendirmişler ve birleşim bölgesi kesme kapasitesi %30 arttığı gözlemlenmiştir [45]. Volnyy ve Pantelides (1999) çevrimsel yükler altında güçlendirilen numunelerde güçlendirme malzemesinin beton yüzeyi ile olan temasının da parametreler arasında değerlendirildiği ve deneyler sonrası numunelerde karbon LP (CFRP) düşük bir değerde çalıştığı ve beton yüzeyden ayrıldığı ve perdede kesme göçmesi gözlemlenmiştir [46].

Lombard vd. (2000) basınç dayanımı 40 MPa olan bodur biri orijinal, biri onarılmış ve ikisi güçlendirilmiş olmak üzere dört adet perde duvar çevrimsel yükler altında deneysel ve analitik olarak incelendiği çalışma sonrası karbon LP ile güçlendirmenin hasar sonucu kaybedilen elastik dayanımı kazanmak için, akma dayanımı ile eğilme kapasitesini arttırmak ve hasarsız duvarları güçlendirilerek dayanımını arttırmak için kullanılabilir olduğu belirtilmiştir [47]. Sheikh vd. (2002) yaptığı çalışmada orijinal ve hasarlı olup onarılan perde numuneleri karbon ve cam LP ile güçlendirdikten sonra güçlendirmenin eğilme ve kesme kapasitesine etkileri incelenmiş, farklı polimerlerin özelliklerinin güçlendirmeye etkileri karşılaştırılmıştır [48]. Ghobarah ve Khalil (2004) perde duvarların kesme ve süneklik davranışlarının muhtemel rehabilitesi için 38 MPa dayanıma sahip bodur perde numunelerini deneysel çalışma ile incelemiştir. Numunelerde güçlendirme karbon LP ile perdenin tamamı iki kat ve perde uç bölgesi iki kat polimer ankrajlanarak gerçekleştirilmiştir. Güçlendirilen numunelerin orijinal numunelere göre

ortalama %50 daha fazla yük taşıdığı ve %60 daha fazla yatay deplasman yaptığı görülmüştür [49]. Antoniadou vd. (2005) beton basınç dayanımı ortalama 27 MPa olan altı adet perde duvar numunesi LP bantları için kullanılan özel tip ankrajların eğilme kapasitesi artışına etkisini incelemek üzere deneye tabi tutulmuştur. Hasarlı perdelerin onarımı ve güçlendirilmesini takip eden deneyler sonrası güçlendirilmiş perde numunelerin eğilme kapasitelerinin %5 ila %48 oranında arttığı gözlemlenmiştir [50]. Antoniadou vd. (2007) Beton dayanımı 25 MPa olan 11 adet bodur perde duvar numunesi ilk önce göçme durumuna kadar test edildikten sonra onarılıp, güçlendirilip tekrar teste tabi tutularak davranışları incelenmiştir. LP ile güçlendirme işlemleri sonrası tekrar test edilen numunelerin deplasman kapasitelerinin, orijinal numunelere oranla %25 daha düşük olduğu ancak güçlendirilmesinin duvarlarda olumsuzlukların gelişmesini engellemede etkili olduğu görülmüştür [51]. Naderpour vd. (2008) analitik çalışmada perde duvarın plastik mafsallı oluşması beklenen bölgede uygulanan karbon LP güçlendirme ile sadece kesme dayanımını değil sargılama etkisi ile süneklik artışıyla çatlak dayanımı %35, eğilme kapasitesi %20'ye kadar modelde görülmüştür [52]. Li ve Lim (2010) dört adet beton basınç dayanımı 40 MPa olan bodur perde duvar numunesinin ilk önce göçme anına kadar test edilip sonra onarılıp LP ile güçlendirilerek tekrar göçme anına kadar test edilmiş ve duvar performansının geri kazanıldığı belirtilmiştir [53]. Mostofinejad ve Anaei (2012) beton dayanımı 31.6 ve 49 MPa olan perde duvarların plastik mafsallı bölgelerinin LP sargılanarak eğilme kapasitesi üzerindeki davranışının incelendiği ve FRP ile güçlendirilmesinin, duvarın sünekliğini ve deplasman kapasitesini %50 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir [54]. El-Sokkary ve Galal (2012) beton dayanımı 37 ve 45 MPa olan orijinal ve LP ile güçlendirilmiş iki adet perde duvarın sabit eksenel yük altında yatay çevrimsel yüke tabi tutularak eğilme ve kesme kapasitelerinin etkinliğini gözlemlenmek için göçme anına kadar deneye tabi tutulmuş ve deney sonunda güçlendirilmiş numunenin eğilme kapasitesinde %80'lik bir artış oluşurken, sünekliğinde bir azalma olduğu gözlemlenmiştir [55]. Dan (2012) tarafından yapılan çalışmada H/L oranı 3 ve beton sınıfı C20/25 olan iki adet demir profiller ile kaplı betonarme perde duvar göçme öncesi duruma kadar test edildikten sonra karbon LP ile güçlendirilerek tekrar teste tabi tutulmuş, hasar sonucu dayanımı düşen perde duvarların kısmi sargılama etkisini ve eğilme kapasitesini arttırmaya yönelik bir uygulama olması amaçlanmıştır. Deney sonucunda onarılıp güçlendirilen numunelerin yük taşıma kapasitelerinin, orijinal hasarsız numune ile benzerlik taşırken, dayanım ve enerji yutma kapasitelerinde ise hafif bir düşüş olduğu tespit edilmiştir [56]. Altın vd. (2012) beton dayanımı 15,5 MPa olan biri orijinal, diğer dördü karbon LP şeritleri ile farklı düzenlerde güçlendirilen toplamda beş adet bodur perde duvar numunesi deneye tabi tutulmuş, güçlendirme şekillerinin perde duvarın yanıl dayanımı, enerji yutma kapasitesini ve deplasman kapasitesini arttırdığı gözlemlenmiştir [57]. Lau ve Cruz-Noguez (2013) çalışmada ana amaç ise yeni tüp ankraj sisteminin LP ile güçlendirilmiş numunelerdeki

performans değerlerinin arttırmaya etkisi incelenmiş ve deneylerde yeni tüp ankraj sisteminin LP'nin beton yüzeyinden erken ayrılma etkilerini, demir sıyrılmaya hatalarını düşürdüğünü ve sünekliğini artırarak ani diyagonal kesme etkilerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir [58]. Shaheen vd. (2013) düzensiz etriye, zayıf sargılama ve plastik mafsallı bölgesinde yetersiz bindirme boyuna sahip beton dayanımı 20 MPa olan dokuz adet bodur perde numune göçme anına kadar test edilmiş, sonra onarılarak ve belirlenen düzenlerde LP ile güçlendirilerek tekrar göçme anına kadar teste tabi tutulmuştur. Deney sonunda LP'nin gevrek kesme göçmesini elimine etmede etkili olduğu gözlemlenmiştir [59]. Nguyen vd. (2014) beton dayanımı 34,65 MPa bodur ve narin perde duvar, orijinal ve güçlendirilerek hem analitik olarak hem de deneysel olarak incelenmiş ve güçlendirilmesinin çatlak gelişimine ve göçmeye neden olacak kesme etkilerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir [60]. Qazi vd. (2015) beton dayanımı 40,6 MPa olan iki adet bodur perde numunesi orijinal ve kesme etkilerine karşı güçlendirilmiş olarak hazırlandığı, deneye tabi tutulduğu güçlendirme yöntemi ile perde numunesinin dayanım ve deplasman kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir [61]. Zhang vd. (2015) beton dayanımı 40 MPa olan dört adet perde numunesi (iki tane L şeklinde ve iki tane T şeklinde) test edilmiştir. Hasar gören numuneler onarılıp LP ile güçlendirildikten sonra tekrar teste tabi tutulmuş ve deney sonrası orijinal numunelerin mukavemet ve dayanımının çoğunun onarım ve güçlendirme işlemi ile geri kazanıldığı ancak onarılan numunelerin, orijinal numunelere göre sünekliğinin azaldığı gözlemlenmiştir [62]. Shen vd. (2017) beton dayanımı 31 MPa olan 6 adet bodur perde duvar numunesinden biri güçlendirilmeden diğerleri ise farklı şekillerde bazalt LP şeritler ile güçlendirilerek deneye tabi tutulmuş, deneyler sonucunda güçlendirilen numunelerin dayanımlarında ve enerji yutma kapasitelerinde artış olduğu tespit edilmiştir [63]. Qazi vd. (2019) beton dayanımı 35 MPa olan üç adet bodur perdeden ikisi farklı karbon LP konfigürasyonları uygulanarak güçlendirildiği çalışmada, güçlendirilen numunelerin orijinal numuneye göre kesme dayanımı ve deplasman kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir [64]. Shen vd. (2019) beton dayanımı 31 MPa olan 7 adet bodur betonarme perde duvarlardan biri orijinal, üç adedi belli oranda korozyona uğramış ve diğer üç adedi ise korozyona uğradıktan sonra bazalt LP ile onarılmış, sabit eksenel yük altında çevrimsel yatay yükler ile göçme anına kadar deneye tabi tutulmuştur. Bazalt LP ile güçlendirilen korozyonlu numunelerin sismik dayanıma katkı sağlayıp, perde dayanımını iyileştirdiği gözlemlenmiştir [65]. El-Kashif vd. (2019) eski standartlara göre tasarlanan beton küp dayanımları 42,1 ve 52,3 MPa olan perde duvarların LP ile güçlendirilmesinin etkileri sonlu eleman analizi modelleri oluşturularak incelenmiştir. Analitik çalışmalar, LP ile gerçekleştirilen sargılamanın gevrek kesme göçmesini engellemede etkili olduğu gözlemlenmiştir [66], [67], [68].

Araştırma Bulguları

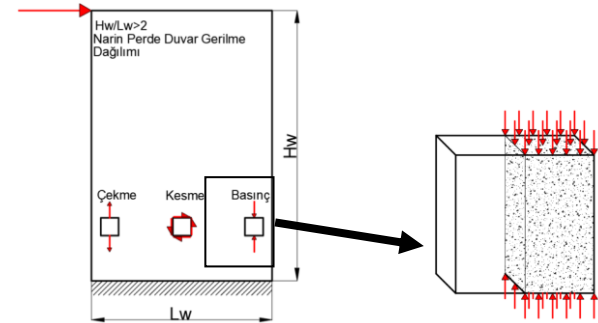
Ülkemizde TÜİK verilerine göre hanehalkının ikamet ettikleri binaların inşa yılı incelendiğinde ve yapım tarihi bilinmeyen yapılarda eklendiğinde hanehalkının %53,6'sı 2001 yılı öncesinde inşa edilen yapılarda ikamet etmektedir. Yapı denetimi ve hazır beton kullanımında 2001 yılı öncesi zorunluluk hali olmaması, yönetmeliklere uygun olmayan yapı stoğu hakkında fikir vermektedir. Bu yapıların hepsinin dönüştürülmesinin veya mevcut yönetmeliklere uygun hale getirilmesinin ne kadar zorunlu olduğu görülmektedir. Son yaşanan 6 Şubat Kahramanmaraş Pazarcık-Elbistan depremleri sonrası saha çalışmaları perde duvarlarda; uç bölgelerinin oluşturulmadığı, etriye kancalarının uygun şekilde ve aralıkta düzenlenmediği, beton dayanımının düşük kaldığı, yeterli sargılama olmaması nedeni ile betonun ezilerek boyuna donatıların burkulduğu, perde duvar üstü döşeme altı birleşim bölgesinde betonun düzenli yerleştirilmediği veya betonun segregasyona uğradığı, tevzi demir donatı yerleşimine de dikkat edilmemesi ile birleşim bölgesinde hem basınç ezilmesi hem de kesme kuvveti aktarımı ile oluşan kayma hasarlarının olduğu gözlenmiştir. Mevcut yapı stoğu düşünüldüğünde çoğu yapının beton dayanım değerinin TBDY 2018 tarafında istenen minimum C25 koşulunu sağlamadığı, gözlenmiştir.

Yönetmelik ve standartlarda perde duvarların LP ile güçlendirilmesine yönelik hükümler incelenmiştir. TBDY 2018'de LP ile yapının güçlendirilmesi ile ilgili bölümde perde duvarlara uygulanmasına yönelik kesin hükümler bulunmamaktadır. ACI 318'de minimum perde boyutunun 2,5bw olduğu, Amerikan Beton Enstitüsü LP Tasarım ve Yapım Yönetmeliğinde (ACI 440.2R-08) taşıyıcı elemanların LP ile güçlendirme yapılabilmesi için en boy oranı 2.0'den büyük olan ve boyutları 900 mm'yi aşan elemanlar için, yapılacak testler ile etkinliği gösterilmediği sürece önerilmediği belirtilmektedir. Yani Amerikan standartları da perde duvarların LP ile güçlendirilmesi ile ilgili kesin hükümler içermemektedir [4], [43].

Literatür, deneysel ve kuramsal çalışmalar incelendiğinde Ehsani vd. (1997), Pantelides vd. (1999), Volny ve Pantelides (1999), bodur perdenin göçme davranışı LP'in yapının ve perde duvarın tamamına uygulanarak güçlendirme ile kesme davranışı iyileştirilmiştir. Sheikh vd. (2002) bazalt ve karbon LP kullanarak bunların perde duvarın eğilme ve kesme kapasitene etkisini incelenmiştir. Eğilme davranışının iyileştirilmesine yönelik yapılan güçlendirmede perde duvarda kesme göçmesi görülmüştür. Antoniadis vd. (2005,2007), Shaheen vd. (2013) çalışmalarında çoğunlukla bodur perde duvar numuneleri test edilip, onarılıp, güçlendirip tekrar teste tabi tutularak, perde duvarda özellikle eğilme kapasitesi ve kesme kapasitesi artışı sağlanmıştır. Mostofiejad ve Anaci (2012) perde duvar plastik mafsallı bölgesini güçlendirerek deneye tabi tutmuş ve eğilme kapasitesinde artış gözlenmiştir. Ankrāj kullanılmadığı için sargılanan LP katmanı arttığı halde etkinliklerinin az seviyelerde olduğu gözlenmiştir. Dan (2012) çelik profiller içeren narin perde duvar deney

sonrası onarılıp, şerit LP ile güçlendirilerek incelenmiş ve taşıma kapasitesi aynı değerde iken, dayanım ve süneklikte düşüş gözlenmiştir. Altın vd. (2012) düşük dayanımlı bodur perde duvar farklı LP şerit şekilleri ile tam sargılanarak ve ankrājlanarak deneye tabi tutulmuş ve güçlendirilmiş perde duvarın deplasman ve enerji yutma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. Qazi vd. (2015), Shen vd. (2017), Qazi vd. (2019), Shen vd. (2019) bodur perde, Nguyen vd. (2014) ise narin ve bodur perdeler şerit LP ile ankrāj uygulanarak kesme etkilerine karşı güçlendirilmiş, dayanım ve deplasman kapasitesi artışı gözlenmiştir [44]- [66]. Bedirhanoglu (2022) aşırı düşük kısa kolonların güçlendirme sonrası davranışını incelemiş ve kesme etkilerini iyileştirmek için yapılan LP sargılanmanın, betonun basınç dayanımını da arttırdığını belirtmiştir [69].

Literatürde LP ile sadece perde uç bölgesinin farklı ankrāj şekil ve detayları ile güçlendirilmesinin perde davranışına etkileri üzerine araştırma yapılmamıştır. Şekil 9'da görüleceği üzere narin perdelerin uç bölgelerinde eksenel basınç ve çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Perde uç bölgelerine yapılacak ankrājlı sargılama perde duvarın eğilme davranışını iyileştirecek ve sargılanmanın etkisi ile uç bölgede dayanım artışı ile perde kesme güvenli hale de gelmiş olacaktır. Sadece perde uç bölgesinde yapılacak sargılama ile hem maliyet hem uygulama kolaylığı sağlayacaktır. Buna ek olarak literatürde karşılaşılmayan Şekil 9'da gösterildiği gibi perde uç bölgesinin küçük modeli oluşturularak narin perdelerde uç bölgesinin davranışı bu modeller üzerinden incelenebilir. Model üzerinden LP sargılanmanın etkileri de deneyler ile tespit edilebilir.



Şekil 9. Narin perdelerde oluşan gerilme görünümü

Literatürde yapılan çalışmaların çoğu yüksek dayanımlı beton ile gerçekleştirilmiştir. Mevcut yapı stoğu durumunu yansıtmaması için düşük dayanımlı betona sahip perde duvarların LP ile güçlendirilmesine yönelik az sayıda yapılan çalışmaların artırılması gerekmektedir. Deprem sonrası karşılaşılan hasarlarda ve literatürde tevzi demir düzeni, şekillerinin perde davranışına nasıl bir etki göstereceği ve davranışın güçlendirme detaylar üzerine çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir. Bununla birlikte perde duvarların yapı için ne kadar hayati öneme sahip olduğu ve mevcut binalarımızın deprem afetine karşı güçlendirilmesinde etkin bir şekilde kullanılabilen detaylar geliştirilmesi gerektiği görülmüştür.

Sonuçlar

Bu çalışmada mevcut perdeler ile kusurlu davranış gösteren perde duvarlar üzerine yapılan çalışmalar incelenip kıyas edilmiştir. Depremde gözlenen hasarlar irdelenmiş, kusurlu perdelerin LP ile güçlendirilmesine yönelik literatür çalışmaları incelenerek kısa özeti sunulmuştur. Literatürde LP ile güçlendirmenin pratik ve etkili olduğunu göstermektedir. Çalışmalarda LP perde duvarın tamamına bez veya şerit şeklinde ankrajlı veya ankrajsız uygulanarak perdenin kesme, eğilme, kesme ve eğilme birlikte görülen göçme türlerinin iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Ankrajlı kullanımın, ankrajsız kullanıma göre daha etkin olduğu gözlenmiştir. Hasar almış perde duvarlarda ise kaybedilen dayanım ve deplasman kapasitesinin geri kazanımı için uygulanmıştır. Bununla birlikte LP uygulaması perde duvarın, süneklilik, dayanım, deplasman kapasitesini de iyileştirdiği çalışmalarda gözlenmiştir. Bu sebeple LP'nin taşıyıcı elemanın hasar almasını sınırlandırdığı ve hasarlı elemanın ise hasar öncesi duruma getirme de kullanılabilceği görülmektedir. Ancak literatürde perde duvarların sadece uç bölgelerinin farklı ankraj düzenleri ile sargılanmasının perde davranışına etkisi incelenmemiştir. Uç bölgesi sargılanarak düşük dayanımlı betonarme perde duvarda basınç etkisi ile dayanım artışı gözlenebilir. İncelenen perde numunelerinin beton dayanımları genellikle 25 MPa'dan daha büyük betonlar kullanılmıştır. Literatürdeki bu hususun değerlendirilerek düşük dayanımlı perde duvarların güçlendirilmesine yönelik çalışma yapılması gerekmektedir. Sahada ve literatürde donatı detayları ve parametreleri incelenmiş ve TBDY 2018'e uygun olarak düzenlenmediği gözlenmiştir.

Depremde gözlenen hasarlar ve LP üzerine yapılan literatür çalışmaları sonrası aşağıdaki hususlar tespit edilmiş olup bu konular üzerine öneriler paylaşılmıştır.

- 1- Literatürde 25 MPa'dan daha yüksek beton dayanımına sahip perde numunelerinin incelendiği gözlenmiştir. Daha düşük dayanımlı beton sınıfları ile araştırma yapılması önerilmektedir.
- 2- Literatürde narin perdelerde, perde uç bölgesinin LP ile farklı ankraj kombinasyonları uygulanarak etkilerinin incelenmesine yönelik çalışma yapılmadığı gözlenmiştir. Perde uç bölgesi boyunca farklı ankraj detayları tasarlanarak deneysel olarak incelenmesi önerilmektedir.
- 3- Perde üstü, döşeme altı bölgede betonun hatalı ve uygun yerleşiminin sağlanmaması nedeni ile perdelerde kesme ezilme hasarlarının oluştuğu gözlenmiştir. Hasar türünün incelenmesi önerilmektedir.
- 4- Donatı detaylarının yönetmeliğe uygun şekilde düzenlenmemesi nedeni ile perdelerin tevzi demir eksikliği, düzensizliği nedeni ile etkinliği zayıflamış perde duvarlarda oluşacak hasarların LP ile güçlendirilmesine yönelik detayların geliştirilmesi önerilmektedir.

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

Efe: Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması, Revizyon.

Bedirhanoglu: Çalışma konsepti ve tasarım, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması.

Kaynakça

- [1] S. Pujol, . I. Bedirhanoglu, C. Donmez, J. D. Dowgala, M. Eryilmaz-Yildirim, K. Klaboe, F. B. Koroglu, B. Ozturk, L. Pledger ve E. Sonmez, "Quantitative evaluation of the damage to RC buildings caused by the 2023 southeast Turkey earthquake sequence," *EERI Earthquake Spectra*, pp. 1–26, 2024, DOI: 10.1177/8755293023.
- [2] T. Shiga, A. Shibata ve T. Takahashi, "Earthquake Damage and Wall Index of Reinforced," *Tohoku District Symposium*, no. No. 12, pp. 29–32 (in Japanese), Dec. 1968.
- [3] S. Cansız, "Türkiye'de Kullanılan Deprem Yönetmeliklerinin Özellikleri ve Eşdeğer Yatay Deprem Yüğü Hesabının Değişimi," pp. 58-71, Ocak 2022.
- [4] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, Ankara: Çevre Şehircilik Bakanlığı, 2018.
- [5] TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, 2000.
- [6] N. Kumbasar ve Z. Celep, Betonarme Yapılar, İstanbul: Sema Matbaacılık, 1998.
- [7] K. Darılmaz, Betonarme, İstanbul: Birsan Yayınevi, 2022.
- [8] ASCE 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE, 2017.
- [9] FEMA 306 Evaluation Of Earthquake Damaged Concrete And Masonry Wall Buildings Basic Procedures Manual, FEMA 1998.
- [10] Chilean Standard NCh433.Of96: Seismic Design of Buildings, Chile, 1996.
- [11] ACI 318-19 Building Code Requirements, American Concrete Institute (ACI), 2019.
- [12] ASCE 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2022.
- [13] Comparison of U.S. and Chilean Building Code Requirements and Seismic Design Practice 1985–2010, National Institute of Standards and Technology NIST), 2012.

- [14] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings, European Standard, 2004.
- [15] J. R. Benjamin ve H. A. Williams, "The Behavior of One-Story Reinforced Concrete, Journal of the Structural Division," *ASCE*, May 1957, pp. pp. 1-49.
- [16] A. E. Cardenas, J. M. Hanson, W. G. Corley ve E. Hognestad, "Design Provisions for Shear Walls," *Journal of the American Concrete Institute*, Feb 1972.
- [17] C. M. Alexander, A. C. Heidebrecht ve W. K. Tso, "Cyclic load tests on shear wall panels," *Rome: Proceedings, fifth world conference on earthquake engineering*, 1973, pp. 1116-1119.
- [18] M. Hiroswa, "Past Experimental Results on Reinforced Concrete Shear Walls and Analysis on Them," *In Kenchiku Kenkyu Shiryo: Building Research Institute, Ministry of Construction. (In Japanese).*, 1975, p. No. 6 (p. 277).
- [19] F. Barda, J. Hanson ve W. G. Corley, "Shear strength of low-rise walls with boundary elements," *Special Publication*, pp. 53, 149-202..
- [20] T. Paulay, M. J. N. Priestley ve A. J. Syngé, "Ductility in earthquake resisting squat shear walls," *ACI Journal Proceedings*, July 1982, pp. Vol. 79, No. 4, pp. 257-269.
- [21] R. G. Oesterle, J. D. Aristizabal-Ochoa, K. N. Shiu, W. G. Corley ve O. A., "Web Crushing of Reinforced Concrete Structural Walls," *ACI Journal Proceedings*, 1984, p. 81(3).
- [22] K. Pilakoutas ve A. Elnashai, "Cyclic behavior of reinforced concrete cantilever walls I: Experimental results," *ACI Structural Journal*, pp. 92(3), 271-281.
- [23] T. N. Salonikios, A. J. Kappos, I. A. Tegos ve G. G. Penelis, "Cyclic load behavior of low-slenderness reinforced concrete walls: Design basis and test results," *ACI Structural Journal*, 96(4), pp. 649-660.
- [24] P. A. Hidalgo, R. M. Jordan ve M. P. Martinez, "An analytical model to predict the inelastic seismic behavior of shear-wall, reinforced concrete structures," *Engineering Structures*, 2002, pp. 24(1), 85-98.
- [25] L. M. Massone ve J. W. Wallace, "Load-deformation responses of slender reinforced concrete walls," *ACI Structural Journal-American Concrete Institute*, 2004, pp. 101(1), 103-113.
- [26] K. Shirai, T. Matsumori ve T. Kabeyasawa, "3-D Dynamic Collapse Test of a Six-Story Full-Scale RC Wall-Frame Building," *Structural Engineering Research Frontiers*, pp. 1-10.
- [27] A. Dazio, K. Beyer ve H. Bachmann, "Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls," *Engineering Structures*, 2009, 31(7), pp. 1556-1571.
- [28] K. Beyer, A. Dazio ve M. J. Nigel Priestley, "Shear deformations of slender reinforced concrete walls under seismic loading," *ACI Structural Journal*, 108(108), pp.167-177.
- [29] J. S. Kuang ve Y. B. Ho, "Seismic Behavior and Ductility of Squat Reinforced Concrete Shear Walls with Nonseismic Detailing," *ACI Structural Journal*, pp. 105(2), 225-231.
- [30] K. Orakçıl, L. M. Massone, and J. W. Wallace ve J. W. Wallace, "Shear Strength of Lightly Reinforced Wall Piers and Spandrels," *ACI Structural Journal*, August 2009, pp. 455-465.
- [31] S. A. Abdullah ve J. W. Wallace, "Drift Capacity of Reinforced Concrete Structural Walls with Special Boundary Elements," *ACI Structural Journal*, Jan 2019, V. 116, No. 1 pp. 183-194.
- [32] A. Fiorato, R. Oesterle ve W. Corley, "Behavior of Earthquake Resistant Structural Walls before and after Repair," *ACI Journal*, 80(5), pp. 403-413, 1983.
- [33] I. Lefas ve M. Kotsovos, "Strength and Deformation Characteristics of Reinforced Concrete Walls under Load Reversal," *ACI Structural Journal*, 87(6), pp. 716- 726, 1990.
- [34] F. Vecchio, O. Haro de la Pena, Bucci, F. ve D. Palermo, "Behavior of Repaired Cyclically Loaded Shear Walls," *ACI Structural Journal*, 99(3), pp. 27-334., 2002.
- [35] M. Corazao ve A. J. Durrani, "Repair and strengthening of beam-to-column connections subjected to earthquake loading.," *National Center for Earthquake Engineering Research*, State University of New York at Buffalo, New York, 1989.
- [36] S. M. Alcocer ve J. O. Jirsa, "Reinforced concrete frame connections rehabilitated by jacketing," *Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory*, the University of Texas at Austin, 1991.
- [37] A. Migliacci, R. Antonucci, N. A. Maio, P. Napoli, A. S. Ferretti ve G. Via, "Repair techniques of reinforced concrete beam-column joints," *Final report, IABSE Symposium on Strengthening of Building Structures-diagnosis and therapy* pp. 355-362, 1983.
- [38] A. Elnashai ve R. Pinho, "Repair and Retrofitting of RC Walls using Selective Techniques," *Journal of Earthquake Engineering*, 2:4, pp. 525-568.
- [39] S. Cho, B. Tubber, W. Cook ve D. Mitchell, "Structural Steel Boundary Elements for Ductile Concrete Walls," *Journal of Structural Engineering*, 130:5, pp.762-768.
- [40] J. I. Estrada, "Use of steel elements to strengthen a reinforced concrete building." *University of Texas at Austin*, M.Sc. thesis, p. 66 pages, 1990.
- [41] T. E. Hoffschild, H. G. L. Prion ve S. Cherry, "Seismic retrofit of beam-to-column joints with grouted steel tubes," *Proceedings of the Tom Paulay Symposium on Recent Developments in*

- Lateral Force Transfer in Buildings, University of California, San Diego, La Jolla, CA*, pp. 403-431, 1993.
- [42] A. M. S. Biddah, A. Ghobarah ve T. S. Aziz, "Upgrading of no ductile reinforced concrete frame connections," *ASCE, Journal of Structural Eng.*, Vol. 123, No. 8, pp. 1001-1010, 1997.
- [43] ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute (ACI) , 2008.
- [44] M. Ehsani ve H. Saadatmanesh, "Fiber composites: An economical alternative for retrofitting earthquake-damaged precast-concrete walls," *Earthquake Spectra*, 1997, 13(2), pp. 225-241.
- [45] C. P. Pantelides, J. Gergely ve D. R. Lawrence, "Retrofit of RC Bridge Pier with CFRP Advanced Composites," *Journal of Structural Engineering*, Volume 125, Issue 10, 1999.
- [46] V. A. Volnyy ve C. P. Pantelides, "Bond Length of CFRP Composites Attached to Precast Concrete Walls," *Journal of Composites for Construction*, Volume 3, Issue 4, 1999.
- [47] J. Lombard, D. T. Lau, J. L. Humar ve S. Foo, "Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls," *New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Paper No. 2032, 2000.
- [48] S. A. Sheikh, D. DeRose ve J. Mardukhi, "Retrofitting of Concrete Structures for Shear and Flexure with Fiber-Reinforced Polymers," *ACI Structural Journal*, 99(4), pp. 451-459, 2002.
- [49] A. Ghobarah ve A. A. Khalil, "Seismic Rehabilitation Of Reinforced Concrete Walls Using Fibre Composites," *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 3316, 2004.
- [50] K. K. Antoniadis, T. N. Salonikios ve A. J. Kappos, "Tests on Seismically Damaged Reinforced Concrete Walls Repaired and Strengthened Using Fiber-Reinforced Polymers," *Journal Of Composites For Construction*, 9:3, pp. 236-246, 2005.
- [51] K. K. Antoniadis, T. N. Salonikios ve A. J. Kappos, "Evaluation of hysteretic response and strength of repaired R/C walls strengthened with FRPs," *Engineering Structures*, 29, pp. 2158-2171, 2007.
- [52] H. Naderpour, A. Kheyroddin ve S. R. H. Vaez, "Nonlinear behavior of RC shear walls externally bonded with FRP sheets," *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, 2008.
- [53] B. Li ve C. L. Lim, "Tests on Seismically Damaged Reinforced Concrete Structural Walls Repaired Using Fiber-Reinforced Polymers," *Journal of Composites for Construction*, 14(5), pp. 597-608, 2010.
- [54] M. Davood ve M. M. Anaei, "Effect of confining of boundary elements of slender RC shear wall by FRP composites and stirrups," *Engineering Structures*, pp. 1-13, 2012.
- [55] H. El-Sokkary ve K. Galal, "Cyclic Tests on FRP-Retrofitted RC Shear Wall Panels," *15 WCEE Lisboa*, 2012.
- [56] D. Dan, "Experimental tests on seismically damaged composite steel concrete walls retrofitted with CFRP composites," *Engineering Structures*, 45, pp. 338-348, 2012.
- [57] S. Altin, Ö. Anil, Y. Koprman ve M. E. Kara, "Hysteretic behavior of RC shear walls strengthened with CFRP strips," *Composites: Part B*, 44, pp. 321-329, 2012.
- [58] D. T. Lau ve C. A. Cruz-Noguez, "Developments on Seismic Retrofit of RC Shear Walls with FRP," *5th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, 2013.
- [59] I. K. Shaheen, C. A. Cruz-Noguez ve D. T. Lau, "Seismic Retrofit of R.C. Shear Walls with Externally Bonded FRP Tow Sheets," *3rd Specialty Conference on Disaster Prevention and Mitigation*, 2013.
- [60] K. L. Nguyen, M. Brun, A. Limam ve E. Ferrier, "Pushover experiment and numerical analyses on CFRP-retrofit concrete shear walls with different aspect ratios," *Composite Structures*, 113, pp. 403-418, 2014.
- [61] S. Qazi, L. Michel ve E. Ferrier, "Impact of CFRP partial bonding on the behaviour of short reinforced concrete wall under monotonic lateral loading," *Composite Structures*, 128, pp. 251-259, 2015.
- [62] Z. Zhang, B. Li ve K. Qian, "Experimental Investigations on Seismically Damaged Nonrectangular Reinforced-Concrete Structural Nonrectangular Reinforced-Concrete Structural," *Journal of Composites for Construction ASCE*, 04015033-1-14, 2015.
- [63] D. Shen, Q. Yang, Y. Jiao, Z. Cui ve J. Zhang, "Experimental investigations on reinforced concrete shear walls strengthened with basalt fiber-reinforced polymers under cyclic load," *Construction and Building Materials*, 136, pp. 217-229, 2017.
- [64] S. Qazi, L. Michel ve E. Ferrier, "Seismic behaviour of RC short shear wall strengthened with externally bonded CFRP strips," *Composite Structures*, 211, pp. 390-400, 2019.
- [65] D. Shen, Q. Yang, C. Huang, Z. Cui ve J. Zhang, "Tests on seismic performance of corroded reinforced concrete shear walls repaired with basalt fiber-reinforced polymers," *Construction and Building Materials*, 209, pp. 508-521, 2019.
- [66] K. F. O. El-Kashif, A. K. Adly ve H. A. Abdalla, "Finite element modeling of RC shear walls strengthened with CFRP subjected to cyclic loading," *Alexandria Engineering Journal*, 58, pp. 189-205, 2019.

- [67] P. Ezzatfar, "Concrete Structural Walls Using Quasi-Static Reversed Cyclic Loading Protocol," *The Degree of Doctorate of Philosophy In Civil Engineering Middle East Technical University*, 2016.
- [68] T. Terziođlu, "Experimental Evaluation of The Lateral Load Behavior of Squat Structural Walls," *Master of Science Graduate Program in Civil Engineering Boğaziçi University*, 2011.
- [69] I. Bedirhanoglu, A. Ilki ve T. C. Triantafillou, "Seismic Behavior of Repaired and Externally FRP-Jacketed Short Columns Built with Extremely Low-Strength Concrete," *ASCE, Journal of Composites for Construction*, pp. 04021068-1-20, 2022.



Araştırma Makalesi / Research Article

Yığma Kemerli Bir Köprü'nün Yapay Deprem Kayıtları Altında Sismik Analizi

Seismic Analysis of a Masonry Arch Bridge under Artificial Earthquake Records

Esra ADSIZ¹, Erkut SAYIN^{2*}, Alper ÖZMEN³¹Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, esraadsiz94@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6781-7056>²Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, esayin@firat.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-759X>³İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, alper.ozmen@inonu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1335-3780>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Mart 2024
Revizyon 13 Eylül 2024
Kabul 23 Eylül 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Sonlu elemanlar metodu, Tarihi yığma köprüler, Yapay deprem kayıtları, Zaman tanım alanında analiz

Türkiye' de yer alan tarihi yığma köprüler, ülkemizin zengin kültürel mirasının önemli bir parçasını oluşturur. Bu köprüler, derin vadileri, bataklıkları ve büyük sulak alanları aşmak için inşa edilmiştir. Türkiye, tarih boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yaptığı için eski medeniyetlerden kalma ve günümüze ulaşan birçok tarihi köprüye sahiptir. Bu tarihi köprülerin gelecek nesillere güvenle aktarılabilmesi için deprem durumunda nasıl tepki vereceklerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yapay deprem ivme kayıtları kullanılarak, 1779 yılında inşa edilmiş olan Malatya ili Darende ilçesinde bulunan Osmanlı dönemine ait üç açıklıklı tarihi Uzunok Köprüsü incelenmiştir. Köprü, SAP2000 sonlu eleman programı kullanılarak üç boyutlu olarak makro modelleme yöntemiyle modellenmiştir. Köprü'nün deprem kuvvetleri altında tepkilerini belirlemek amacıyla, 11 adet yapay deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Analizler sonucunda, köprüde ortaya çıkan maksimum yer değiştirmeler ve gerilme değerleri elde edilmiş ve köprü'nün deprem davranışı değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 26 March 2024
Received in revised form 13 September 2024
Accepted 23 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Finite element method, Historical masonry bridges, Artificial earthquake records, Time history analysis

Historical masonry bridges in Turkey are an important part of our country's rich cultural heritage. These bridges were built to cross deep valleys, swamps, and large wetlands. Turkey has many historical bridges dating back to ancient civilizations, as it has been home to many civilizations throughout history. In order to safely transfer these historical bridges to future generations, it is necessary to accurately assess how they will respond in the event of an earthquake. For this purpose, various linear and nonlinear analysis methods are used. In this study, the three-span historical Uzunok Bridge from the Ottoman period located in the Darende district of Malatya, which was built in 1779, was investigated using artificial earthquake acceleration records. The bridge was modelled in three dimensions using the macro modelling method with the SAP2000 finite element program. Eleven artificial earthquake acceleration records were used to determine the bridge's response under seismic forces. As a result of the analyses, the maximum displacements and stress values that occurred in the bridge were obtained, and the bridge's seismic behavior was evaluated.

Doi: 10.24012/dumf.1458709

* Sorumlu Yazar

Giriş

Tarihi yapılar, bir topluluğun kimliğini şekillendiren önemli unsurlardır. Bu yapılar, farklı dönemlerin izlerini taşıdıkları için geçmişe ışık tutar ve önemli bilgiler sunar. Geçmişte, şu anda yaşadığımız topraklarda birçok medeniyet varlığını sürdürdüğü için tarihi yapılar, ülkemiz için de büyük bir öneme sahiptir. Bu yapılar, kültürel mirasımızın temel taşlarını oluştururlar ve geçmiş dönemlerin tarihini yansıtır. Ayrıca bu yapılar, geçmişteki toplumların yaşam koşulları, kullanılan malzemeler ve bilimsel ilerlemeler hakkında önemli bilgiler sunarlar. Tarihi yapılar üzerinde yapılan araştırmalar, bu yapıların hasar alma nedenlerini belirlememize ve gelecekteki koruma önlemlerini geliştirmemize yardımcı olur. Bu nedenle, tarihi yapıların korunması ve onların sunduğu tarihsel ve kültürel değerlerin sürdürülmesi büyük bir önem taşır. Tarihi yapıların önemli bir kısmını oluşturan yapı türlerinden biri de köprülerdir. Köprü, dere, ırmak ve yüksek vadilerin üzerinden geçmek için inşa edilen, ahşap, taş, kâgir veya demir gibi malzemelerden oluşan ayaklar ve kemerlerle desteklenen bir yol olarak tanımlanabilir. Köprüler, teknik ilerlemeler ve estetik kaygıların artmasıyla zaman içinde bugünkü görünümünü almışlardır. Ülkemiz birçok farklı medeniyetin hüküm sürdüğü topraklar olduğu için tarihi köprülerin sayısı oldukça fazladır. Bu tarihi köprülerin taşıyıcı temel ögesi genellikle kemerlerdir ve adını bu kemer yapısından almışlardır. Köprülerin tasarımında kullanılan kemer yapısı, büyük açıklıkları geçmek için basınç gücünü etkili bir şekilde dağıtma yeteneği nedeniyle tercih edilir. Günümüze kadar gelmeyi başarmış olan yığma köprüler, deprem, sel vb. doğal afetler neticesinde hasar görebilmekte ve göçmektedir. Tarihi yığma kemer köprülerin statik ve dinamik kuvvetlere karşı sayısal analizleri, çeşitli yazılım ve programlar aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bu analizler, köprülerin dayanıklılığını ve güvenliğini değerlendirmek, potansiyel hasarları tespit etmek ve değerlendirmek için önemlidir. Statik analizler, köprünün sabit yükler altında nasıl davrandığını değerlendirir. Bu tür analizler, köprünün taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve şekil değişimini inceler. Dinamik analizler ise köprüye etki eden titreşimler, rüzgâr veya deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışını incelemek için kullanılır. Bu analizler, köprünün dinamik yükler altında nasıl tepki vereceğini değerlendirmek için önemlidir. Tarihi yığma köprülerin sismik yükler altında analiz edildiği birçok çalışma yapılmıştır. Özmen ve Sayın [1] tarafından yapılan çalışmada, Kütahya ili Gediz ilçesinde yer alan tek açıklıklı Debboy Köprüsü, sonlu elemanlar metodu kullanılarak ANSYS programında modellenmiştir. Bu modelleme işlemi sonrasında, 2011 Simav ve 2002 Sultandağı deprem ivme kayıtları köprüye uygulanmış ve bu yığma kemer köprünün doğrusal dinamik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, köprünün ilk hasar göreceği bölgeler incelenen deprem ivme kayıtları altında değerlendirilmiştir. Sakcalı ve diğ. [2] yaptıkları çalışmada, tarihi kâgir köprülerin depreme karşı davranışını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, Irgandı Köprüsü'nün deprem davranışı analiz edilmiş ve hasar potansiyeli değerlendirilmiştir. Karalar ve Yeşil [3] yaptıkları çalışmada, tek açıklıklı yığma kemer köprünün farklı yakın fay depremleri altındaki statik ve dinamik davranışını karşılaştırmışlardır. Çalışma için Karabük ilinde bulunan tarihi Tokatlı Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Tarihi yığma köprünün yakın fay depremleri altındaki davranışını incelemek için öncelikle bir sonlu eleman modeli

oluşturulmuş ve ANSYS programı ile çeşitli yakın fay depremleri altında analiz edilmiştir. Milani ve Lourenço [4] taş köprülerin eksantrik yükler altındaki davranışını, üç boyutlu bir sayısal modelleme yöntemi kullanarak incelenmişlerdir. Bu yöntem, köprülerin gerçek üç boyutlu geometrisini ve dolgunun etkisini dikkate almaktadır. Makalede, iki gerçek ölçekli taş köprü incelenmiştir. Birisi, İngiltere'de Bolton Enstitüsü'nde deneysel olarak test edilmiş eğik bir köprüdür. Diğeri ise, beş dairesel kemerden oluşan düz bir köprüdür. Çalışma, üç boyutlu yaklaşımın, 2D yaklaşıma göre daha doğru sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Şeker ve Özkaynak [5] Amasya ilinde bulunan Hundi Hatun Köprüsü'nün statik ve dinamik analizlerini yapmışlardır. Çalışma kapsamında, köprünün üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Doğrusal malzeme modeli köprünün güvenli olduğunu gösterirken, doğrusal olmayan malzeme modeli özellikle köprünün ayaklarında ve tepe noktalarında hasar meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Bahreini ve diğ. [6] yaptıkları çalışmada Musa Palas Kemer Köprüsü'nün sismik duyarlılık analizini gerçekleştirerek malzeme belirsizliklerinin yapının sismik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda hem köprü malzemelerinin elastik modülü hem de yoğunluğunun yapısal tepkiler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmaların dışında tarihi yapıların yapısal analizleri konusunda yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur [7-10].

Yığma kemerli köprülerin sismik davranışlarının incelendiği çalışmalar incelendiğinde, zaman tanım alanında yapılan analizlerde mevcut deprem kayıtlarının seçilerek kullanıldığı görülmektedir. Yapay deprem ivme kayıtlarının Türk Deprem Yönetmeliği (2018) (TBDY, 2018)'ne göre tasarım spektrumuna uyumlu olarak ölçeklendirilerek kullanıldığı çalışmaları sınırlı olduğu görülmüştür.

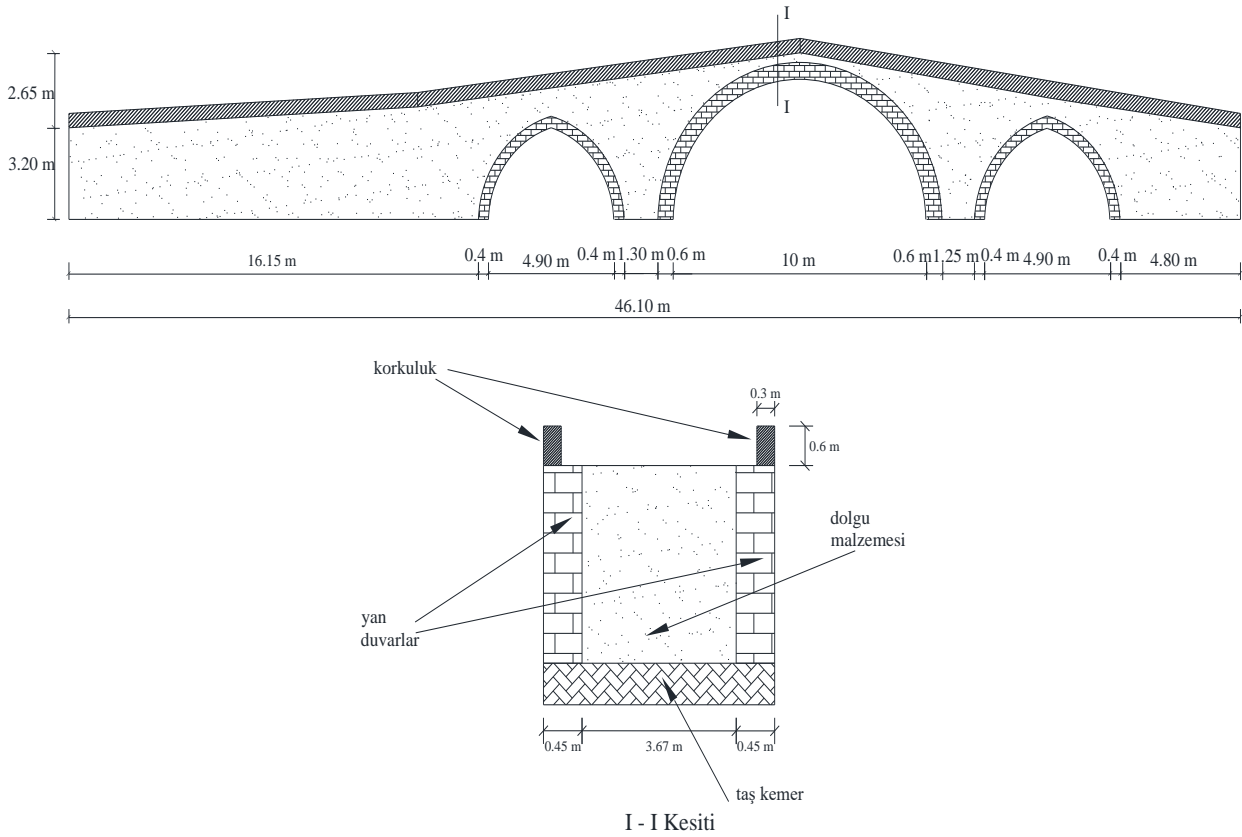
Bu çalışma, tarihi öneme sahip yığma kemerli bir köprünün sismik davranışını zaman tanım alanında analiz etmeyi amaçlamaktadır. Analiz için, Türk Deprem Yönetmeliği (2018) tasarım spektrumuna uygun yapay deprem ivme kayıtları kullanılmış ve köprünün dinamik analizleri yapılmıştır. Zaman tanım alanında analizler için SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılmış olup, köprüde meydana gelen gerilme yığılmaları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Sonuç olarak köprünün olası bir depremde hasar alma riski olan bölgeleri yapılan analizler ile değerlendirilmiştir.

Tarihi Uzunok Köprüsü

Bu çalışma kapsamında incelenecek olan tarihi yığma kemerli Uzunok köprüsü, Tohma çayı üzerinde inşa edilmiş olup Malatya ili Darende ilçesinde yer almaktadır. Köprü, Osmanlı İmparatorluğu dönemine ait olup 1779 yılında inşa edilmiştir. Köprünün uzunluğu 46 m, genişliği ise 3.67 m olup toplamda üç kemerden oluşmaktadır. Orta kemerin yarıçapı 5 m iken, iki yan kemerin yarıçapları ise 3.4 m'dir. Yan taşıyıcı duvarların kalınlığı 0.45 m, köprü korkuluğunun yüksekliği ise 0.60 m'dir. Ayrıca, köprünün orta kemeri 0.60 m, yan kemerler ise 0.45 m kalınlığa sahiptir. Köprünün korunması ve gelecek nesillere aktarılması amacıyla, 2007-2008 yılları arasında Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından restore edilmiştir. Uzunok köprüsünün görünümü Şekil 1' de, köprüye ait geometrik özellikler ise Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 1. Uzunok köprüsünün görünümü



Şekil 2. Uzunok köprüsüne ait geometrik özellikler

Köprü'nün Sonlu Elemanlar Modeli ve Malzeme Özellikleri

Yığma yapılar, malzeme özellikleri ve mekanik özellikleri açısından diğer yapı gruplarından farklılık göstermektedirler. Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesi, yığma yapıların analizinde farklı yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin çeşitli karakteristiklere sahip olmaları, bu malzemelerin farklı şekillerde davranmasına neden olur, bu da sonlu eleman türlerinin çeşitlenmesine yol açar. Malzeme ve harcın tek bir

eleman olarak modellenmesi veya ayrı elemanlar olarak ele alınması, farklı modelleme yaklaşımlarını gerektirir. Yapı içindeki tüm koşullar modelleme aşamasında ifade edilemez. Bu nedenle, modelleme sürecinde bazı varsayımların yapılması zorunlu hale gelir. Yığma yapıların sayısal analizlerinde, ele alınan yapının büyüklüğüne bağlı olarak üç farklı modelleme tekniği sıklıkla kullanılmaktadır. Bu teknikler; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak adlandırılır [11-12].

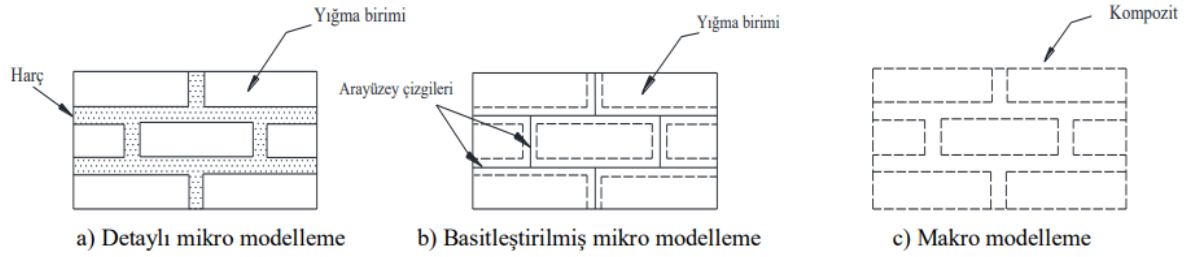
Detaylı Mikro Modelleme: Bu modelleme tekniğinde, çözüm süresi genellikle uzun olur ve bu nedenle özellikle küçük

yapılar veya belirli bir bölümün analizi için daha uygundur. Bu yaklaşımda, yığma elemanlarının detaylı olarak modellenmesi gerekmektedir.

Basitleştirilmiş Mikro Modelleme: Burada, yığma elemanlarının boyutları harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilir ve harç tabakası ihmal edilir. Yığma elemanları arasındaki sınırlar ara yüzey çizgileriyle belirlenir.

Makro Modelleme: Bu modelleme, taş, tuğla gibi yapı malzemeleri ile harç arasında ayırım yapmadan, yapı elemanını kompozit bir malzeme olarak kabul eden ve bu

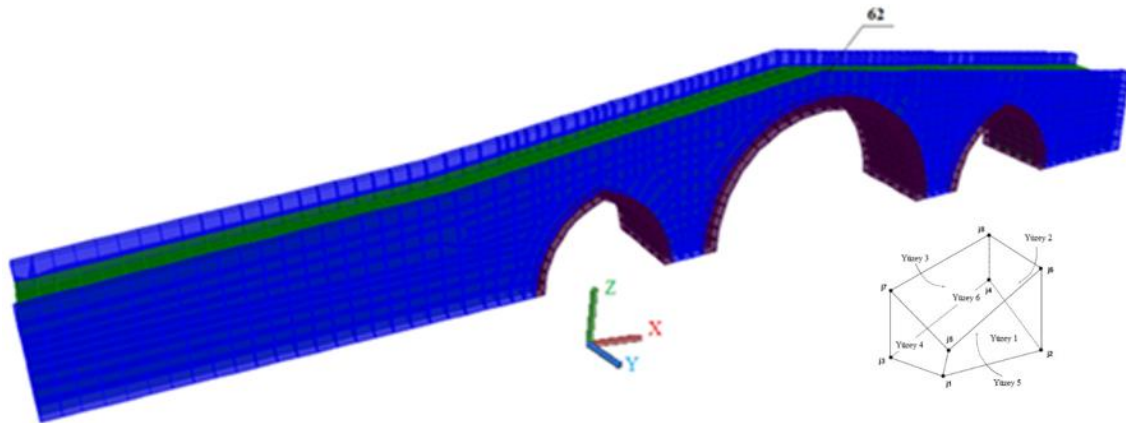
malzemelerin ortak özelliklerini yansıtan bir modelleme yöntemidir. Bu yaklaşım, büyük yapı sistemlerinin analizinde bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azalttığı için tercih edilir. Bu modelleme tekniklerine ait görseller Şekil 3’de verilmiştir. Bu teknikler için birinin, bir diğerinden üstün olduğunu söylemek uygun değildir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde tarihi yığma yapıların modellenmesinde genellikle makro modelleme yaklaşımının tercih edildiği görülmektedir [13-18].



Şekil 3. Tarihi yapıların modellenmesinde kullanılan teknikler [11-12]

Tarihi Uzunok köprüsü'nün sonlu elemanlar modeli, SAP2000 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Bu modellemede, tarihi yapıların modellenmesinde yaygın olarak kullanılan makro modelleme yöntemi oluşturmuştur. Köprü modelinin üç boyutlu sonlu elemanlar ağında toplam 5403 düğüm noktası ve 3882 katı eleman vardır. Analizlerde kullanılan katı elemanlar (solid) sekiz düğüm noktalıdır ve her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahiptir. Üç boyutlu modelde, Uzunok köprüsü'nün kemer, dolgu ve yan duvarları farklı malzeme özelliklerine sahiptir. Ayrıca, köprü'nün zeminle temas eden bölgeleri ankastre mesnetlerle bağlanmıştır.

Uzunok Köprüsü'nün tepki büyüklüklerinin incelendiği düğüm noktası, solid eleman ve sonlu elemanlar modeli Şekil 4'te gösterilmektedir. Tarihi yapıların malzeme özelliklerini belirlemek oldukça zorlu bir süreçtir ve ayrıca bu özellikleri tespit etmek amacıyla yapılan deneyler, tarihi yapıların zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, yığma köprülerin analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri, literatürde daha önce tarihi köprülerle ilgili yapılmış çalışmaların bulguları temel alınarak seçilmektedir. Uzunok Köprüsü'nün malzeme özellikleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 4. Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli, solid eleman ve 62 nolu düğüm noktası

Tablo 1. Sonlu eleman modeli malzeme özellikleri [19-21]

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Kemer	2500	0.2	2300
Yan Duvarlar	2000	0.2	2100
Dolgu	1200	0.2	1500

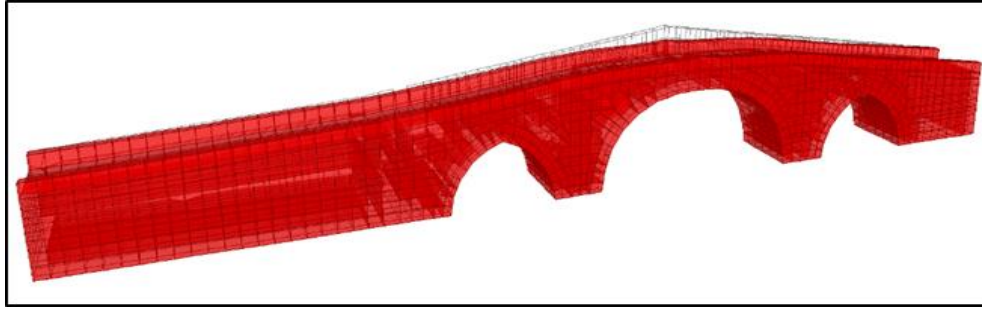
Sayısal Analizler

Köprünün davranışını detaylı olarak ortaya koymak amacıyla sonlu elemanlar modeli üzerinde, köprünün statik analizi, modal analizi ve zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler için, TBDY- 2018'e göre oluşturulmuş on bir farklı yapay deprem ivme kaydı kullanılmıştır

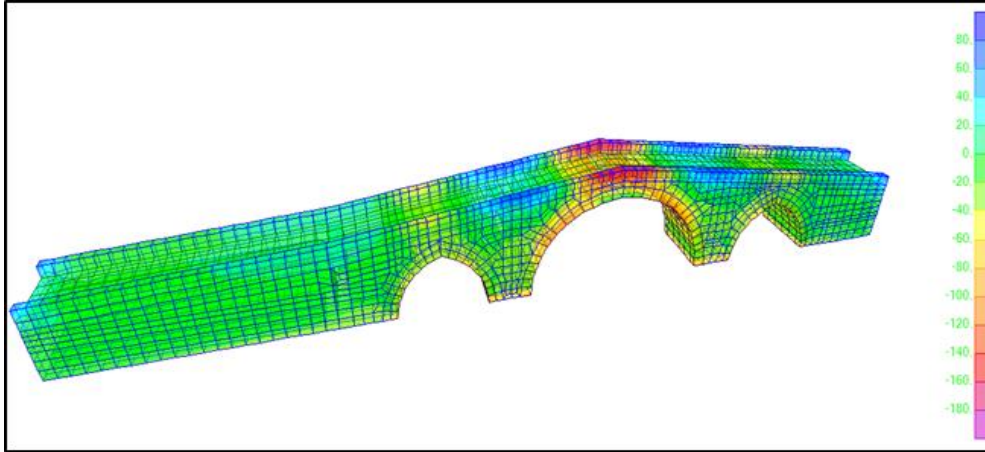
Uzunok köprüsünün statik analizi

Uzunok Köprüsü için hazırlanan üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak, Uzunok köprüsü, kendi ağırlığı altında statik analize tabi tutulmuş ve köprünün şekil değiştirmiş hali Şekil 5a 'da gösterilmiştir.

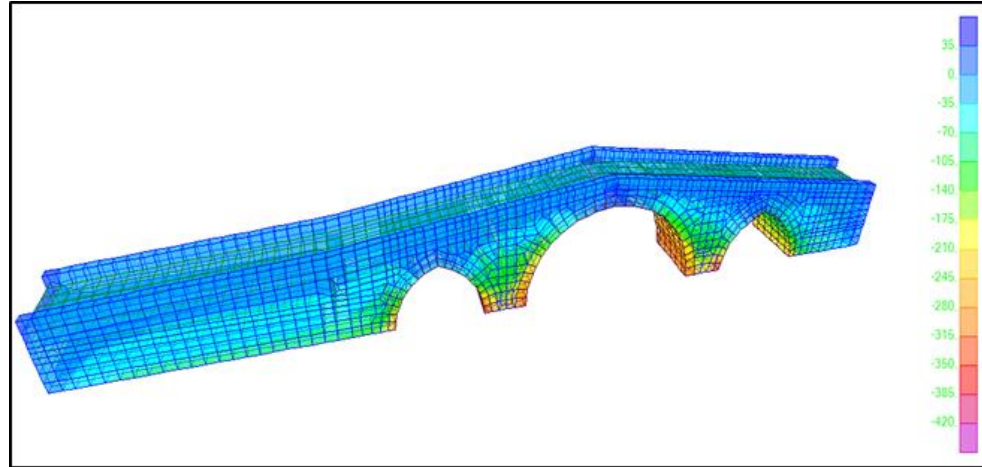
Köprü üzerinde meydana gelen en büyük yer değiştirme, ana kemerin ortasında düşey yönde gerçekleşmiştir. Bu yer değiştirme, tepki büyüklüklerinin incelendiği düğüm noktası (Düğüm 62) üzerinde z ekseninde 0.87 mm olarak belirlenmiştir. Statik analiz sonuçlarına göre, maksimum çekme gerilmeleri dağılımı incelendiğinde, bu gerilmelerin özellikle köprünün kenar yamaçlarına yakın bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür (Şekil 5b). Bu bölgelerde en büyük gerilme değeri 83.88 kPa olarak tespit edilmiştir. Statik analizde maksimum basınç gerilmelerinin ise köprü kemerinin zemin ile birleştiği bölgelerde meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 5c). En büyük basınç gerilme değeri ise 433.24 kPa olarak hesaplanmıştır.



a)



b)



c)

Şekil 5. Uzunok Köprüsü'nün statik analizinden elde edilen sonuçlar (kPa)

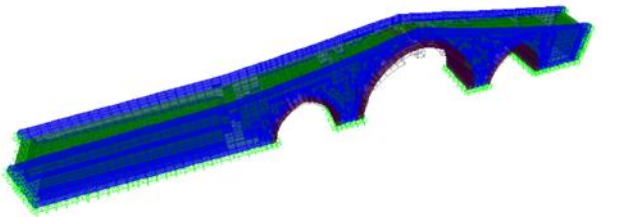
Uzunok köprüsünün modal analizi

Köprü'nün dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla, köprü'nün analitik modal analizi yapılmıştır. Modal analiz ile köprü'nün serbest titreşim periyotları, kütleli katılım oranları ve mod biçimleri elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda 100 mod için elde edilen kütleli katılım oranlarının toplamı, köprü'nün toplam kütle'sinin %90' ından fazlasını kapsamaktadır. Tablo 2'de modal analiz sonucu elde edilen ilk 10 mod gösterilmektedir.

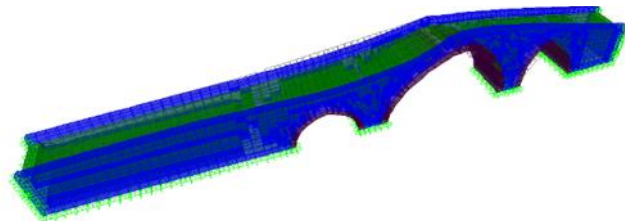
Tablo 2. Köprü'nün serbest titreşim periyotları ve kütleli katılım oranları

Modlar	Periyot (s)	Toplam Kütle Katılım Oranı (x eksen)	Toplam Kütle Katılım Oranı (y eksen)
1	0.105519	2.619E-09	0.2664
2	0.06951	2.215E-08	0.26983
3	0.058562	0.41461	0.26983
4	0.056466	0.41461	0.48019
5	0.050665	0.41463	0.48019
6	0.043817	0.41463	0.48635
7	0.03826	0.41915	0.49782
8	0.038227	0.4224	0.51418
9	0.036329	0.4224	0.64927
10	0.033948	0.56952	0.64928

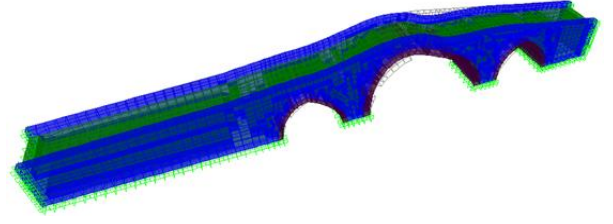
Uzunok köprü'sünün, modal analizi sonucunda, köprü'nün kütleli olarak en etkili serbest titreşim hareketlerine katılan modların, birinci ve üçüncü modlar olduğu belirlenmiştir. Mod 1, kütle'nin y doğrultusunda yer değiştirme yaptığını gösterirken, mod 3 ise x eksen yönünde yer değiştirme hareketini göstermektedir. 1. mod da kütleli katılım oranı %27 iken, 3. mod da, kütleli katılım oranı yaklaşık olarak %41 olarak elde edilmiştir. 1. ve 3. modlar için hesaplanan serbest titreşim periyotları sırasıyla 0.105519 saniye ve 0.058562 saniye olarak elde edilmiştir. Uzunok Köprü'sü'nün ilk 3 doğal titreşim modu ve frekansları, Şekil 6' da görsel olarak sunulmuştur.



a) 1. Mod ($f_1 = 9.476$ Hz)



b) 2. Mod ($f_2 = 14.386$ Hz)

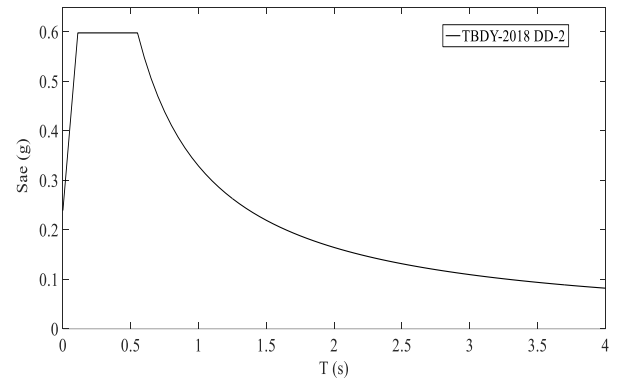


c) 3. Mod ($f_3 = 17.076$ Hz)

Şekil 6. Köprü'nün modal analiz sonuçları

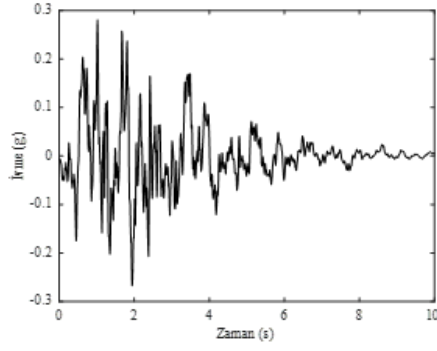
Uzunok köprü'sünün dinamik analizi

Köprü'nün zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizleri için 11 farklı yapay deprem ivme kaydı kullanılmış ve bu kayıtların süreleri 10 saniye olarak belirlenmiştir. Deprem ivme kayıtları SeismoArtif (2021) [22] programı kullanılarak üretilmiştir. Analizler sırasında bu yapay depremler, köprü'nün suyun akış doğrultusu (y doğrultusu) yönünde etki ettirilmiştir. Köprü'nün bulunduğu konum (yerel zemin sınıfı: ZD) dikkate alınarak, tüm dinamik analizlerde kullanılan deprem ivmeleri, deprem yer hareketi düzeyi DD-2'ye göre (50 yılda aşılma olasılığı %10, tekrarlanma periyodu 475 yıl) SeismoArtif programı ile ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme işlemi TBDY-2018 tasarım spektrumuna uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Analizlerde kullanılan ivme kayıtları Şekil 8' de sunulmuştur. Lineer dinamik analizler sırasında, köprü temel ortamı rijit olarak dikkate alınmıştır. Literatür incelendiğinde köprü temel ortamının rijit olarak sunulduğu çok sayıda çalışma mevcuttur [9-10, 13, 17-20, 24-25]. Dinamik analizler için HHT- α (Hilber-Hughes-Taylor) algoritması kullanılmıştır. Ayrıca, sönüm tipinin Rayleigh tipi bir sönüm olduğu varsayılmıştır. Analizlerde sönüm oranının (ξ) %5 olduğu kabul edilerek, rijitlik (α) ve kütle (β) orantılı sönüm katsayıları hesaplanmıştır [23-24]. Bu katsayılar, Denklem 1 yardımıyla elde edilmiştir. Denklem 1'de ω_i , ω_j ifadeleri sırasıyla sistemin i inci ve j inci moduna ait doğal titreşim frekanslarını göstermektedir. Yapılan dinamik analizlerinde, yapının kendi ağırlığı, yapay deprem ivmeleri ile birlikte dikkate alınmıştır. Bu çalışma kapsamında, zamana bağlı olarak değişen gerilmelerin en büyük değerleri (Envelop max, min) sunulmuştur.

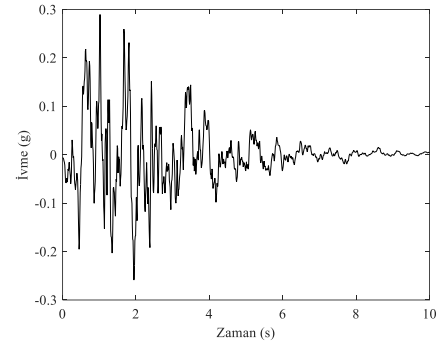


Şekil 7. Tasarım spektrumu

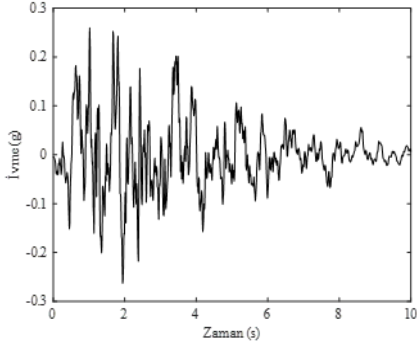
$$\alpha = \frac{2\xi\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (1)$$



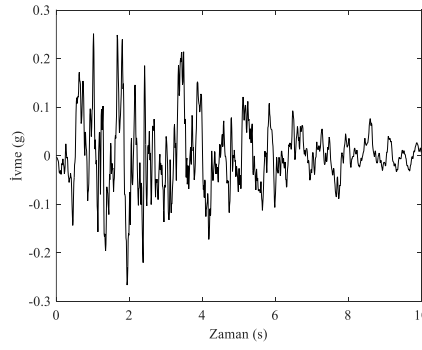
a) Deprem-1



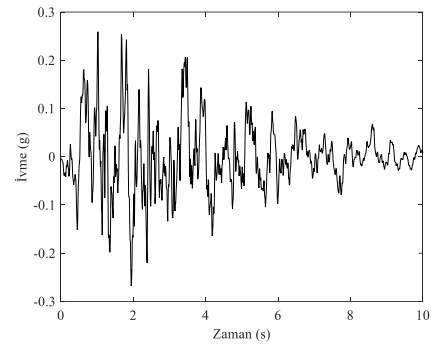
b) Deprem-2



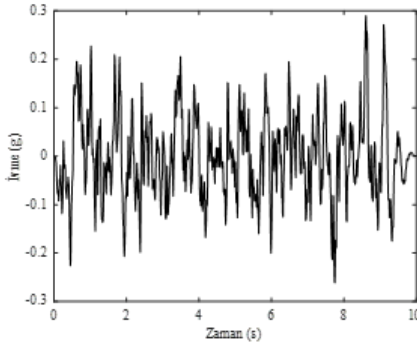
c) Deprem-3



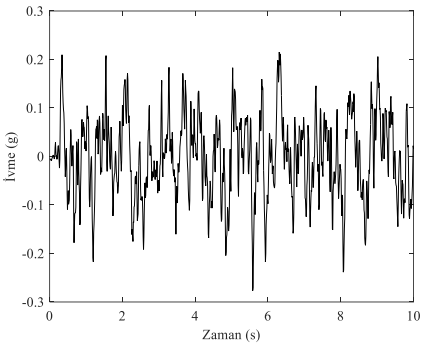
d) Deprem-4



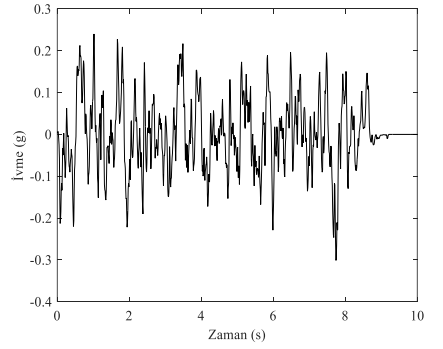
e) Deprem-5



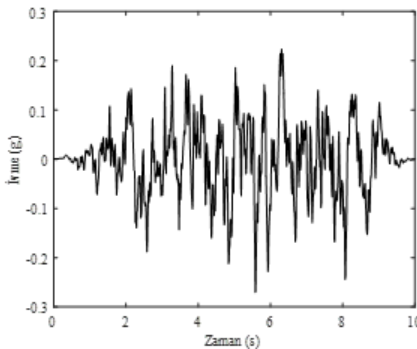
f) Deprem-6



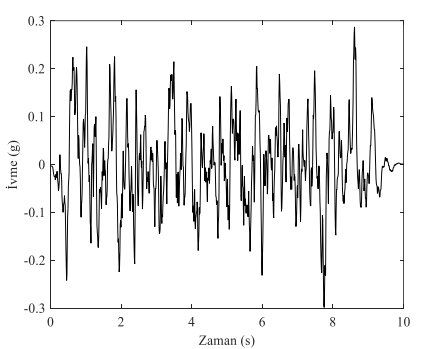
g) Deprem-7



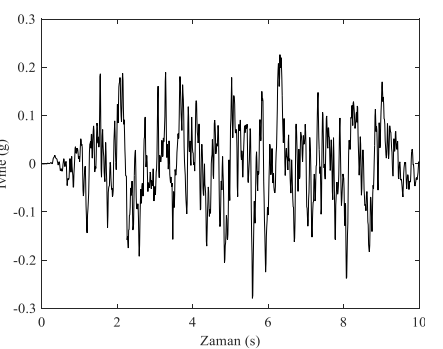
h) Deprem-8



i) Deprem-9



j) Deprem-10



j) Deprem-11

Şekil 8. Yapay deprem ivme grafikleri

Köprü üzerine uygulanan 11 adet yapay deprem ivme kaydı sonucunda 62 nolu düğüm noktasında ortaya çıkan maksimum

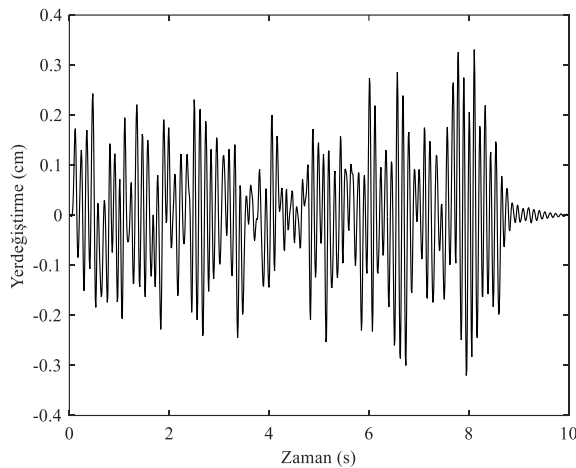
yer değiştirmeler ile köprüde oluşan maksimum ve minimum gerilmeler, Tablo 3' de sunulmuştur.

Tablo 3. Zaman tanım alanında analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme ve gerilmeler

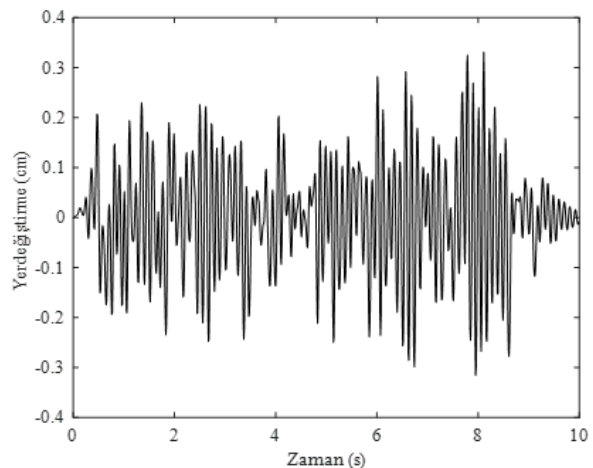
Deprem İvme Kayıtları	62 nolu düğüm noktası için yer değiştirme (cm)	Maksimum Çekme Gerilmesi (kPa)	Maksimum Basınç Gerilmesi (kPa)	Maksimum Kayma Gerilmesi (kPa)	Minimum Kayma Gerilmesi (kPa)
Deprem-1	0.280	541.327	1402.839	309.414	280.213
Deprem-2	0.286	566.394	1421.129	314.012	276.821
Deprem-3	0.269	484.097	1350.033	314.012	276.821
Deprem-4	0.268	466.145	1333.326	287.816	276.821
Deprem-5	0.270	473.869	1341.058	293.166	276.821
Deprem-6	0.330	623.723	1490.746	312.886	320.702
Deprem-7	0.270	464.502	1330.261	289.038	268.928
Deprem-8	0.331	598.572	1445.908	329.314	324.108
Deprem-9	0.264	453.775	1319.560	285.897	257.519
Deprem-10	0.331	596.240	1463.279	329.322	319.828
Deprem-11	0.270	465.962	1331.718	289.443	270.663

Tarihi Uzunok köprüsünün zaman tanım alanında yapılan dinamik analizleri sonucunda y doğrultusunda (suyun akış doğrultusunda) 62 nolu düğüm noktası için bulunan mutlak maksimum yer değiştirme değeri 0.331 cm olup bu değer Deprem-8 ve 10 için bulunmuştur. Deprem-8 ivme kaydı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki dinamik analizler sonucunda, köprü modeli üzerinde işaretlenmiş 62 nolu düğüm noktası için nehir akışı (y doğrultusunda)

doğrultusunda elde edilen yer değiştirme grafiği Şekil 9a' da sunulmuştur. Deprem-10 ivme kaydı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki dinamik analizler sonucunda, köprü modeli üzerinde işaretlenmiş 62 nolu düğüm noktası için suyun akış doğrultusunda elde edilen yer değiştirme grafiği ise Şekil 9b' de verilmiştir.



a) Deprem-8



b) Deprem-10

Şekil 9. 62 nolu düğüm noktasının yer değiştirme grafikleri

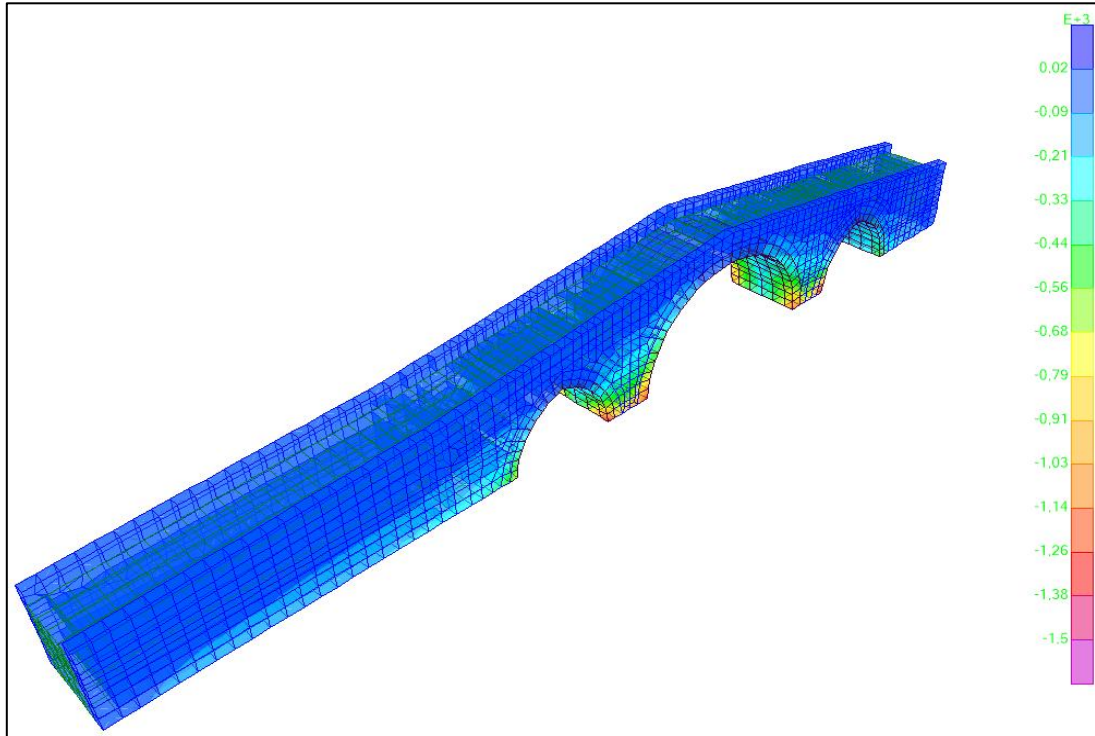
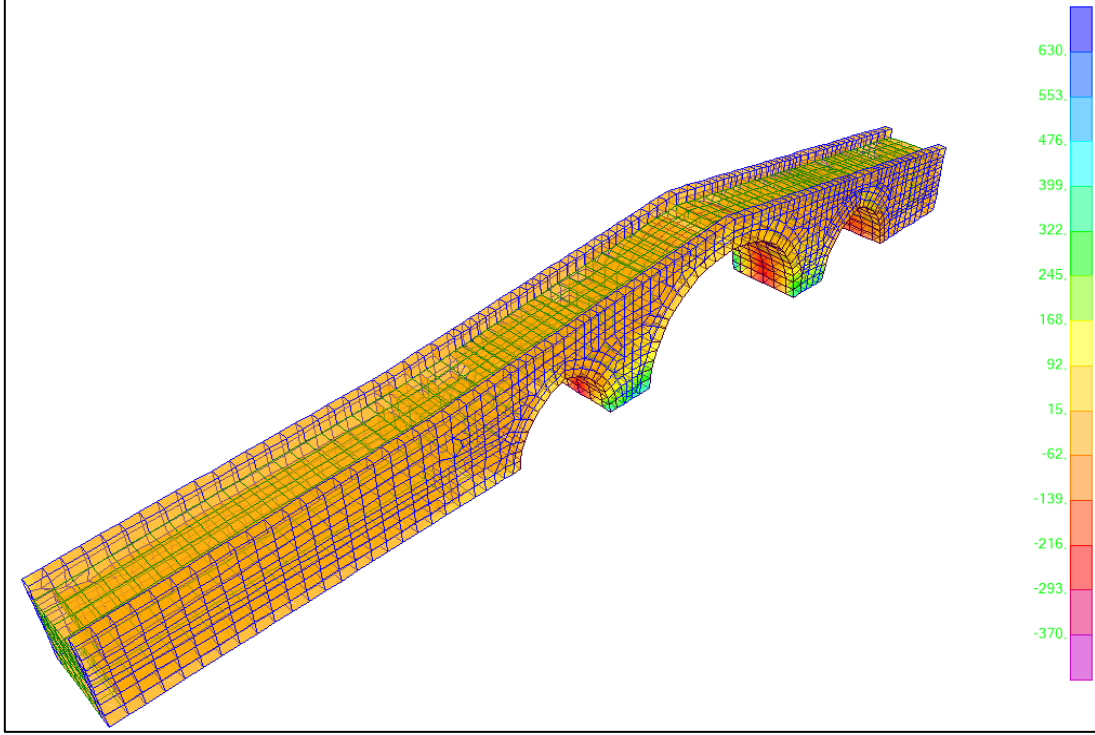
Köprüde meydana basınç ve çekme gerilmelerinin maksimum değerleri Deprem-6 ivme kaydı için elde edilmiştir. Deprem-6 ivme kaydı uygulanarak zaman tanım alanında yapılan analizler sonucu Envelope max. için bulunan maksimum çekme gerilme diyagramı ise Şekil 10a' da sunulmuştur. Analizlerin sonuçlarına göre, Deprem-6 ivme kaydı kullanıldığında, maksimum çekme gerilmesi köprü üzerinde 623.723 kPa olarak belirlenmiştir. Bu gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler, köprü'nün yan duvarlarının zeminle birleştiği kısımlardır. Bu sonuçlar, köprü'nün bu bölgelerindeki gerilmenin yoğun olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, Envelope min. için maksimum basınç gerilme diyagramı ise Şekil 10b' de sunulmuştur. Deprem-6 ivme kaydı kullanıldığında maksimum basınç gerilmesi -1490.746 kPa olarak hesaplanmıştır. Bu en büyük gerilme değerleri, köprü'nün

yan duvarlarının zeminle birleştiği bölgelerde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, köprü'nün bu bölgelerinde basınç gerilmelerinin yoğun olduğunu göstermektedir.

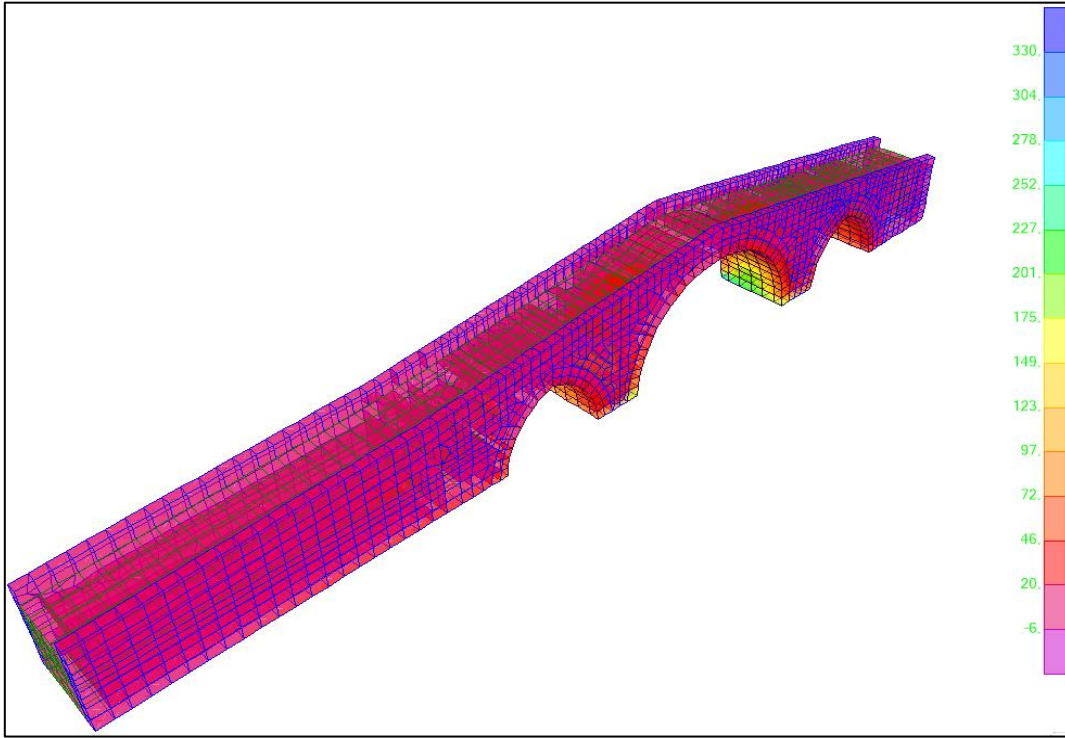
Maksimum ve minimum kayma gerilme değerleri ise Deprem-8 ivme kaydından elde edilmiştir. Deprem-8 ivme kaydı dikkate alınarak yapılan zaman tanım alanındaki analizlerde, Envelope max. için elde edilen maksimum kayma gerilme diyagramı Şekil 11a' da sunulmuştur. Bu analizler sonucunda maksimum kayma gerilmesi değeri 329.314 kPa olarak bulunmuştur. Maksimum kayma gerilmeleri özellikle büyük kemerin karın bölgesinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca, Envelope min. için elde edilen minimum kayma gerilme diyagramı da Şekil 11b' de gösterilmiştir.

Analizler sonucunda elde edilen minimum kayma gerilmesi değeri ise -324.108 kPa olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde Minimum kayma gerilmeleri de büyük kemerin karın bölgesinde yoğunlaşmıştır.

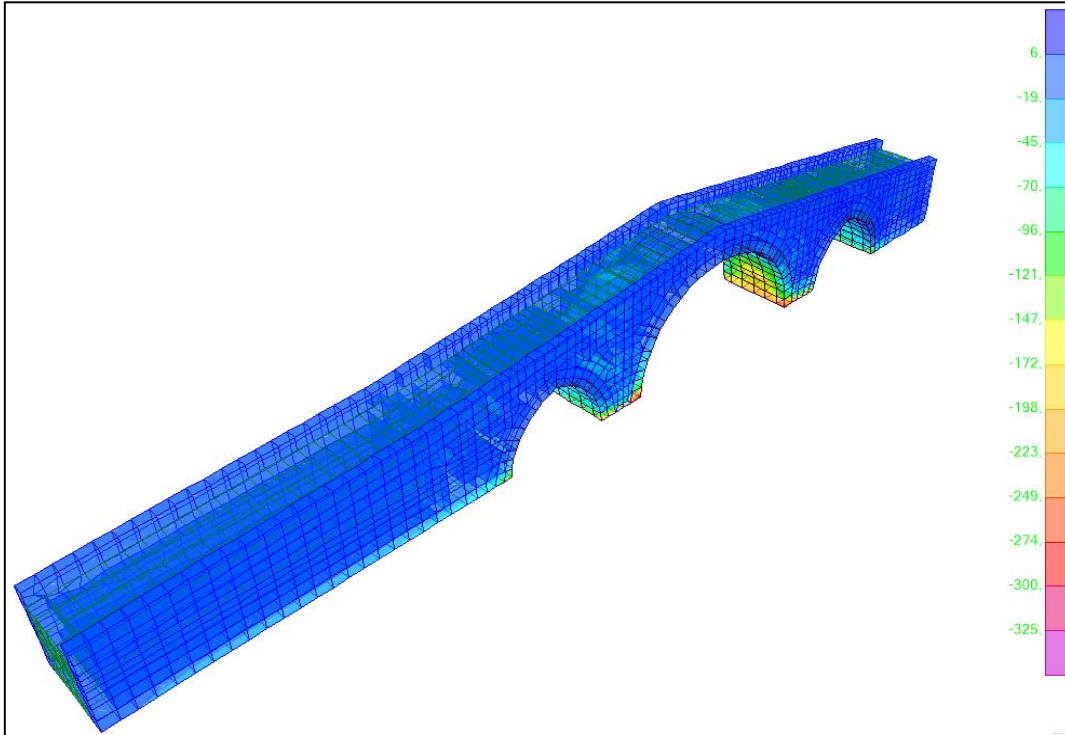
Bu sonuçlar, köprünün bu bölgelerindeki kayma gerilmelerinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum gerilmeler (Deprem-6)



a) Maksimum kayma gerilmeleri, Envelope max. (kPa)



b) Minimum kayma gerilmeleri, Envelope min. (kPa)

Şekil 11. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum gerilmeler (Deprem-8)

Sonuçlar

Bu çalışmada, tarihi Uzunok Köprüsü'nün dinamik analizleri, yapay olarak üretilen deprem ivme kayıtları altında yapılmıştır. Bu amaçla, köprünün sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Köprünün doğal titreşim frekansları, periyotları ve mod şekilleri analitik modal analiz yöntemi ile tespit edilmiştir. Köprüdeki sönümün Rayleigh tipi bir sönüm olduğu kabul edilmiştir. Dinamik etkiler için TBDY-2018'e uyumlu yapay olarak üretilen 11 adet ivme kaydı kullanılmıştır. Analizler sırasında köprünün kendi ağırlığı başlangıç yükü olarak alınmıştır. Zaman tanımlanmasında gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri incelenmiştir. Köprünün kendi ağırlığı altında gerçekleştirilen statik analiz sonuçlarına göre, maksimum çekme gerilmesi 210.92 kPa ve maksimum basınç gerilmesi ise 638.79 kPa olarak hesaplanmıştır. Dinamik analizler sırasında, köprü üzerinde işaretlenmiş düğüm noktası için elde edilen mutlak maksimum yer değiştirme, Deprem-8 ve

10 ivme kayıtları altında belirlenmiştir. Ayrıca, köprüde çekme ve basınç gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri Deprem-6, kayma gerilmelerinin maksimum ve minimum değerleri ise Deprem-8 ivme kaydı için hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, çekme ve basınç gerilmelerinin maksimum değerlerinin köprü yan duvarlarının zeminle birleştiği bölgelerde yoğunlaştığını, kayma gerilmelerinin ise maksimum ve minimum değerlerinin büyük kemerin karın bölgesinde yoğunlaştığını göstermektedir.

Tarihi köprüler üzerine yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların artması, farklı analiz yöntemlerinin kullanılması, bu köprülerin sismik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına ve güçlendirme tekniklerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmalar aynı zamanda tarihi köprülerin deprem etkilerine karşı daha dayanıklı hale getirilmesi ve gelecek nesillere aktarılması için önemli bir rol oynamaktadır.

Kaynaklar

- [1] A. Özmen, and E. Sayın, "Tarihi Yığma Bir Köprünün Deprem Davranışının Değerlendirilmesi," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9(2), pp. 956–965, 2020.
- [2] G.B. Sakcalı, A. Gönül, and İ. Yüksel, "Seismic behaviour of historical masonry bridges: The case study of Irgandi Bridge," *International Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 6, pp. 24–32, 2019.
- [3] M. Karalar, and M. Yesil, "Effect of near-fault earthquakes on a historical masonry arch bridge (Konjic Bridge)," *Earthquakes and Structures*, vol. 21(2), pp. 125–136, 2019.
- [4] G. Milani, and P.B. Lourenço, "3D non-linear behaviour of masonry arch bridges," *Computers & Structures*, vol. 110–111, pp. 133–150, 2012.
- [5] B.Ş. Şeker, and M. Özkaynak, "Investigation of Structural Performance of Historical Amasya Hundi Hatun Bridge," *Architecture, Civil Engineering, Environment*, vol. 15(2), pp. 109–120, 2022.
- [6] V. Bahreini, M. Pouraminian, and A. Tabaroei, "Seismic sensitivity analysis of Musa Palas historic masonry arch bridge by Tornado diagram," *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 7(1), pp. 1–7, 2022.
- [7] H. Güllü, "Tarihi yığma yapılı Cendere köprüsünün deprem etkisinin incelenmesi," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 7(1), pp. 245–259, 2017.
- [8] A. Özmen and E. Sayın, "Linear dynamic analysis of a masonry arch bridge," *In Proceedings of the Conference on Innovative Engineering Applications*, 2018, Sivas, Turkey, pp. 1–7.
- [9] G.B. Sakcalı *et al.*, "Linear/Nonlinear dynamic analysis and prediction of failure mechanism of Irgandi Bridge," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 66(4), pp. 1248–1261, 2022.
- [10] M. Karalar, and G. Çufalı, "Structural assessment of historical stone bridges with the finite element method under dynamic effects of arch shape: The Antik Iscehisar Bridge," *Applied Sciences*, vol.13(19), 10740, 2023.
- [11] P. Lourenço, "Computational Strategy for Masonry Structures," Doktora tezi, Delft Technical University of Technology, 1996.
- [12] E. Sayın, "Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi," Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Anabilim Dalı, 2009.
- [13] P. Zampieri, M.A. Zanini, and C. Modena, "Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13(9), pp. 2629–2646, 2015.
- [14] İ. Kocaman, "Effect of restoration interventions on the seismic behaviour of historical masonry buildings: The case of Molla Siyah mosque," *Engineering Failure Analysis*, vol. 148, 107206, 2023.
- [15] İ. Kocaman, and İ. Kazaz, "Collapse mechanism of historical masonry mosques under strong ground motions," *Engineering Failure Analysis*, vol. 144, 106983, 2023.
- [16] A. Özmen, and E. Sayın, "3D Soil structure interaction effects on the seismic behaviour of single span historical masonry bridge". *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 41(3), pp. 2023–2041, 2023.
- [17] Ö. F. Nematlu *et al.*, "Nonlinear seismic assessment of historical masonry Karaz bridge under different ground motion records", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 1, pp. 247–260, 2023.
- [18] Ç. O. Öztürk, S. Yılmaz Çetin, and E. Sayın, "Dynamic analysis of historical Sultan Hamit masonry arch bridges", *DUJE*, vol. 14, no. 3, pp. 499–506, 2023.
- [19] G. Frunzio, M. Monaco, and A. Gesualdo, "3D FEM analysis of a Roman arch bridge," *Historical Constructions*, pp. 591–598. 2001.

- [20] A. Bayraktar *et al.*, “Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi,” *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, pp.16–20, 2007.
- [21] L. Pelà, A. Aprile, and A. Benedetti, “Seismic assessment of masonry arch bridges,” *Engineering Structures*, vol. 31(8), pp. 1777–1788, 2009.
- [22] Seismosoft Ltd., SeismoArtif, Available at: <https://seismosoft.com/product/seismomatch/>, 2021.
- [23] B. Öztürk, “Seismic behavior of two monumental buildings in historical Cappadocia region of Turkey”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 15, pp. 3103-3123, 2017.
- [24] E. Sayın “Nonlinear seismic response of a masonry arch bridge”, *Earthquakes and Structures*, vol. 10(2), pp. 483-494, 2016.
- [25] E. G. Yılmaz, E. Sayın, ve A. Özmen, “Dynamic analysis of historical masonry arch bridges under different earthquakes: The Case of Murat Bey Bridge”, *TJST*, c. 17, sy. 2, ss. 461–473, 2022, doi: 10.55525/tjst.1105998.



Siirt Aktaş heyelanının sonlu elemanlar ve limit denge yöntemi ile analizi

*Analysis of Siirt Aktaş landslide finite element method and limit equilibrium method*M.Hayrullah AKYILDIZ¹, Sema NASIROĞLU^{2*}, M.Salih KESKİN³¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hayrullah.akyildiz@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7239-3518>² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, semanasiroglu@gmail.comORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4423-5528>³ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mkskeskin@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-4437>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 29.04.2024
Revizyon 26.07.2024
Kabul 14.08.2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Şev stabilitesi, sonlu elemanlar yöntemi, limit denge yöntemi, heyelan

ÖZ

Bu çalışma ile, yapım çalışmaları Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü tarafından yürütülen Siirt İli'ne bağlı Aktaş Köyü mevkiinde karayolu inşaatı çalışmaları sırasında, dolgu kesiminde meydana gelen stabilite problemlerinin limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve depremlerle ilgili durum analizlerinin yapılarak güvenlik sayıları ve göçme yüzeyleri bakımından kıyası yapılmıştır. Çalışma alanında yüksek yarma ve dolgu kesitlerine rastlanmaktadır, bu sebeple bu kesim kritik bir öneme sahiptir. Heyelanın meydana geldiği kesimlerde gerekli arazi çalışmaları yapılmış ve elde edilen zemin ve kaya numuneleri ile laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Arazi incelemeleri, laboratuvar ve literatür verileri ışığında analizler için gerekli kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Stabilite problemlerinde kayma yüzeyinin yerini ve şeklini belirlemek zordur. Mevcut durumu yansıtan model üzerinde, sonlu eleman yönteminin yansıtıldığı Plaxis V20 2D ile limit denge yöntemine dayanan Slide V.6 yazılımlarından yararlanılmış, şevin göçme yüzeyi tespit edilmeye çalışılmış ve güvenlik analizi hesapları yapılmıştır. Güvenlik sayıları yönünden iki yöntem uyumlu görünse de sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen güvenlik sayıları daha düşük çıkmıştır. Ayrıca zemindeki yenilme bölgelerinin yerlerinin belirlenmesi ve gerilme deformasyon eğrilerinin elde edilmesi açısından sonlu elemanlar yönteminin daha olumlu ve güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 April 2024
Received in revised form 26 July 2024
Accepted 14 August 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Slope stability, finite element method, limit equilibrium method, landslide

ABSTRACT

In this study, during the highway construction works in Aktaş Village of Siirt Province, the construction works of which are carried out by the 9th Regional Directorate of Highways, the stability problems occurring in the embankment section were analyzed by limit balance and finite element methods, and the safety numbers and collapse surfaces were determined. High cut and fill sections are encountered in the study area, therefore this section is of critical importance. In the light of field investigations, laboratory and literature data, the necessary shear strength parameters for analyzes were obtained. In stability problems, it is difficult to determine the location and shape of the sliding surface. On the model reflecting the current situation, collapse surfaces were tried to be detected and safety analysis calculations were made with Plaxis V20 2D, which is based on the finite element method, and Slide V6.0, which is based on the limit equilibrium method. Although the two methods seem compatible in terms of safety numbers, the safety numbers obtained with the finite element method are lower. In addition, it has been determined that the finite element method gives more positive and reliable results in terms of determining the locations of failure zones in the soil and obtaining stress deformation curves.

Doi: [10.24012/dumf.1475382](https://doi.org/10.24012/dumf.1475382)

* Sorumlu Yazar

Giriş

Şevler, belirli bir potansiyel kayma yüzeyi üzerinde dengeyi tesis etmek için gerekli olan kayma gerilmeleri mevcut kayma direncine ulaştığında ya da ötesine geçtiği zaman stabilitesini yitirir [1]. Şevlerin stabilitesi disiplinler arası bir konu olsa da meydana gelen şev hareketinin nedenleri, etkileri ve olayın sayısal olarak açıklanması açısından diğerlerinden farklılıklar göstermiş ve geoteknik mühendisliğinin temel problemlerinden biri haline gelmiştir. Şiddetli yağışlar sonucunda yeterli drenaj sağlanmaması durumunda doğal drenajın bozularak yüzey ve yağmur sularının oluşturduğu boşluk suyu basınçlarındaki artış, yol genişletmeleri sırasında yapılan dikkatsiz kazılar, eğimli arazi üzerinde yük oluşturan malzemenin yığılması, deprem ve volkanik olaylar gibi etkiler eğimli arazilerin yapısını bozarak stabilize problemi oluşturan en önemli faktörlerdir. Ülkemizde ve dünyada hem yeryüzünü biçimlendiren doğa olayları olması açısından hem de uygun önlemler alınmadığı için heyelanlar geçmişten günümüze süregelmiş ve ciddi can ve mal kayıpları ile tarımsal hasarlara sebep olabilmektedir. Tarihteki ilk güvenilir heyelan kaydı 1219 yılında Romance nehir vadisinde oluşan heyelandır ve heyelan kitlesi nehir önünde bir baraj oluşturmuş, akabinde barajın çökmesiyle binlerce insanın ölümüne sebep olduğu belirlenmiştir [2]. Bir madencilik kazısı sonrası, 1960 yılında İngiltere'nin Galler Bölgesi'nde pasa yığınlarının yerleşim yerlerine kaymasıyla bir okuldaki 116 öğrenci yaşamını yitirmiştir [3]. Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğal Kaynaklı Afet İstatistikleri 2018 raporuna bakıldığında ülkemizde 1980-2017 yılları arasında doğal afetler içerisinde heyelanların depremlerden sonra ikinci sırada geldiği belirlenmiştir [4]. Ülkemizde karayollarında meydana gelen heyelanların sebeplerine bakılırsa, morfolojik yapıya bağlı olarak dağlık alanlar ile geçit noktaları içermesi, aktif deprem kuşakları içerisinde yer alması, yüksek yamaç eğimlerine ve olumsuz jeolojik koşullara sahip olması ana sebepler olarak sıralanmaktadır.

Heyelanlar, bir zemin mekaniği problemi olarak ele alındığında yüzey ile yeraltı sularına ve zeminin kayma mukavemeti parametrelerine dikkat edilmelidir. Bu parametrelerin bilinmesi göçme mekanizmasının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Zeminin kayma mukavemeti parametreleri ile yapılan analizlere şev stabilize analizleri denilmektedir [5].

Şev stabilize analizleri, ilk defa Coulomb'un 1773 tarihinde kayma mukavemeti açısı ve kohezyon parametreleri üzerinde durmasıyla ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda Coulomb'un zemin kütleindeki kayma kaması içerisindeki kuvvetlerin denge durumu geliştirilmesi ile detaylı irdelenmiştir [6]. Bir şevin stabilitesi bozulduğu zaman, şevin güvenlik sayısı bir (1.0) olarak kabul görmektedir. Araştırmacılar tarafından bir çok yöntem içerisinden en yaygın kullanılan iki analiz yöntemi sonlu elemanlar ve limit denge yöntemidir. Limit denge yöntemlerinde, eğimli bir yüzey olarak potansiyel bir kayma yüzeyi tanımlanır ve "Coulomb" göçme kriterine göre kayma yüzeyi üzerinde bulunan zemin kütlelerine etkiyen kuvvet ve momentlerin denge durumu göz önüne alınarak zemin kayma mukavemeti hesaplanır [1]. Sonlu elemanlar yöntemi ise, zeminin gerilme

ve şekil değiştirme davranışının dikkate alındığı bir yöntemdir. Bu yöntem, zemin geometrisi ve sınır koşulların dikkate alınarak hesap yapılması gerçeğe en yakın sonuçlar vermesine imkan verir. Literatür incelediğinde, şev stabilitesi problemlerinde sonlu elemanlar ile limit denge yöntemlerinin en çok kullanılan analiz yöntemleri olduğu görülmektedir.

Keskin ve Laman (2007) şev stabilitesi problemlerinde sonlu elemanlar yöntemi ile deplasman ve gerilme durumlarının elde ediliyor olmasını tespit etmiş ve bu yöntemin limit denge yöntemlerine göre avantajlarını belirtmiştir [7].

Moudabel, (2013) bir şev vakasını sonlu elemanlar e limit denge yöntemi ile ele almış ve elde edilen güvenlik sayısının limit denge yönteminden daha yüksek çıktığı sonucuna varmıştır [8]. Bol ve ark. (2017) aşırı yağışlar sonucu dengesini yitiren bir karayolu şevinin güvenliğinin sağlanması için limit denge ve sonlu elemanlar yöntemin kullanmış ve uygun çözüm önerileri geliştirmiştir [9].

Huvaj ve Oğuz (2018) Norveç'te meydana gelen bir heyelan vakasını ele alarak limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri ile deterministik ve olasılıksal yaklaşımlarla güvenlik ve göçme yüzeyi faktörlerini karşılaştırmıştır [10].

Büyükağmıcı ve Işık (2019), üç şev vakasında stabilize analizi üzerinde çalışmış; analizlerde TS 8853, Eurocode 7 ve BS 8006 standartlarının başarı durumları mukayese etmiştir. Yapılan analizlerde sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri kullanılmış ve çalışmanın neticesinde stabilize analizleri için TS 8853 ile limit denge yönteminin Eurocode 7'ye göre daha güvenilir olduğu belirlenmiştir [11].

Gör (2021) Van ilinde karayolunda meydana gelen bir şev stabilitesi problemini limit denge yöntemleriyle ele alarak statik ve deprem durumu analizleri ile uygun çözüm önerileri geliştirmiştir [12].

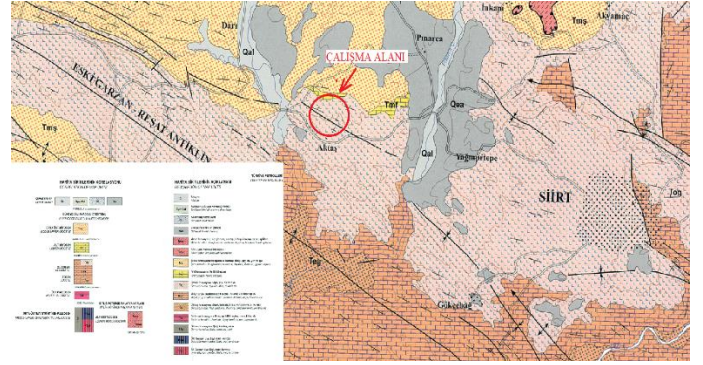
Mburu ve ark. (2022) yağış sızmasına bağlı iki heyelan vakası üzerinde çalışmış ve doygun olmayan şevlerin stabilitesinde sonlu elemanlar ve limit denge yöntemlerini içeren yazılımlar ile kayma yüzeyi arama yöntemi ile hata payları açısından farklı çıktı sonuçları elde etmişlerdir [13]. Ulah ve ark (2020) sonlu elemanlar metodu, limit denge yöntemi, yapay sinir ağları yöntemi, limit analiz ve vektörel yöntem olmak üzere beş yöntem ile şev stabilize analizi araştırması yapmıştır. Çalışmaya göre, en gerçekçi sonucu sonlu elemanlar yönteminin verdiği belirlenmiştir [14].

Bu çalışma ile ise yapım çalışmaları Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü tarafından yürütülen Siirt İli'ne bağlı Aktaş Köyü mevkiinde karayolu inşaatı çalışmaları sırasında, yarma ve dolguda meydana gelen stabilize problemlerinin sonlu elemanlar ve limit dene yöntemi ile statik ve depremlilik durum analizleri yapılarak güvenlik sayıları ve göçme yüzeyleri açısından kıyası yapılmıştır.

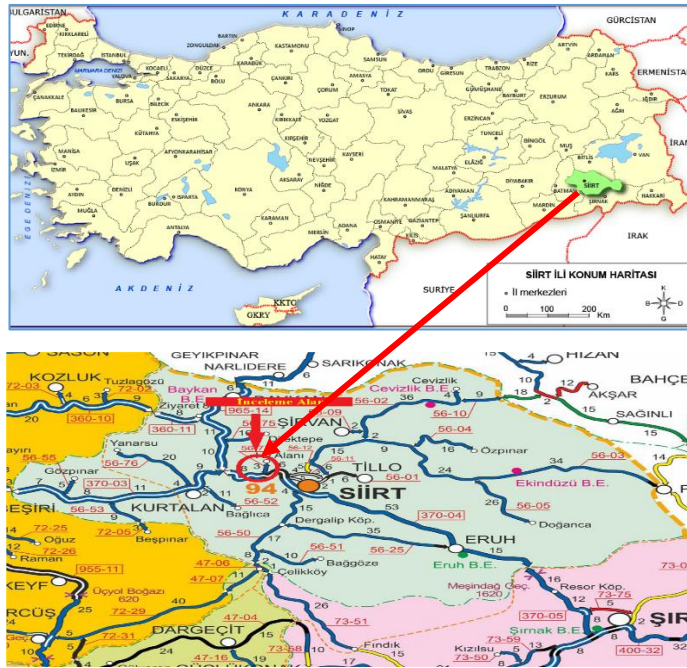
Materyal ve Metot

Çalışma Sahası ve Jeoloji

Siirt İli, Kurtalan İlçesi Aktaş Köyü Mevki'nde 2019 yılında karayolu çalışmaları sırasında yarma ve dolgu şevinde hareketlilik gözlenmiş ve yol çalışmaları durdurulmuştur. Jeolojik birimlerin zayıflığı, hava koşulları ve yağışlar heyelanı tetiklemiş ve Siirt-Kurtalan Yolu'nun Km:13+600-14+600 kesiminde 2021 yılında tekrar hareket gözlenmiştir. İnceleme alanı Şekil 1.'de gösterildiği üzere Siirt ili sınırları dahilinde olup Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü ağındadır.



Şekil 2. İnceleme alanının genel jeoloji haritası [16]

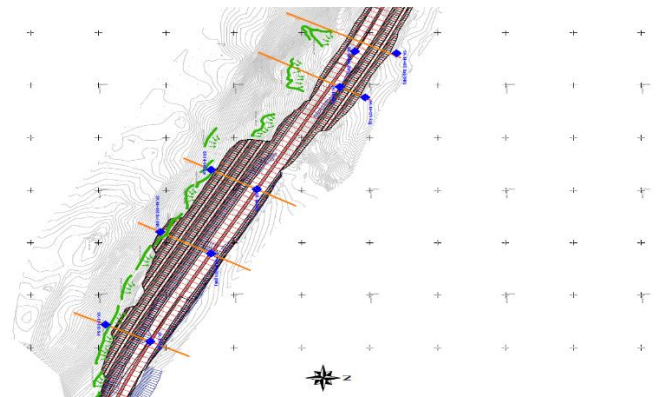


Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası [15]

Çalışma alanı ile çevresinde Genç Eosen-Oligosen yaşlı Germik Formasyonu gözlenmektedir. İnceleme alanı ve yakın çevresi için hazırlanan 1/500.000 ölçekli genel jeoloji haritası Şekil 2.'de verilmiştir. Şev stabilitesinin bozulduğu alanın üst kotlarında gözlenen rezidüel zemin, açık kahve – kahve renkli, grimsi – grimsi yeşil, bej renkli, çok sıkı – sert, katı – çok katı, orta – yüksek plastisiteli, nemli yapıdaki killi çakıl – siltli kil biriminden oluşmaktadır. Kaya birimleri ise; açık kahve – kahve, grimsi yeşil, grimsi beyaz renkli, genelde orta derecede – çok ayrılmış, yer yer tamamen ayrılmış, zayıf, çok zayıf dayanımlı yer yer aşırı derecede zayıf dayanımlı, yer yer de sağlam – orta derecede sağlam dayanımlı, genelde çok çatlaklı kırıklı – kırıklı, yer yer parçalanmış, kırıklar kil dolgululu, eklem yüzeyleri genellikle kaygan yer yer pürüzlü, yer yer ufalanabilir – dağınık yapıda, çatlaklar kil-jips dolgululu yapıdaki Şeyl – Anhidrit-Jips biriminden oluşmaktadır.

Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları

İnceleme alanındaki birimlerin jeolojik-jeoteknik açıdan detaylandırılması, yer altı suyu seviyesinin tespiti, proje sahasında izlenen birimlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ile mevcut ve olası jeoteknik problemlerin irdelenmesi amacıyla yönelik olarak; dört tanesi inklinometreli kuyu olmak üzere Şekil 3.'te gösterildiği üzere on lokasyonda toplam 267.00 m araştırma sondajı açılmış ve arazide gözlemler yapılmıştır (Şekil 4.). Sondaj kuyularının açılması sırasında; ilerlemeye paralel olarak, SPT yerinde deneyi yapılarak, örülenmiş numuneler, örülenmemiş numuneler (UD) ve karotiyer ile ilerlenerek, karot numuneler (RC) alınmıştır. Yapılan sondaj çalışmaları sonucunda yeraltı suyuna rastlanmış olup yeraltı suyu seviyelerine ait özet tablo Tablo 1.'de verilmiştir. Yeraltı suyu zeminin kayma dayanımı değerlerinde değişiklikler meydana getirir bu sebeple şev stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Zemin ve kaya numuneleri, ilgili standartlar, TS 1900-2/T1[17], ISRM [18], TS EN ISO 17892-1 [19], TS EN ISO 17892-2 [20], TS EN ISO 17892-8 [21], ASTM D2487 [22], AASHTO T88 [23], AASHTO T89 [24], AASHTO T90 [25] ile önerilen yöntemlere göre, yapılmıştır.



Şekil 3. Sondaj Planı

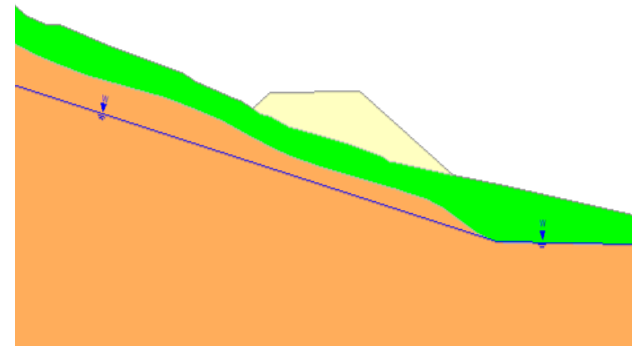
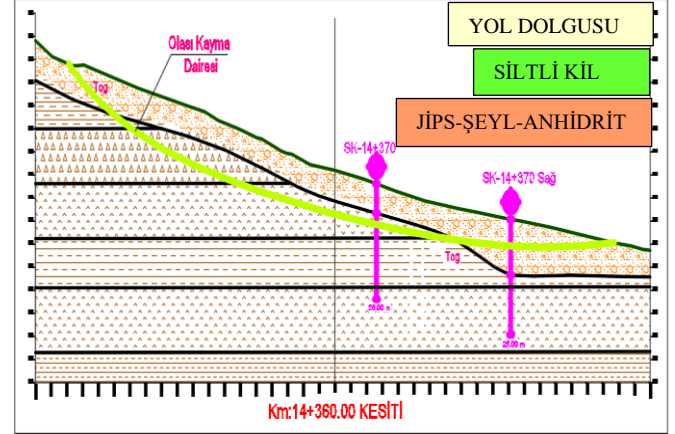


Şekil 4. Çalışma alanı (dolgu tabanının oturacağı kesim) ve çevresinin görünümü

Tablo 1. Yeraltı suyu seviyesi özet tablosu

SK NO	DERİNLİK (m)	YASS (m)	KOT (m)
SK- 13+810	21,00	2,00	631,17
SK- 13+810 Sol	35,00	Kuru	659,57
SK- 14+000 (İNK)	21,00	1,90	626,79
SK- 14+000 Sol (İNK)	39,00	1,00	659,90
SK- 14+140	18,00	1,70	620,26
SK- 14+140 Sol	35,00	2,00	649,00
SK- 14+370	25,00	8,0	698,06
SK- 14+370 Sağ	25,00	2,5	690,37
SK- 14+440 (İNK)	24,00	2,00	695,24
SK- 14+460 Sağ (İNK)	24,00	1,5	584,45

Yapılan çalışmaların neticesinde, zeminin yeraltı suyu durumu ve bölgenin mevcut zemin tabakaları değerlendirilmiştir. Yol güzergahında bulunan dolgu kesimindeki stabilite problemini çözmek için kritik dolgu kesiti belirlenmiştir. K.G.M Araştırma Mühendislik Teknik Şartnamesi'ne göre dolgu yüksekliği $h \geq 8$ m olduğu durumlarda şev oranlarının güvenli olarak belirlenmesi amacıyla şev stabilite analizlerinin yapılması gerekmektedir [26]. Bu durumda 14,38 m yüksekliğe sahip dolgu kesiti, kritik kesit olarak belirlenmiştir. Şekil 5. ve Şekil 6'da belirtildiği üzere Km:14+360 kesiti için SK-14+370 ve SK-14+370 Sağ sondaj verilerinden yararlanılmıştır.



Şekil 5. Kritik Jeolojik Dolgu Kesiti ($h=14,38$ m)



Şekil 6. UD ve karot numunelerinin alındığı sandıklar

Literatür, arazi ve laboratuvar verileri kullanılarak zemin, kaya kütle ve yeni yol dolgusu için analizlerde kullanılmak üzere, parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler, Tablo 2.'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Analizlerde kullanılacak zemin ve kaya malzemesine ait mühendislik parametreleri

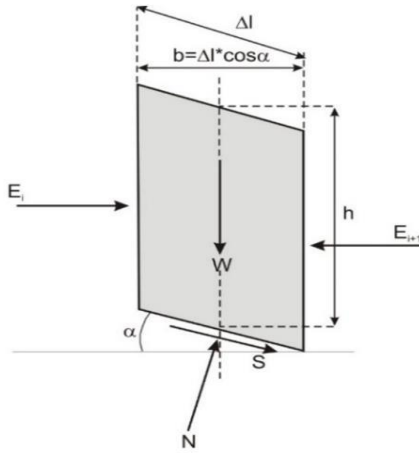
Parametre	Sembol	1. Siltli Kil (Tog)	2. Jips-Şeylit Anhidrit (Tog)	3. Yeni oluşturulacak yol dolgusu
Malzeme Modeli		Mohr-Coulomb	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Malzeme Davranışı	Tip	Drenajlı		
Kuru BHA	γ_{dry} (kN/m ³)	17	22	20

Doygun BHA	γ_{sat} (kN/m ³)	18	22	20
Ort. SPT-N ₃₀ min/ort/m ak	-	6 / 28 / R	-	-
Ort. PI min/ort/m ak	%	20 / 28 / 35	-	-
I _{s50} min/ort/m ak	MPa	-	0.03 / 0.49 / 3.97	-
RQD ort	%	-	28	-
Elastisite modülü	E (kN/m ²)	49600	207010	100000
Poisson oranı	-	0.35	0.25	0.30
Kohezyon	c (kPa)	7	187	5
Sürtünme Açısı	ϕ (°)	30	37	35
Dilatansi Açısı (ϕ -30)	Ψ (°)	0	7	5
m	-	-	1.03	-
s	-	-	0.0002	-
a	-	-	0.531	-

Sayısal Modelleme

Çalışmanın bu bölümünde, stabilite problemine en yakın çözümü ortaya koymak adına şev stabilize analizleri deterministik yöntemler olan sonlu elemanlar ve limit denge yöntemi ile incelenmiştir. Limit denge yönteminin amacı, varsayılan kritik kayma yüzeyinde statik ya da sismik denge koşullarının bir güvenlik sayısı ile belirlenmesidir. Limit denge yöntemi, zeminlerde ve zemin özelliği gösteren ayrışmış kayalarda uygulanabilir olması ve bir şevin göçüyormuş kabulü ile kayma yüzeyi boyunca kayma gerilmelerinin belirlenebilmesi sebebiyle şev stabilize analizlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Limit denge yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde, kayan bir kütleyle

dilimlere ayırarak her biri için denge denklemleri yazabilen dairesel kayma yüzeyinin dengesini ele alan Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi kullanılmıştır. Dairesel kayma dilimleri arasındaki kesme gerilmelerinin sıfır varsayıldığı ve normal gerilme ile ağırlığın ise dilimin ortasına etki etmesi kabulüne dayanan bu yöntem, ilk kez genel şekliyle Bishop tarafından geliştirilmiştir [27]. Şekil 7.'deki bir dilimin düşey yöndeki kuvvetleri bileşenlerine ayrıldığında, bir güvenlik katsayısının belirlenmesine katkı sağlar ve toplam gerilmeler cinsinden aşağıdaki bağıntı (1) elde edilir. Güvenlik sayısı, bir şevin stabil olup olmaması durumu ya da ne derece stabil olduğu hakkında bilgi vermektedir.

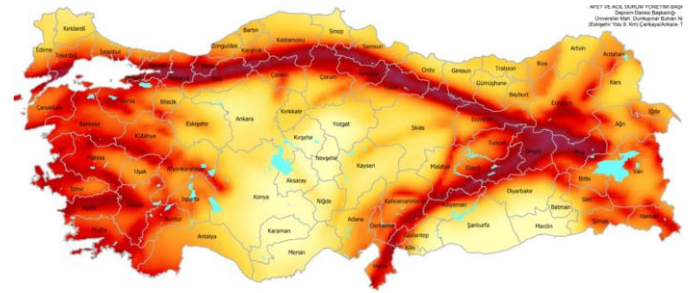


Şekil 7. Basitleştirilmiş Bishop Yöntemine göre dilime etki eden kuvvetler

$$F = \frac{\sum [c \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha + W \cdot \tan \Phi]}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

Zeminlerin davranışını incelemek için geliştirilen yöntemlerden biri de sonlu elemanlar yöntemidir. Güvenlik sayısı faktörünün yanı sıra; ötelenme, boşluk suyu basıncındaki değişim ile zemindeki yenilme bölgelerinin yerlerinin belirlenmesi gibi bilgilere de ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle bir durumda zeminin gerilme-deformasyon analizinin de yapılması gerekmektedir. Yamaç ve şev ortamında bu hesaplamalar, sayısal yöntemle iki veya üç boyutta sürekli ortam varsayımı ile sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Sonlu elemanlar yönteminde en önemli özellik, zeminin gerilme-deformasyon özelliklerinin laboratuvarında gerçekleştirilen deney sonuçlarından çıkararak doğrusal-elastik, hiperbolik-elastik ve elasto-plastik gibi modellerle temsil edilebilmesidir [2]. Bu yöntem, Zeinkiewicz (1977) tarafından sürekli bir sistemi matematiksel olarak modelleyip çözümlen bir yöntem olarak tarif edilmiştir [28]. Toplam gerilme, zemin mekaniği problemlerinde boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmeye ayrıldığı için malzeme davranışı efektif gerilme olarak ifade edilmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile düşey ve yanal hareketler, gerilmeler, boşluk suyu basıncı ve suyun akış durumu tespit edilebilmektedir.

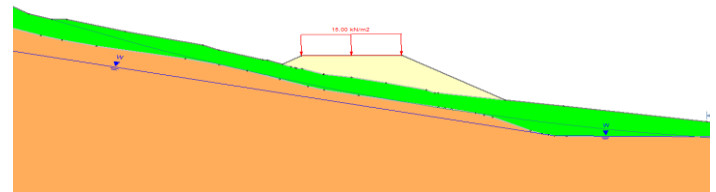
Limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar metodu için birçok yazılım geliştirilmiş olsa da bu çalışmada, limit denge yöntemi için Slide V.6 programı, sonlu elemanlar metodu için ise Plaxis V20 2D yazılımı kullanılmış ve hem statik hem de sismik durum için stabilite analizleri yapılmıştır. Şekil 8.'de gösterilen Türkiye Deprem Bölgeleri haritasına göre proje güzergahı, yer ivmesi değerleri "AFAD, 2018, Türkiye Deprem Tehlike Haritası"ndan yararlanılarak yer ivme katsayısı; Siirt - Kurtalan Bölünmüş Yolu (Aktaş Varyantı) Km: 13+700 - 14+600 arası kesime ait yer ivmesi değeri 0.237 g olarak belirlenmiştir. Ancak yarı statik katsayının artırıcı veya azaltıcı etkilerini de kapsayacak şekilde yer ivmesi değeri, maksimum yer ivmesi değerinin (0.237 g) yarısı 0.1185 g olarak alınmıştır [29].



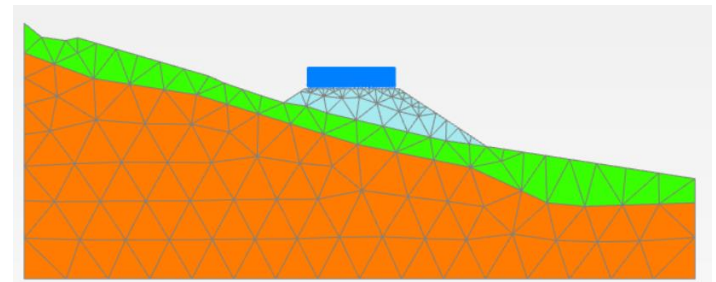
Şekil 8. İnceleme alanının deprem tehlike haritası [30]

Yerel Zemin Sınıfı ZD ve Deprem Yer Hareketi Düzeyi DD-2 olarak belirlenmiştir. Kritik kesit olarak belirlenen Km:14+360 kesiti için şeve ait model oluşturulmuş ve yol yapısı üzerindeki yükler Şekil 9. ve Şekil.10.'da belirtildiği üzere 15 kPa olarak düzgün yayılı yük şeklinde hesaba dahil edilmiştir.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	UCS (kPa)	m	s	a	Water Surface	Hu Type	Hu
1-Yeni Yol Dolgu		20	Mohr-Coulomb	5	35					Water Surface	Custom	1
4-Residüel Zemin		18	Mohr-Coulomb	7	30					Water Surface	Custom	1
5-İPS		22	Generalized Hoek-Brown			12950	1.03	0.0002	0.531	Water Surface	Custom	1



Şekil 9. Analizlerde kullanılan Km:14+360 dolgu kesiti şev modeli (Slide V6) [31]



Şekil 10. 15 düğümlü sonlu elemanlar ağı (Plaxis V20 2D)

[32]

Tasarım hesaplarında zemin davranış modeli olarak, rezidüel zemin olarak belirtilen siltli-kil birimi için Mohr-Coulomb Modeli, Jips-Şeyl-Anhidrit birimi için ise Generalised Hoek Brown zemin davranış modeli kullanılmıştır. Hem Plaxis hem de Slide programında standart sınır koşullar kabul edilmiştir. Varsayılan sınır koşulları; zemin kesitinin en alt kısmında tüm deplasmanlar sınırlandırılmıştır. Sağ ve sol sınırdaki yanal deplasmanlar sınırlandırılmıştır. Sonlu elemanlar ağında en uygun ağ yapısı araştırılmış ve orta (mesh) seçilerek analiz edilmiştir.

Araştırma Bulguları

Km:14+360 dolgu kesiti için analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Mevcut durumdaki ve dolgu+trafik yükünün ilave edildiği durumdaki şevin güvenlik sayısı faktörü ve deformasyon analizleri yapılmıştır.

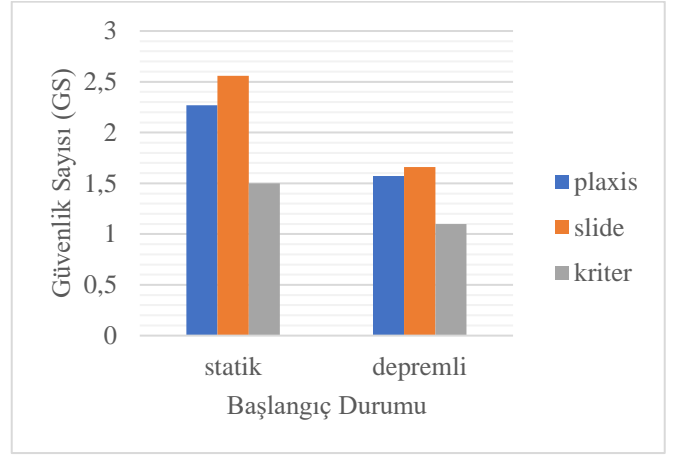
Güvenlik Sayısı Analizi

Plaxis ile yapılan güvenlik sayısı analizlerinde mukavemet azaltma yöntemi ile hesaplamalar yapılmıştır. Bu yöntem ile kayma mukavemet parametreleri olan kohezyon ve sürtünme açısı, şevde göçme meydana gelene kadar aşamalı bir şekilde azaltılır ve göçme anındaki güvenlik sayısı belirlenir. Model geometrisi yatay şekilde olmadığı için, Plaxis'te analize başlamadan ilk aşamada "Ağırlık Yükleme" hesabı yapılmıştır. Tablo.3'te belirtildiği üzere sonlu elemanlar ve limit denge metodu ile şev stabilite analizi yapılmış ve güvenlik sayısı elde edilmiştir.

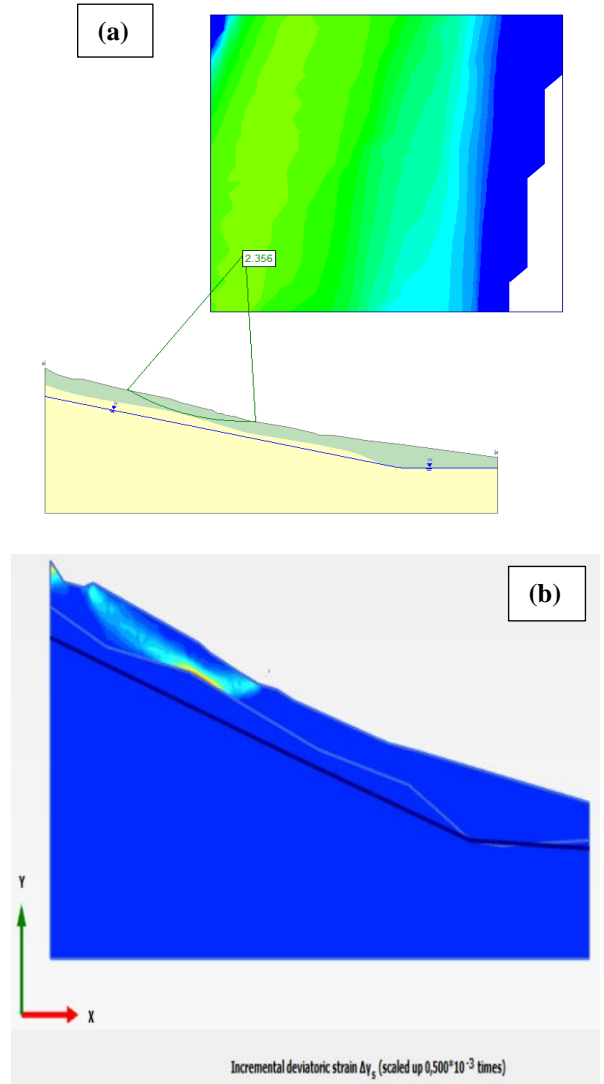
Tablo 3. Km:14+360 Dolgu kesiti güvenlik sayısı analiz sonuçları

Yöntem	Koşullar	Başlangıç Durumu	Dolu+Trafik Yüklü Durum	Şartname Kriteri
Sonlu Elemanlar Metodu (Plaxis V20)	Statik	2,268	1,346	1,5
	Depremler	1,572	1,064	1,1
Limit Denge Yöntemi (Slide 6)	Statik	2,560	1,479	1,5
	Depremler	1,660	1,167	1,1

Şekil 11.'de belirtildiği üzere, başlangıç durumunda hem statik hem de depremler için herhangi bir stabilite problemi gözlenmemektedir. Sonlu elemanlar ile limit denge analiz sonuçları benzerlik gösterse de güvenlik faktörü açısından sonlu elemanlar yöntemi (Plaxis) sonuçları daha düşük çıkmış ve tasarım duyurumu için daha güvenli tarafta kalmıştır. Km:14+360 kesiti için yapılan güvenlik sayısı analizinden elde edilen kayma düzlemi, Statik durum için Şekil 12.'de depremler için ise Şekil 13'te gösterilmiştir.

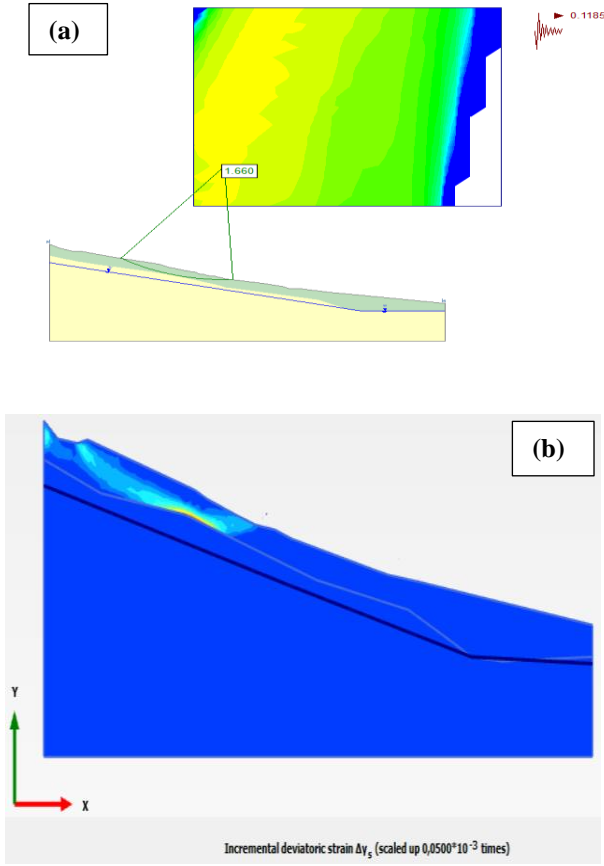


Şekil 11. Başlangıç durumundaki güvenlik sayısı analizi



Şekil 12. Başlangıç durumunda statik güvenlik sayısı analizinden elde edilmiş kayma düzlemi görünümü

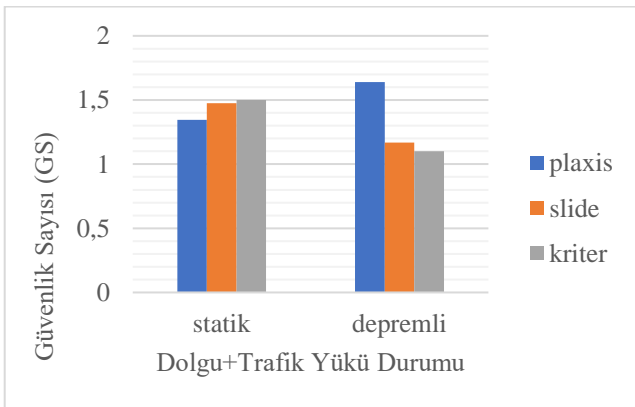
(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)



Şekil 13. Başlangıç durumunda depremlı güvenlik sayısı analizinden elde edilmiş kayma düzlemi görünümü

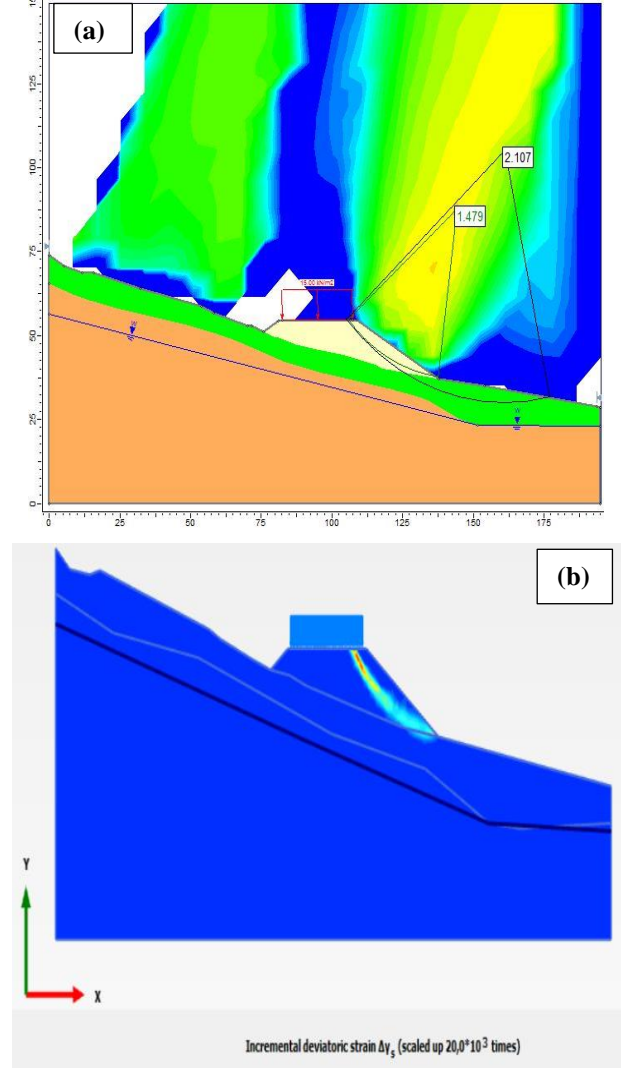
(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)

Yol güzergahının geçtiği kesimde, zemin kotu düşük olduğu için bu kesimde dolgu ile geçilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Yol, uygun dolgu malzemesi ile teşkil edildiği halde dolgu ve trafik yükünden sonra hem statik hem de depremlı durumlarda stabilite probleminin yaşandığı ve güvenlik sayısının şartname kriterinin altında kaldığı tespit edilmiştir. Şekil 14.'te ki grafikte de gösterildiği üzere her iki yöntem güvenlik sayısı bakımından kıyaslandığında sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan güvenlik sayısı (GS) değeri daha düşük çıkmıştır.



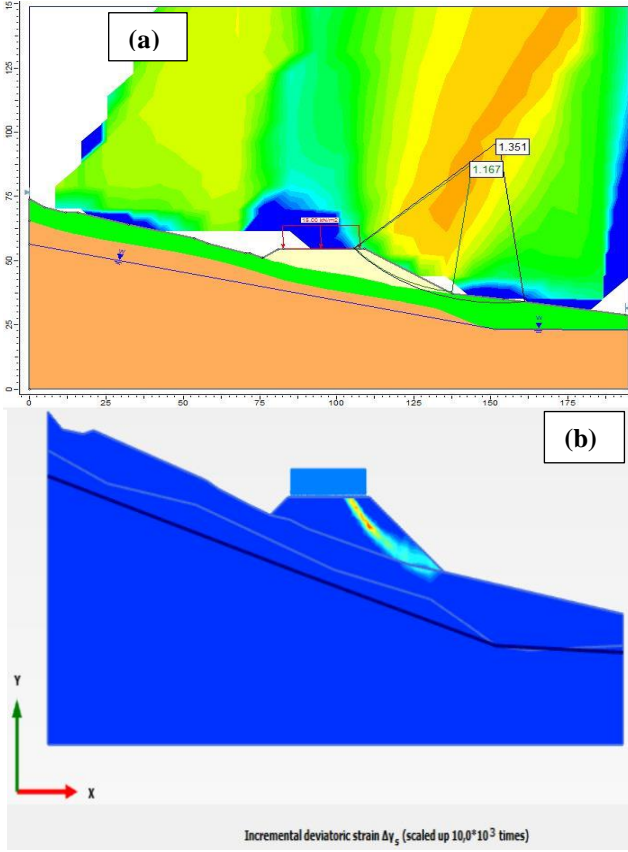
Şekil 14. Dolgu+ trafik yükü durumdaki güvenlik sayısı analizi

Şekil 15.'te dolgu ve trafik yükü geldikten sonra statik durumda limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kayma düzlemleri, Şekil 16.'da ise depremlı durumda oluşan kayma düzlemi gösterilmiştir. Başlangıç durumu ile kıyaslandığında her iki yöntemle belirlenen kayma düzlemi şevin tepesinden değil de dolgu şevinin olduğu kesimde oluşmaktadır. Bu da meydana gelen stabilite probleminin dolgu ve trafik yükünden kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 15. Dolgu+Trafik yükü statik durumu güvenlik sayısı analizinden elde edilen kayma dairesi görünümü

(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)

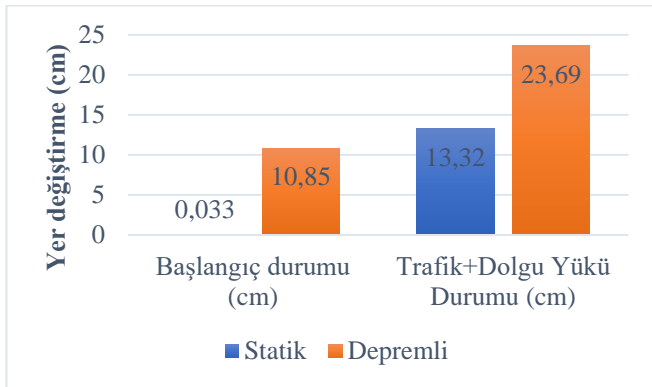


Şekil 16. Dolgu+Trafik yüklü depremlı durumda güvenlik sayısı analizinden elde edilen kayma düzlemi görünümü

(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)

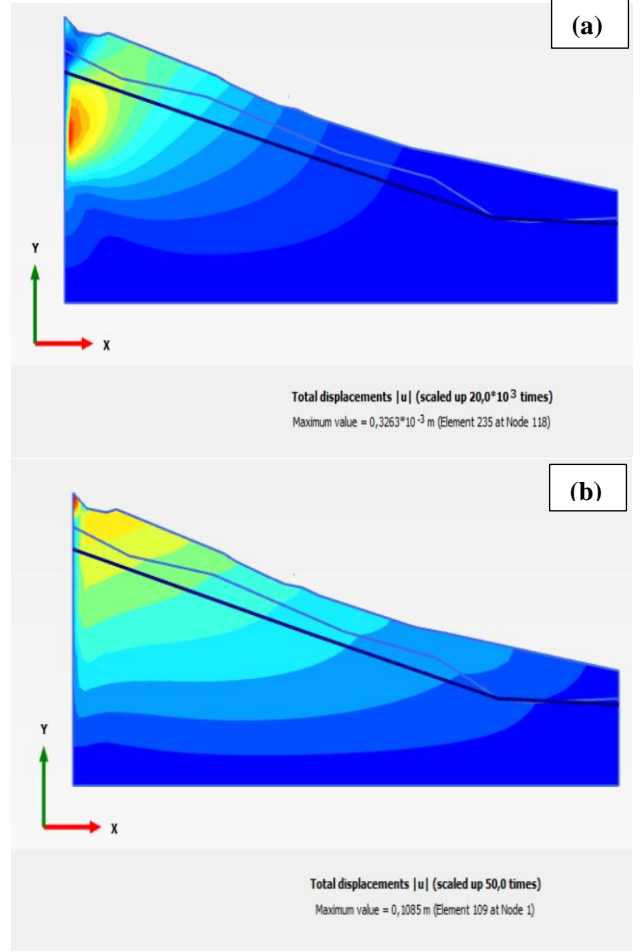
Deformasyon Analizi

Bir kütle hareketi sırasında zeminde düşeyde ve yatayda yer değiştirmeler meydana gelebilmektedir. Çalışmada ele alınan Km:14+360'deki şev kesitinin ne kadar yer değiştirdiğini tespit etmek ve performans limitleri ile kıyasını yapabilmek için sonlu elemanlar yöntemi ile deformasyon analizi yapıldı. Bu analizler Plaxis 2D 20 programı kullanılarak yapıldı. Şekil 17.'de başlangıç ve dolgu+ trafik yükünün geldiği durumdaki toplam yer değiştirme değerleri statik ve depremlı durum için belirtilmiştir.



Şekil 17. Km:14+360 şev kesitinde oluşan toplam deplasmanlar

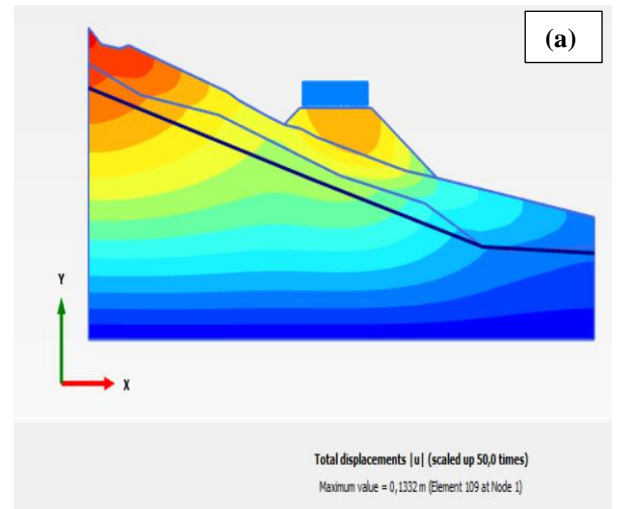
Mevcut durumda kayma düzleminde oluşan deformasyonlar Şekil 18.'de statik (a) ve depremlı (b) durum için gösterilmiştir.

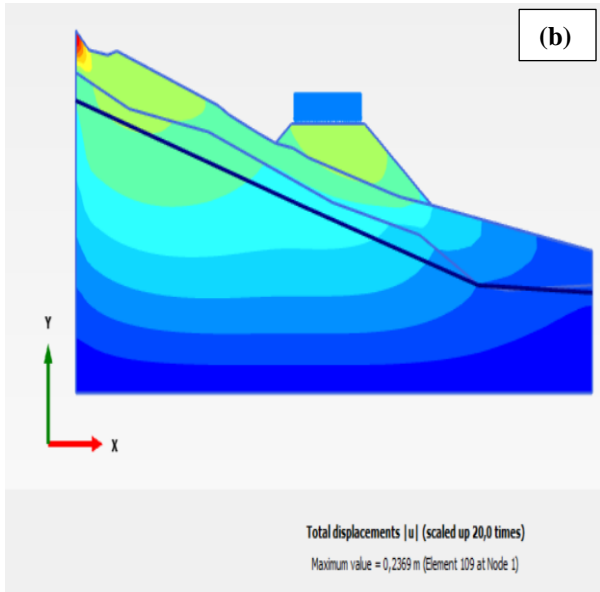


Şekil 18. Sonlu elemanlar yöntemi ile başlangıç durumunda toplam yer değiştirmelerin görünümü

(a) Statik durumda (b) Depremlı durumda

Dolgu ve trafik yükünden sonra kayma düzleminde oluşan deformasyonlar Şekil 19.'da statik (a) ve depremlı (b) durum için gösterilmiştir.





Şekil 19. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu+trafik yüklü durumda toplam yer değiştirmelerin görünümü

(a) Statik durumda (b) Depremlı durumda

Deprem durumunda bir dolgunun stabilize analizi yapıldığında, Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliğine göre, düşey ve yanal yer değiştirmelerin performans kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır [33]. Tablo 4.'te dolgu+trafik yüklü durumda dolguda oluşan düşey ve yatay yer değiştirmeler, Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği'ndeki şartname kriterleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 4. Depremlı durumda trafik+dolgu yükü durumunda oluşan yanal ve düşey yer değiştirmeler

Şekil değiştirme türü	Yanal yer değiştirme ΔL (cm)	Düşey yer değiştirme ΔV (cm)
Trafik+Dolgu Yükü Durumu	8	23,69
Şartname Kriteri	2,5	7,5

Tablo 4. incelendiğinde yanal ve düşey yer değiştirmelerin şartname kriterini aştığı gözlenmektedir. Deprem durumundaki duraysızlık kaynaklı şekil değiştirmeler için şartname kriterleri altında kalacak şekilde tasarım yapılması gerekmektedir.

Sonuçlar

Hazırlanan bu çalışma ile limit denge analizi ve sonlu elemanlar metodu uygulanarak karayolunda kazı çalışmaları sırasında meydana gelen kütle hareketinin statik ve depremlı analizleri yapılarak güvenlik sayıları ve göçme yüzeyleri açısından kıyası yapılmıştır. Başlangıç durumunda hem statik hem de depremlı durum için herhangi bir stabilite problemi gözlenmemektedir. Ancak Km:14+300-14+600

arası dolgu tabanının oturacağı kesim olması nedeniyle trafik yükü de ilave edilince dolgu şevinde stabilite problemi görülmektedir. Her iki yöntemle de yapılan güvenlik sayısı analizinde statik durumda şartname kriteri sağlanamamaktadır. Depremlı durumda ise sonlu elemanlar ile elde edilen güvenlik sayısı şartname kriterini sağlayamamaktadır. Sonlu elemanlar ile limit denge analizlerinden elde edilen sonuçlarda güvenlik sayısı değerleri birbirine yakın değerler gösterse de güvenlik faktörü açısından sonlu elemanlar yöntemi (Plaxis) sonuçları daha düşük çıkmış ve tasarım durumu için daha güvenli tarafta kalmıştır denilebilir. İki yöntemle de yapılan analizlerde şevdeki kayma düzlemi aynı bölgeden geçtiği söylenebilir. Ayrıca şevdeki yanal ve düşey yer değiştirmeleri belirlemek ve gerilme-deformasyon grafiğinin elde edilmesi sonlu elemanlar yöntemi ile mümkündür. Bu sebeple, şevin güvenlik katsayısını etkileyen birim deformasyona bağlı olan sonlu elemanlar yöntemini limit denge yöntemlerinden üstün kılmaktadır denilebilir.

Teşekkür

Proje Numarası MÜHENDİSLİK.23.010 olan bu çalışma, Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğünce desteklenmektedir.

Çıkar Çatışması

Bu makale Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı programında yürütülen doktora tezinden üretilmiş olup, çıkar çatışması içermemektedir.

Etik Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Kaynaklar

- [1] Kramer, S.L., (1996), Geotechnical Earthquake Engineering , 466.
- [2] Önalp, A. & Arel, E. (2004). Geoteknik Bilgisi II Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği, Birsen Yayınevi .
- [3] Schuster R.L., Highland L.M. (2007) The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66 pp 1-27.
- [4] www.afad.gov.tr , Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğal Kaynaklı Afet İstatistikleri, 2017
- [5] Das, B.M (1994). Principles of Geotechnical Engineering, Boston: Cengage Learning. Boston: Cengage Learning
- [6] Tekin, A. (2011), Sonlu Elemanlar ve Limit Denge Yöntemleri ile Şev Stabilite Analizi,(Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi
- [7] Keskin M.S., Laman, M. (2007) Sonlu Elemanlar Yönteminin Şev Stabilitesi Problemlerinin Analizinde Kullanılması, Çukurova Üniversitesi Müh. Ve Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt:22 Sayı:1.

- [8] Moudabel O.A., (2013) Slope Stability Case Study By Limit Equilibrium And Numerical Methods, Doctoral Dissertation, Oklahoma State University, Libya.
- [9] Bol E., Sert S., Özocak A., (2017) Kazıklı İksa Sistemi ile Şev Duraylılığının Sağlanması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(5), 860-870.
- [10] Huvaj, N., and Oğuz, E. A., (2018) "Probabilistic slope stability analysis: a case study", Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(5), 1458-1465.
- [11] Büyükağcı, C.Z., ve Işık, N. S., "Şev Duraylılığı Analizlerinde Limit Denge Yöntemleri, Eurocode 7 ve BS 8006 Standartlarıyla Hesaplanan Başarı Oranlarının Karşılaştırılması" TÜBAV Bilim Dergisi, 12(2), 18-29, 2019.
- [12] Gör M., (2021) Limit Denge Analizi (Bishop Metodu) İle Kütle Hareketinin Mekanizması ve Önlem Yapısının Analizi: Van İli Örneği, GÜFBED, 11(2): 597-608.
- [13] J.W. Mburu, A.J. Li, H.D. Lin, C.W. Lu, "Investigations of Unsaturated Slopes Subjected to Rainfall Infiltration Using Numerical Approaches—A Parametric Study and Comparative Review", Sustainability, 14, 14465,(2022) <https://doi.org/10.3390/su142114465>
- [14] S . Ullah, M. U. Khan, G. Rehman, "A Brief Review Of The Slope Stability Analysis Methods". Geological Behavior, 4, 73-77, (2020).
- [15] <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionImages/KGMImages/Haritalar/b9.jpg>
- [16] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/500bas>
- [17] TS 1900-2. (2006). İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 15-51.
- [18] ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981, In: Brown E.T., editor. ISRM suggested method: rock characterization, testing and monitoring, London: Pergamon Pres, 211pp.
- [19] TS EN ISO 17892-1 (2014), Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Su içeriğinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [20] TS EN ISO 17892-2 (2014), Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Birim hacim kütleinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [21] TS EN ISO 17892- 8 (2018), Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 8: Konsolidasyonsuz ve drenajsız Üç Eksenli Deney.
- [22] ASTM D2487 (2020), Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- [23] AASHTO T88 (2020), Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils
- [24] AASHTO T89 (2022), Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils
- [25] AASHTO T90 (2020), Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils
- [26] Karayolları Genel Müdürlüğü. "Araştırma Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesi". 2005.
- [27] Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5(1), 7-17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- [28] Zienkiewicz, O.C., 1977. The Finite-Element Method. 3rd Ed., New York, Mcgraw-Hill Book Co., 787p.
- [29] Marcuson, W.F., III (1981). Moderator's report for session on earth dams and stability of slopes under dynamic loads, Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Vol.3 p.1175.
- [30] <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>
- [31] Rocscience Inc. (2024). Slide v. 06 Software, 31 Balsam Ave., Toronto, Canada, <https://www.rocscience.com>
- [32] PLAXIS, 2020. User Manual. 2D V.20.02, Delft University of Technology&PLAXIS b.v., The Netherlands
- [33] Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri İle Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği, 2020. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/10/20201006M1-2-1.pdf>



Sıvı sönümleyici ile tarihi minarelerin deprem tepkisinin iyileştirilmesinin lineer dinamik analizi

Linear dynamic analysis of improving earthquake response of historical minarets with liquid damper

Muhammet Ensar YİĞİT^{1*}

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ensar.yigit@cbu.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0161-7144>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 07 Mayıs 2024
Revizyon 11 Eylül 2024
Kabul 23 Eylül 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Akışkanlar mekaniği, Ayarlı Sıvı Sönümleyici, Hidromekanik, Kültürel mirasın korunması, Tarihi Minareler.

ÖZ

Bu çalışmada tarihi camii minarelerinin yapısal değişikliğe gitmeden uygulanabilecek sıvı sönümleyici modelleri ile sismik tepkilerinin iyileştirilmesi araştırılmıştır. Literatürde sıvı sönümleyici ile minare davranışının incelendiği çalışmalara pek rastlanmamıştır. Sıvı sönümleyicinin etkisini görebilmek için minarenin mevcut hali ile petek kısmında ve şerefe kısmında sıvı sönümleyici bulunan modeller kıyaslanmıştır. Bu modellerin 1999 Düzce deprem kaydı ile doğrusal dinamik analizleri yapılmıştır. Birleşik Eularian-Lagrangian yaklaşımı ile akışkan-yapı etkileşimi kurulmuş, analiz süresince sudaki çalkantılar izlenmiştir. Analizler sonucunda, sıvı sönümleyici olarak su kütlelerini bütün olarak hareket edecek şekilde modellemek yerine, gözenekli veya çatalı bölmeler şeklinde yapmak sönümlemede daha etkili olduğu görülmüştür. Sıvı sönümleyici olan modellerde göreceki yer değiştirmelerde azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca sönümleme etkisi ve sıvı ağırlığı çekme gerilmelerinde (S_{max}) azalmaya sebep olurken basınç gerilmelerinde (S_{min}) artışa sebep olmuştur. Tüm modellerde en büyük asal basınç gerilmeleri ve en büyük asal çekme gerilmeleri minarelerin genellikle depremlerde hasar aldığı kaide ile gövde arasındaki bir alanda yoğunlaşmıştır. Analizler, minarenin sıvı sönümleyici ile iyileştirilmesinin depreme dayanıklılığını artırdığını, bu nedenle güçlendirme öncesinde akışkan-yapı etkileşiminin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 07 May 2024
Received in revised form 11 September 2024
Accepted 23 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Fluid mechanics, Historical Minarets, Hydromechanics, Protection of cultural heritage, Tuned Liquid Damper,

Doi: 10.24012/dumf.1479940

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In this study, the improvement of seismic responses of historical mosque minarets with liquid damper models that can be applied without structural changes was investigated. There are not many studies in the literature examining the behavior of minarets with liquid dampers. In order to see the effect of the liquid damper, the current version of the minaret was compared with the models with liquid dampeners in the upper cylindrical body part and balcony part. Linear dynamic analyzes of these models were made with the 1999 Duzce earthquake record. Fluid-structure interaction was established with the combined Eularian-Lagrangian approach, and water sloshing were monitored. As a result, instead of modeling the water mass to act as a whole as a liquid damper, making it in the form of porous or slatted partitions was more effective in damping. A decrease in relative displacements was observed in models with liquid dampers. In addition, the damping effect and liquid weight caused a decrease in tensile stresses (S_{max}) and an increase in compressive stresses (S_{min}). In all models, the largest principal compressive stresses and the largest principal tensile stresses are concentrated in an area between the base and the body, where minarets are usually damaged in earthquakes. Analysis shows that retrofitting the minaret with a liquid damper increases earthquake resistance, so fluid-structure interaction should be taken into account before strengthening.

Giriş

Birçok medeniyete beşiklik etmiş Anadolu coğrafyasında Osmanlı Devleti'nin önemli bir sancak beyliği olan Manisa silueti içerisinde camiler ve bu camilere ait minareler şüphesiz büyük önem taşımaktadır. Minareler estetik ve narin yapıları ile İslam kültürünün müstesna yapılarıdır (Şekil 1.a-b). Yıkıcı depremler sırasında bu kültürel miras eserleri ve binalar yok olma tehlikesi altındadır. Deprem sonrası yapılan keşif araştırmalarının çoğunda, yağma minarelerin yıkıldığı veya ciddi hasar gördüğüne dair raporlar yer almaktadır. Depremlerin ardından minarelerde

çok sayıda çökme ve yapısal hasar meydana gelmiş ve çoğu durumda can kaybı rapor edilmiştir (Şekil 1.c-d). Fakat minarelerin sismik davranışını ve performansını iyileştirme konularında sönümleyici kullanımı hakkında pek fazla araştırma yapılmamıştır. Yağma minarelerin dinamik davranışının anlaşılması, can güvenliğinin artırılması, tarihi anıtsal yapıların korunması ve güçlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Kültürel miras yapılarına müdahale ederken, bunların biçimini bozmayacak veya yapısal davranışlarını büyük ölçüde değiştirmeyecek şekilde olmalı ve geri döndürülebilir olmalıdır. Ayrıca kullanılacak malzemelerin anıtın inşa

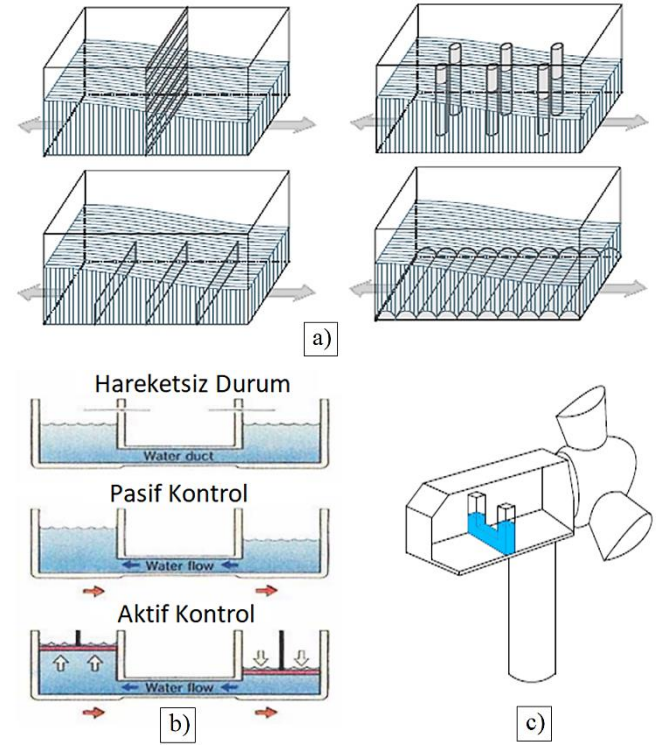
edildiği malzemelerle uyumlu olması gerekir. Geleneksel sismik güçlendirme tekniklerinin çoğunun yukarıdaki koşulları ihlal etmesi gibi bir dezavantajı vardır. Alternatif bir yaklaşım ise kültürel mirasın depremlerin etkilerine karşı sismik direncini arttırmak için yenilikçi sismik koruma sistemlerinin kullanılmasıdır [1], [2].



Şekil 1. Taş/tuğla yığma minare ve yıkılan minare örnekleri, a) Erzurum Muratpaşa Camii [3], b) Ordu Aziziye Yalı Camii [4], c) Bolu Şemsi Ahmet Paşa Camii [2], d) Kahramanmaraş Atik Camii [5].

Son yıllarda, düşük maliyetleri ve kurulum kolaylığı nedeniyle yapıların titreşimini azaltmak için dinamik titreşim sönümleyiciler olarak ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD) tasarımcıların ve araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Yapılarda birinci mod şeklinin dinamik tepkisi sıklıkla baskın olduğu için TLD'lerin çalkantı frekansı yapıların temel periyoduna göre ayarlanmıştır. TLD kısmen sıvıyla doldurulmuş (genellikle su) bir tanktır (Şekil 2.a). Tipik olarak, gerekli optimum sönümlenme seviyesini elde etmek için tek başına su yetersizdir. TLD'nin sönümlenmesini arttırmak için kullanılan yaklaşımlardan biri, tanka akış sönümlenme yapıları (bölmeler) yerleştirmektir. Geleneksel TLD'ler (CTLD) yalnızca tek bir çalkantı frekansına ayarlanabilir. Daha yüksek mod şekillerinin dinamik tepkisini kontrol etmek için çoklu ayarlanmış TLD'ler (MTLD) kullanılmaktadır. Ancak birden fazla TLD yüksek

bakım maliyetine ek olarak, daha büyük bir kurulum alanı gerektirir. Daha yüksek sönümlenmenin elde edilmesi, hacimsel verimliliğin artırılması, mimari uygulanabilirliğinin iyileştirilmesi ve geniş bir yapı yelpazesinde kullanılmasına yönelik önemli çalışmalar, pasif ayarlı sıvı damperlerin çeşitli şekillerde gelişmesine yol açmıştır (Şekil 2.b). Binaların, köprülerin, bacaların, rüzgâr türbinlerinin, havaalanı kontrol kulelerinin veya minare vb. yapıların titreşim kontrolü için farklı formlardaki ayarlı sıvı damperlerin kullanımına yönelik araştırma çalışmaları yapılmaktadır (Şekil 2.c) [6].



Şekil 2. Ayarlı sıvı sönümleyicilerin şematik gösterimi, a) farklı depo tasarımları [7], b) aktif-pasif kontrol [8], c) rüzgâr türbinlerinde sıvı sönümleyici örneği [9].

Yığma minareler doğal insan sesiyle okunan ezanın daha uzaklara yayılması için yüksek ve ekonomik olması için ince duvarlı inşa edilmiştir. Bu nedenle enine dayanımları zayıftır. Dinamik yüklere karşı çok hassastır. Yüksek bir vadiyi geçen demiryolu köprüleri, su kemerleri veya otoyol köprüleri gibi davranırlar. Aşağıda literatür taraması sonucu elde edilen güncel çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Hamelin (2007), çalışmasında belirli bir hedef tepki ivmesi için optimum düzeyde bir sönümlenme elde edilebileceğini ancak yapısal tepki bu hedef değerden saptıkça yapı-TLD sisteminin verimliliği önemli ölçüde azalacağını söylemiştir. Verimliliği arttırmak için, çalışmasında değişen kayıp katsayısına sahip çitallı bölmelerin uygulanabilirliği araştırmıştır. TLD, pratik olarak en yüksek saatlik yatay yapısal ivme aralığına karşılık gelen bir genlik aralığı için sinüzoidal uyarım altında sarsma masası testlerine tabi tutulmuştur. Bölme kayıplarındaki (CL) değişiklik Keulegan-Carpenter (KC) sayısı ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Bölmelerin geometrisinin serbest yüzey tepkisi, taban kesme kuvvetleri ve enerji dağıtımındaki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmasında değişen kayıp

katsayısına sahip çıtalı bölmelerin, geniş bir yapısal ivme aralığı boyunca optimuma yakın bir sönümleme seviyesini koruduğunu söylemiştir [10]. Doğangün ve ark. (2008), çalışmada, tarihi taş yığma minarelerin dinamik davranışını araştırmak amacıyla, 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri sırasında kaydedilen iki yer hareketi kullanılarak 20, 25 ve 30 metre yüksekliğinde üç temsili minare modelleri ve analiz etmiştir. Modellerin modal analizleri, yapısal periyotların ve genel yapısal tepkinin minare yüksekliğinden ve giriş hareketinin spektral özelliklerinden etkilendiğini göstermiştir. Minarelerin kritik noktalarında dinamik yer değiştirme ve aksel gerilme zaman geçişleri hesaplamıştır [2]. Türk (2013), çalışmada bir minarenin sismik güvenliğinin mevcut durumda ve önerilen güçlendirme yönteminin uygulanması sonrasında değerlendirilmesi amacıyla sonlu eleman modeli (SEM) ile analiz etmiştir. Güçlendirme yöntemi fiber takviyeli çimentolu matris (FRCM) malzemesi kullanılarak kritik kesitler kaplanması şeklindedir. SEM analizlerinden elde edilen mevcut minarede görülen hasar, minarenin papuç ve geçiş kısmında yer almakta iken kritik kesitlerin etrafına FRCM malzemesi sarıldıktan sonra yapılan analiz sonuçları, bu yöntemin sismik tepki açısından etkili görüldüğünü göstermiştir. Ayrıca diğer güçlendirme teknikleriyle karşılaştırıldığında minare gibi tarihi mirasın korunması açısından estetik çelişkiye yol açmadan uygulanabileceğini söylemiştir [11]. Novo ve ark. (2014), makalesinde, uygun şekilde tasarlandığı takdirde binalardaki deprem tepkilerini azaltabilen, ayarlanmış sıvı sönümleyici (TLD) sisteminin çalışmasına odaklanmıştır. Sönümleme etkisi, tank içindeki akışkanın serbest yüzeyinin salınımı (çalkalanma) dikkate alınarak gerçekleştirildiğini söylemiştir. Tabanında sinüzoidal bir uyarıya maruz kalan, farklı yer değiştirme genliklerine sahip izole bir TLD'nin davranışı sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Çalışmada Güney Avrupa ülkelerindeki modern mimari binaları temsil eden mevcut bir binanın sismik tepkisini iyileştirmede TLD'nin etkinliği de doğrusal dinamik analizlere dayalı olarak değerlendirilmiştir [12]. Hökelekli (2015), Hafsa Sultan Camii ve minaresinin deprem davranışlarını belirlemek amacıyla, öncelikle yapı üzerinde hasar tespiti ve taşıyıcı sistem özelliklerinin belirlenmesi gibi çalışmalar yapmıştır. Ardından, yapıların üç boyutlu (3B) sonlu eleman modelleri oluşturmuş ve deneysel yöntemlerle dinamik karakteristikleri belirlemiştir. Deneysel sonuçları, sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde kullanmıştır. Başlangıç ve iyileştirilmiş modeller üzerine deprem yüklemeleri uygulanarak, yapıların lineer deprem davranışını incelenmiştir. Ayrıca, minarenin doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinde Beton Hasar Plastisite (CDP) modeli kullanmıştır [13]. Patil ve Singh (2016), çalışmada, düz tabanlı olan ayarlı sıvı sönümleyicilerin (TLD) deprem sonrasında salınmaya devam ederek yapıyı yordüğünü söylemiştir. Buna alternatif olarak eğimli tabanlı olan bir TLD ile sismik titreşimleri azaltmadaki etkinliğini analiz etmiştir. Eğimli taban TLD'sini analiz etmek için eşdeğer düz tabanlı sıvı sönümleyici kullanılmıştır. TLD'deki yapıyı ve sıvıyı modellemek için sonlu elemanlar yöntemi (SEM) kullanılmıştır. Bilgisayar programlama ile yapının tepkisini, tanktaki sıvı çalkantısını ve birleşik akışkan-yapı etkileşimini incelemek için bir kod geliştirmiştir. Çalışmada elde ettiği gözlemler, eğimli

tabanlı TLD'nin düz tabanlı TLD'ye göre daha az miktarda sıvı kullandığını göstermektedir. Ayrıca eğimli alt TLD'nin verimliliğinin, uygun şekilde ayarlanması durumunda artırılabilirliği de gözlemlemiştir [14]. Pekgökgöz ve Taş (2017), çalışmada, betonarme yüksek bir minare üzerinde ayarlı kütle sönümleyici (TMD) sisteminin etkisini incelemiştir. Rüzgâr kuvvetleri, kendini tekrarlayan yer hareketleri ve belirlenen deprem hareketleri altında minarenin dinamik davranışlarını araştırmıştır. Araştırma sonucunda TMD sistemi yerleştirilmiş minarenin kasırga etkisi altında sönüm değerinin normal bir minareye göre yaklaşık olarak 2,4 kat daha büyük olduğunu bulmuştur. Bu durum, sönümleyici sistemin yerleştirilmiş olduğu minarenin yatay yer değiştirmelerinin daha düşük seviyelerde kalmasını sağlamıştır. Ayrıca, TMD'lerin minarenin kendini tekrarlayan yatay yer hareketleri etkisinde yer değiştirme değerini azaltma ve titreşimin sönümlenmesine etkisinin yüksek olduğunu vurgulamıştır. [15]. Günaydın (2018), tarihi yapıların uzun vadeli sürdürülebilirliğinin, yapısal davranışlarının belirlenmesi ve gerekli onarım veya güçlendirme işlemlerinin uygulanmasıyla mümkün olabileceğini belirtmiştir. Yapının yapısal durumunu anlamak ve uygun müdahalelerde bulunmak kadar önemli olan bir diğer faktör ise, uygulanan onarım veya güçlendirme işlemlerinin yapının yapısal davranışına olan etkisidir. Ayrıca çalışmada, tarihi bir minarenin dinamik karakteristiklerini belirlemek için Deneysel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen dinamik özellikler, literatürde bulunan onarım öncesi verileriyle karşılaştırılmış ve olası farklılıkların analizi yapılmıştır. [16]. Hemmatia (2019), çalışmada açık deniz rüzgâr türbinlerinin aşırı titreşim tepkilerinin, ayarlanmış kütle sönümleyiciler (TMD) ve ayarlanmış sıvı sönümleyiciler (TLD) kullanarak değişimini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlar, dinamik tepkilerin tüm yapısal kontrol cihazlarıyla büyük ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Ancak TMD'ler operasyonel koşullarda daha verimliyken, TLD'ler durgun haldeyken daha iyi performans gösterdiğini söylemiştir. Ayrıca çalışmada daha büyük bir yüklenme koşulu ile dinamik tepkilerin verimli bir şekilde en aza indirildiği birleşik bir TLCD-TMD sisteminin olasılığını ve verimliliğini araştırılmasını vurgulamıştır [17]. Kamgar (2020), makalesinde zemin-yapı etkileşiminin, modifiye edilmiş ayarlı bir sıvı damper tarafından kontrol edilen tek serbestlik dereceli bir sistemin (Nagasaki havaalanı kulesi) tepkisi üzerindeki etkisi araştırmıştır. Kontrollü yapısal tepkiler farklı zaman adımlarında hesaplanmış ve kontrolsüz yapının tepkileriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak ise, modifiye edilmiş ayarlı sıvı sönümleyici sisteminin sismik tasarımının yapısal tepkileri azaltmada daha etkili olabileceğini söylemiştir [18]. Vafaei (2021) makalesinde, çoklu mod şekillerin titreşimini aynı anda azaltmak için değiştirilmiş bir TLD (MTLD) tanıtmıştır. MTLD'nin verimliliği, ölçekli 3 katlı bir yapı üzerinde gerçekleştirilen çeşitli sarsma masası testleri aracılığıyla göstermiştir. Serbest titreşim testleri, MTLD'nin üçüncü katın yer değiştirme tepkilerinin ortalama karekökünü CTLD'den 1.9 kat daha fazla azalttığını göstermektedir. Ayrıca, birinci rezonans frekansında, MTLD üçüncü katın tepe yer değiştirme tepkisini ve tepe ivme tepkisini CTLD'ye göre sırasıyla %44 ve %42 daha fazla azalttığını söylemiştir [19]. Konar ve Ghosh (2022), çalışmada sıvı sönümleyicilerin

tasarımına odaklanarak, yapısal tepkiyi azaltmak için çeşitli konfigürasyonlardaki ayarlanmış sıvı sönümleyiciler üzerine sistematik bir inceleme yapmıştır. Farklı tipteki ayarlı sıvı damperlerin avantajları ve uygulanabilirliği, gerçek hayattaki kurulumlarıyla birlikte vurgulanmıştır. Ayrıca çeşitli ayarlanmış sıvı sönümleyici şekillerinin geliştirilmesindeki boşluklar ve gelecekteki gelişmelerin kapsamından da bahsedilmiştir [20]. Hu ve ark. (2023), çalışmada havaalanı kontrol kulelerinin rüzgârdan kaynaklanan titreşim kontrolü için sıvı içeren etkili bir çözüm sağlamak amacıyla, yeni bir üçlü sürtünmeli sarkaç ayarlı sıvı sönümleyici (TFPTLD) önermekte ve TFPTLD'lerin tasarımını kolaylaştırmak için kontrol talebi odaklı bir tasarım çerçevesi oluşturmuştur. Önerilen talep odaklı tasarım yöntemini takiben TFPTLD, aynı sıvı kütlmesine sahip geleneksel TLD'lere göre daha yüksek etkinlik, daha büyük frekans bant genişliği ve daha sağlam rüzgâr kaynaklı titreşim kontrolü sergilediğini söylemiştir. Üçlü sürtünmeli sarkaç, küçük bir kurulum alanı gerektirdiği bu da sıvı tanklarının günlük işlevini sürdürmek amacıyla titreşim kontrolü için kapsamlı bir şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir [21].

Kapsamlı literatür taramasında, araştırmacıların tarihi moloz taş veya tuğla minarelerin statik ve dinamik analizlerini çeşitli teknikler kullanarak araştırdıkları görülmektedir. Zamanla bu yapılar dış etkenler sonucu sismik tepkileri kötüleşmiştir. Bu durumu iyileştirmek için ayarlı kütle sönümleyici veya tabandan sismik yalıtkan uygulamaları yapıldığı görülmüştür. Doğrudan bir minare üzerinde ayarlı sıvı sönümleyici uygulamasına rastlanmasa da fabrika bacası, türbin kulesi veya köprü ayaklarında uygulamaları vardır. Birleşik Eulerian-Lagrangian yaklaşımı, akışkan-yapı etkileşimini en iyi şekilde temsil eder ve diğer akustik eleman-yapı etkileşimi modellerinde mevcut olmayan özellikler olan kanal içindeki su çalkalanması, potansiyel taşma ve dökülmenin gözlemlenmesine olanak tanır. Bölüm 3'de seçilen tarihi minare, kesme taş ve tuğla birimlerine göre ayarlanmış malzeme modeli kullanmıştır. Mevcut durumuyla birlikte üç farklı model yıkıcı bir deprem kaydı kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Materyal ve yöntem

Minare-akışkan etkileşimi için Eulerian-Lagrangian birleşik yaklaşımının formülasyonu

Eulerian-Lagrangian Birleşik Yaklaşımı hem daha geniş mekânsal bağlamı hem de bireysel elemanların davranışlarını dikkate alarak yapılar içindeki karmaşık etkileşimleri araştırmak için kullanışlı bir yöntemdir. Bu kapsamlı analiz, yapıların güvenliği, bütünlüğü ve risk değerlendirmesiyle ilgili bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olur. Akışkanlar dinamiği ve sürekli ortam mekaniği bağlamında Euler ve Lagrange tanımları, malzemelerin hareketini ve davranışını analiz etmek için kullanılan iki temel yaklaşımdır [22].

Eulerian tanımlamada odak noktası konumdaki belirli noktalar ve denklemler bu sabit konumlarda gözlemlenen özelliklere göre formüle edilir. Euler yaklaşımı, noktalarda hız, basınç veya sıcaklık gibi değişkenlerin zaman içinde nasıl değiştiğini izler. Buna karşılık Lagrangian tanımlama, bir malzemenin bireysel parçacıklarının veya elemanlarının hareketini takip eder. Burada her parçacık konumda ve

zamanda hareket ederken izlenir. Denklemler, belirli bir zamandaki konumu ve hızı göz önünde bulundurularak, her bir parçacıkla ilişkili özelliklere dayalı olarak formüle edilir [22].

Lagrangian (maddesel) ve Eulerian (uzaysal) zaman türevleri arasındaki bağlantı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{D\Phi}{Dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + v \cdot (\nabla\Phi) \quad (1)$$

Burada, Φ : isteğe bağlı çözüm değişkenini, v : malzeme hızını, $D\Phi/Dt$: maddesel türev operatörü ve $\partial\Phi/\partial t$: uzaysal zaman türevini temsil eder. Başlangıçta Lagrange çerçevesinde formüle edilen kütle, momentum ve enerjiye ilişkin korunum denklemleri, Benson and Ozakawa, 1997 'da ayrıntılı olarak belirtildiği gibi Euler korunum denklemlerine dönüştürülür [23].

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + v \cdot (\nabla \cdot \rho) + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot (\nabla \cdot v) = \frac{1}{\rho} (\nabla \cdot \sigma) + b \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + v \cdot (\nabla e) = \sigma : D \quad (4)$$

Burada, ρ : yoğunluğu, σ : Cauchy gerilimini, b : yapısal kuvvetlerinin vektörünü, e : şekil değiştirme enerjisini ve D : şekil değiştirme hızını temsil eder. Euler denklemleri (Denklemler 2 ile 4), kapsayıcı formda aşağıdaki gibi yeniden formüle edilebilir [22], [24]:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial\rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (6)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (ev) = \sigma : D \quad (7)$$

Euler hareket denklemleri (5)-(7) genel formda aşağıdaki gibidir.

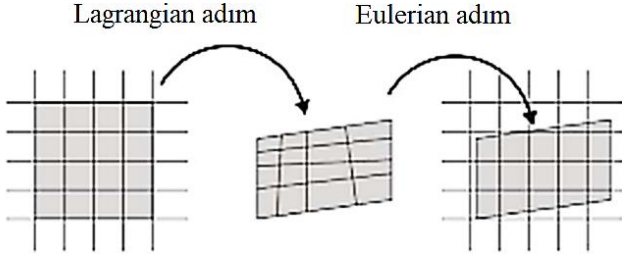
$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla \cdot \phi = S \quad (8)$$

Burada, ϕ : akım fonksiyonunu ve S : kaynak terimini temsil eder. Denklem (8) iki denkleme bölünür ve referansta açıklandığı gibi operatör bölme kullanılarak sırayla çözümlürse [24]:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = S \quad (9)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla \cdot \phi = 0 \quad (10)$$

elde edilir. Denklem (9), Lagrange adımını ifade eden kaynak terimini içerirken Denklem (10), Euler adımını simgeleyen konvektif terimi içerir. Bu bölme operatörünün görsel bir tasviri Şekil 3'te sunulmaktadır.



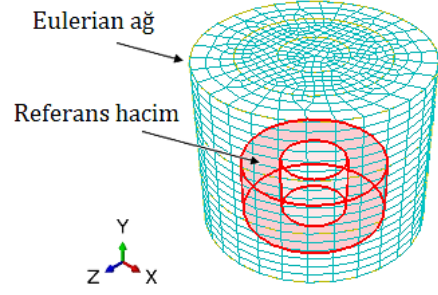
Şekil 3. CEL formülasyonu bölünmüş operatör kullanımı.

Denklemleri (10) çözmek için Lagrangian adımından gelen bozuk ağı, sabit Euler ağına taşınır ve komşu elemanlar arasında aktarılan malzemenin hacmi hesaplanır. Kütle, gerilim ve enerji gibi Lagrangian çözüm parametreleri, bitişik elemanlar arasındaki malzeme akışını sağlayacak şekilde değiştirilir. Sanal iş prensibi, Bathe, 1996 'da anlatıldığı gibi Lagrangian adımında kullanılır [25].

$$\int_v \rho a \cdot \delta u dv + \int_v \sigma : \delta \epsilon dv = \int_s \tau \cdot \delta u dS + \int_v \rho b \cdot \delta u dv \quad (11)$$

Burada, δu : sanal yer değiştirme, $\delta \epsilon$: sanal yer değiştirmelerden kaynaklanan sanal şekil değiştirme, a : uzaysal ivme ve τ : yüzeysel çekimi göstermektedir. Lagrangian adımında, güncellenmiş Lagrangian formülasyonunu kullanmak daha uygundur. Çünkü Euler yaklaşımındaki konfigürasyona karşılık gelmekte ve t zamanındaki referans konfigürasyon seviyesine ayarlanmaktadır. Bununla birlikte, Denklem (11)'de açıklandığı gibi cismin $t+\Delta t$ 'deki konfigürasyonunu tahmin etmek genellikle zordur. Ayrıca, $t+\Delta t$ 'deki Cauchy geriliminin belirlenmesi basit değildir, zira bu sadece t 'deki Cauchy gerilimine gerilim artışının eklenmesiyle elde edilememektedir. Bu karmaşıklık, malzeme rijit gövde dönmelerine maruz kaldığı için Cauchy gerilim tensörünün bileşenlerinin değişmesi nedeniyle ortaya çıkar. Bu zorlukların pratik olarak üstesinden gelmek için Green-Lagrange gerilim tensörü ve ikinci Piola-Kirchoff gerilim tensörü gibi alternatif gerilim ve gerilim ölçümleri devreye girmektedir. Bu ölçümler, malzemenin deformasyon altındaki davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için sanal yer değiştirmeler (Denklem 11) prensibinde kullanılır [26].

Euler ağını içeren simülasyonlar bağlamında malzemelerin varlığını veya dağılımını anlamak için hacim oranı (VF) adı verilen bir parametre tanımlanmıştır [27]. Bu parametre esas olarak Eulerian ağındaki malzemelerin kapladığı hacmin toplam hacme oranını temsil eder. Hesaplamaya başlamak için araştırmacıların başlangıç hacim oranını belirlemeleri gerekmektedir. Bu başlangıç hacim oranı, araştırmacıların malzemelerin dağılımını ve varlığını doğru bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanıyan hayati bir referans noktasıdır. Şekil 4 bu referans hacminin görsel bir temsilini sağlayarak araştırmacıların Euler ağı içindeki ilk konfigürasyonu anlamalarına yardımcı olmaktadır [22].

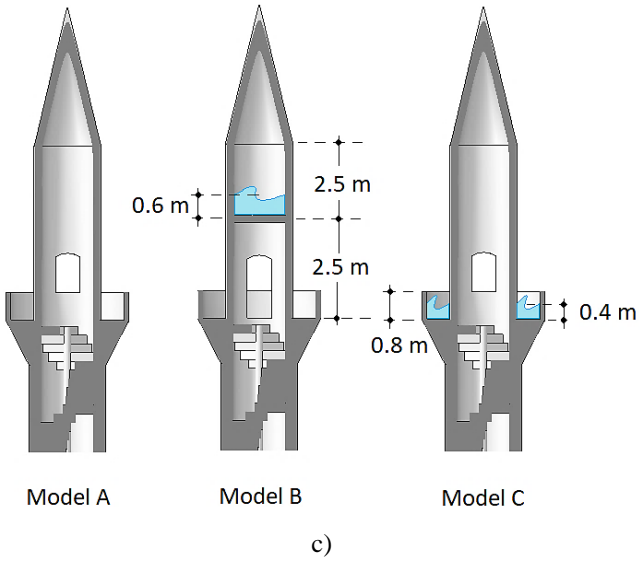
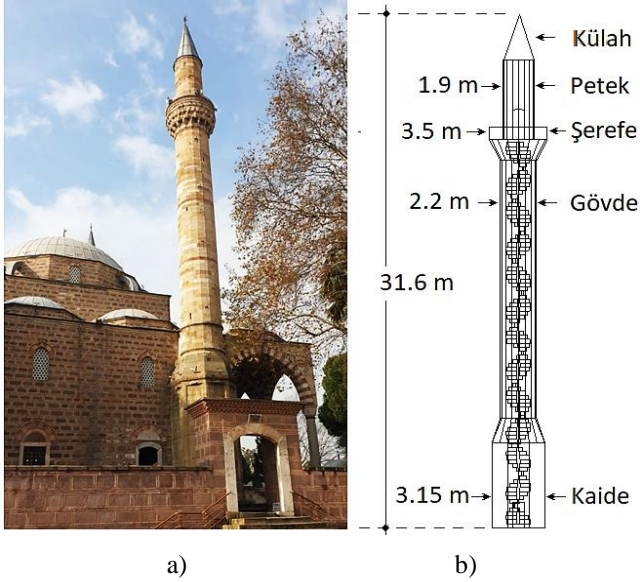


Şekil 4. Sonlu eleman analizinde hacim oranları.

Durum analizi

Manisa Sultan Camii minaresi lineer dinamik analizi

Sultan Camii Klasik Osmanlı Külliye Mimarisinin kültür ve sosyal yaşamın görkemli bir örneği olan bu külliye, Kanuni Sultan Süleyman'ın annesi Ayşe Hafsa Sultan tarafından Hicri 929, Miadi 1522' de yaptırılmıştır. Camii ve ona bağlı binaların bazıları 1522'de, hamam 1538'de, darüşşifa ise 1539'da tamamlanmıştır [28]. Şekil 5.a'da bu camii'ye ait minarenin görseli verilmiştir [29]. Bu çalışmada akışkan ile tarihi minarenin deprem tepkisinin iyileştirilmesinin incelenmesi amacıyla Şekil 5.c'de şematik olarak verilen üç farklı model ele alınmıştır. Bunlardan Model A; hali hazırdaki içinde akışkan sönmüleyici olmayan durum, Model B; petek bölgesinde inşa edilen betonarme tabliye ile içinde akışkanın çalkantısına izin veren bir hazne oluşturulması (H=60 cm) durumu, Model C ise hali hazırda bulunan minare şerefesinin alt ve yan yüzeylerin geçirimsiz hale getirilmesi, üstünün ise çevre şartlarından korumak için kapatılarak yarısına kadar (H=40 cm) akışkan doldurulduğu durumdur. Sultan Camii minaresinin tabanı 3.15 m çapında, yüksekliği ise 5.30 m'dir. Sekiz köşeli kaide üzerinde bulunan prizma altı 3.15 m, üstü 3.20 m çapında, 1.5 m yüksekliğinde ve on altı köşelidir. Silindirik gövde bitiminde, 0.5 m genişliğinde sahanlık ve 0.8 m korkuluk yüksekliği olan şerefe vardır. Korkuluk duvarı kalınlığı 0.12 m, merdiven basamak yüksekliği 0.25 m alınmıştır. Şerefe üstünde yüksekliği 5.0 m olan petek, tepe noktasında ise yüksekliği 4 m külah yer almaktadır. Tüm bu yapısal bileşenler ile minare 31.60 m uzunluğa ulaşmaktadır. Hava payı sismik etkiler dikkate alındığında oluşan çalkantının taşmaması için hazne yüksekliğinin %50'si olarak kabul edilmiştir. Diğer boyutlar Şekil 5.b,c'de gösterilmiştir [30].



Şekil 5. a) Sultan Camii minaresinin fotoğrafı [29], b) Minare teknik resmi, c) İnceleme modelleri.

Minare malzeme özellikleri

Camii minaresine ait mekanik özellikler, röleve ölçümleri, malzeme testleri ve kalibrasyon Hökelekli, 2015 tarafından doktora tezinde ve Nohutçu ve ark., 2017 tarafından yapılan araştırma makalesinde paylaşılmıştır [13], [30]. Minareyi oluşturan taş yapı malzemesi özellikleri ve sıvı sönmüleyici olarak kullanılan suyun malzeme özellikleri Tablo 1.'de verilmiştir [31-35]. Ayrıca referans alınan bu iki çalışmada minarede yapısal sönmü oranı 0.81 olarak verilmiştir.

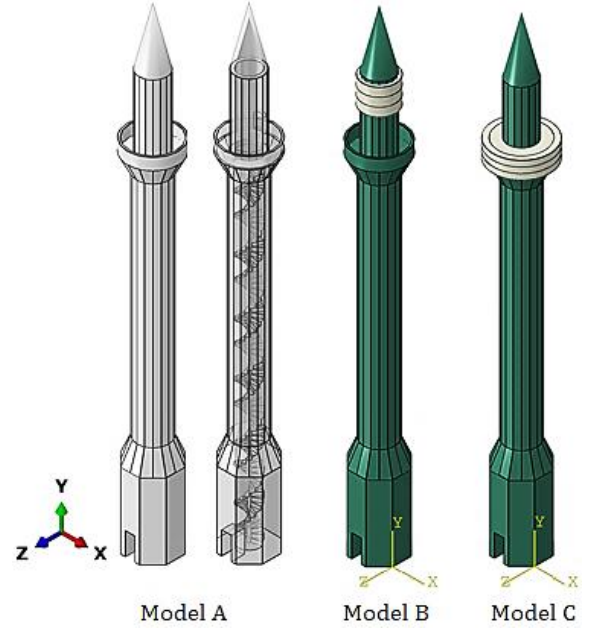
Tablo1. Minare ve sıvı sönmüleyici malzeme özellikleri.

Malzeme	Kesme Taş	Akışkan
Yoğunluk (kg/m ³)	2100	1000
Elastisite Modülü (MPa)	7700	-
Poison Oranı	0.17	-
Sesin Sudaki Hızı (m/s)	-	1450
Dinamik Viskozite (N.s/m ²)	-	1.002x10 ⁻³

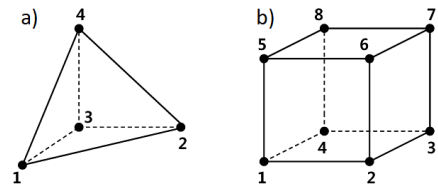
Minare birleşik Eulerian-Lagrangian yaklaşımı ile sonlu eleman modeli

Sultan Camii'nde iki adet minare vardır, Bunlar avluya yakın sağ ve solda bulunur. Özdeş bu iki minare camii gövdesinde bağımsız hareket etmektedir. Kaide, gövde, şerefe ve kûlah ve merdivenin 3B katı modeli ve sonlu elemanlar modeli (SEM) ABAQUS paket programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 6.) [36]. Makro modelleme tekniği ile malzeme özellikleri belirlenmiş, taş ve harç için elastisite modülü, poison oranı ve yoğunluk ortak olarak tanımlanmıştır.

Yapının sonlu elemanlar modelinde dört düğüm noktalı üçgen prizma eleman (C3D4) ve akışkan için ise 8 düğüm noktalı, azaltılmış entegrasyonlu kübik eleman (C3D8R) tipi kullanılmıştır. Katı elemanlar arasında, minare (C3D8) 2x2 entegrasyon noktası ve akışkan eleman (EC3D8) 2x2 entegrasyon noktası içerir. Akışkan ile minare yapısı arasında, basınç kuvvetini normal yönde aktarabilen ancak çekme kuvvetini aktaramayan sert bir temas yüzeyi ve sürtünme sebebiyle teğetsel yönde kuvvet aktarabilen bir temas yüzeyi tanımlanmıştır (Şekil 7). Hökelekli, 2015 çalışmasında yakınsaklık analizi ile minarenin sonlu elemanlar modelinde 0.20 m uzunluğunda ağ aralığı belirlemiş ve buna göre yapılan Modal Analiz ile elde ettiği ilk üç frekans değerleri ise $f_1=1.3426$, $f_2= 7.0419$ ve $f_3= 14.1722$ olarak verilmiştir [13].

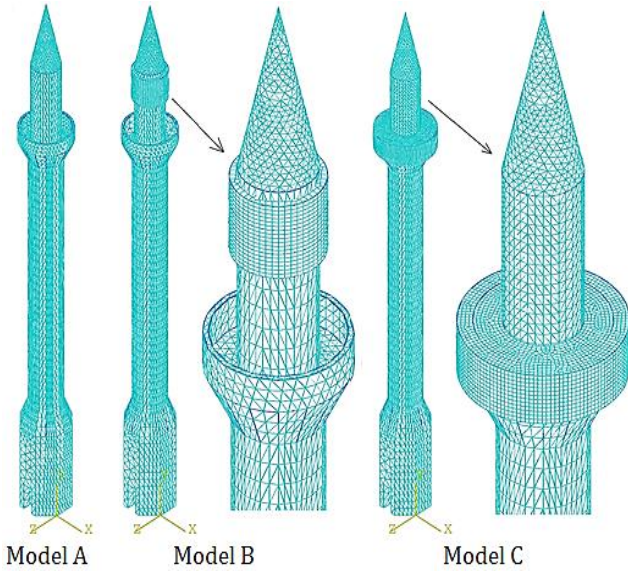


Şekil 6. Hafsa Sultan Camii minaresi 3B sonlu eleman modeli.



Şekil 7. a) C3D4 üçgen prizma yapı elemanı, b) C3D8R küp akışkan elemanı [34].

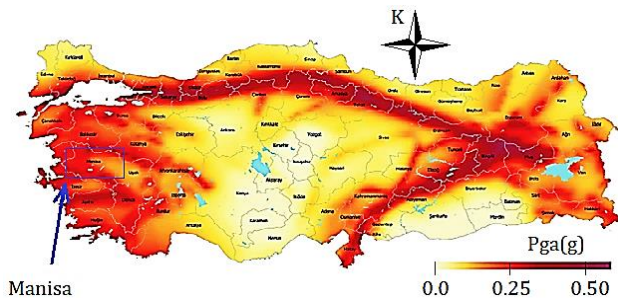
Model A 'da 25371 katı eleman ve 7408 adet düğüm noktası, Model B 'de 29781 katı eleman ve 12081 adet düğüm noktası ve Model C 'de 32583 katı eleman ve 14606 adet düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 8). Sınır şartı olarak minare tabanı ve camiye bitişik duvarı sabit mesnet olarak kabul edilmiştir. Deprem ivme kaydı yapıya x-x doğrultusunda tabandan uygulanmıştır. Diğer y-y ve z-z yönlerinde ise harekete izin verilmemiştir.



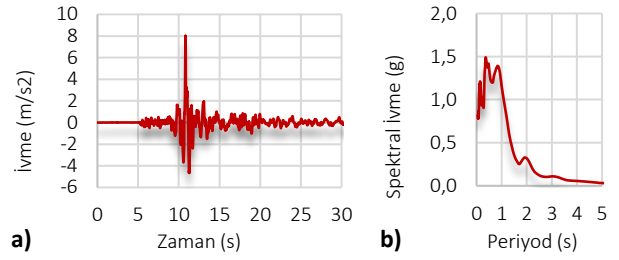
Şekil 8. Hafsa Sultan Camii minaresi sonlu eleman ağı.

Kullanılan sismik kayıtlar

Hafta Sultan Camii'nin bulunduğu Manisa şehir merkezi Türkiye'nin batısında deprem hareketliliği yoğun olan bölgede bulunmaktadır (Şekil 9), [37], [38]. Sıvı sönümleyicini etkisini görebilmek için şiddetli bir deprem olan Düzce depremi (IX, Çok Yıkıcı) kaydı ile yapı analiz edilmiştir. Türkiye'nin Düzce ilinde 12 Kasım 1999'da yerel saatle 18:57'de (16:57 UTC) aletsel büyüklüğü 7.2 olan Düzce depremi vuku bulmuştur. Yaklaşık 30 saniye süren deprem büyük hasara yol açmış, 845 kişi ölmüş, 4948 kişi de yaralanmıştır. Şiddeti IX (Çok Yıkıcı) olmuştur. Deprem merkez üssü 40,768 ve 31,148 koordinatlarında olup moment büyüklüğü 6.2'dir ($M_b=6.2$, $M_s=7.4$). Sismik moment $M_0=4.5 \times 10^{19}$ Nm 'dir [39]. Bu çalışmada Şekil 10'da gösterildiği gibi 1999 Düzce depremi 1401 numaralı istasyondan elde edilen Doğu-Batı (E-W) bileşenini kullanılmıştır.



Şekil 9. Türkiye sismik haritası ve minarenin konumu.



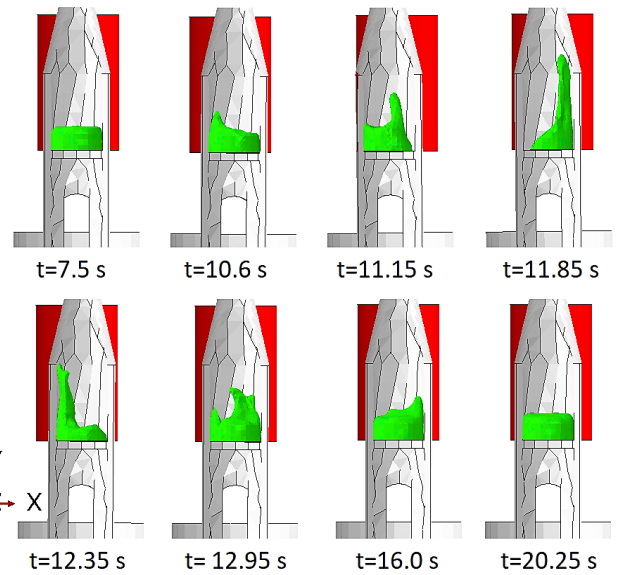
Şekil 10. Düzce depremi Doğu-Batı bileşenine ait a) İvme-zaman grafiği, b) Spektral ivme-Periyod grafiği [37].

Bulgular

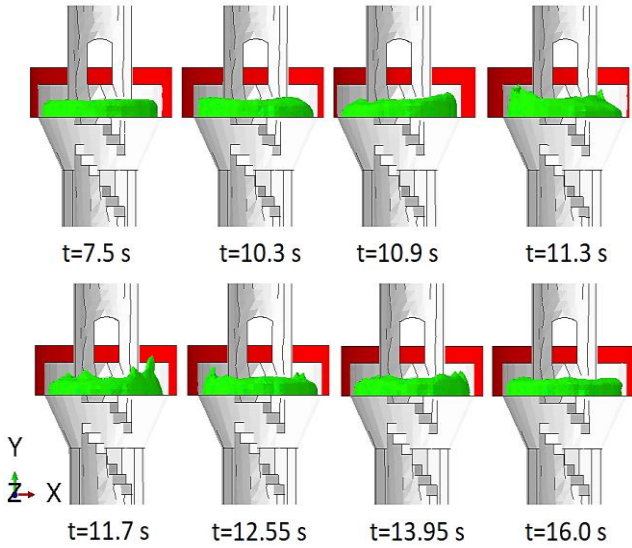
Analiz sonuçları üç farklı bölüm olarak verilmiştir. Bunlardan ilki petekdeki (Model B) ve şerefedeki (Model C) akışkanın deprem etkisinde çalkantısını gösteren farklı t sürelerindeki su yüzey şekilleri, ikincisi minare tepe noktasının yer değiştirme-zaman grafikleri ve minarenin en büyük fark yer değiştirme kontür diyagramı, üçüncüsü ise minarenin en fazla zorlandığı kaide üstüne denk gelen bölgeden seçilen noktaların en büyük asal çekme-zaman ve en büyük asal basınç-zaman grafikleri ve bu gerilmelerin en büyük olduğu ana ait kontür diyagramlarıdır.

Sıvı sönümleyici çalkantısı

Sıvı sönümleyici bulunan Model B ve Model C için çalkantı sonucu oluşan su yüzeyleri Şekil 11. ve Şekil 12. 'de verilmiştir. Model B incelendiğinde deprem etkisinde petekte bulunan su kütlesi (yeşil renkle gösterilen) harekete geçmiş ve çalkantı su yüksekliğinin yaklaşık 3 katına kadar yükselmiştir. Model C'de ise deprem etkisindeki çalkantı yüksekliği su yüksekliğinin yaklaşık 1 katı kadar olduğu gözlenmiştir. Model B'de sıvı sönümleyici petek duvarları arasında bir bölme duvarı veya geçişi sınırlayıcı bir bölgenekli diyafram olmadığı için bütün olarak hareket etmektedir. Deprem etkisinde sıvı petek iç duvarlarına çarparak bütün halde geri dönmektedir. Buda sıvının sönümleyici etkisini gösterememesine neden olmaktadır.



Şekil 11. Model B sıvı sönümleyici çalkantı yüzey şekilleri.



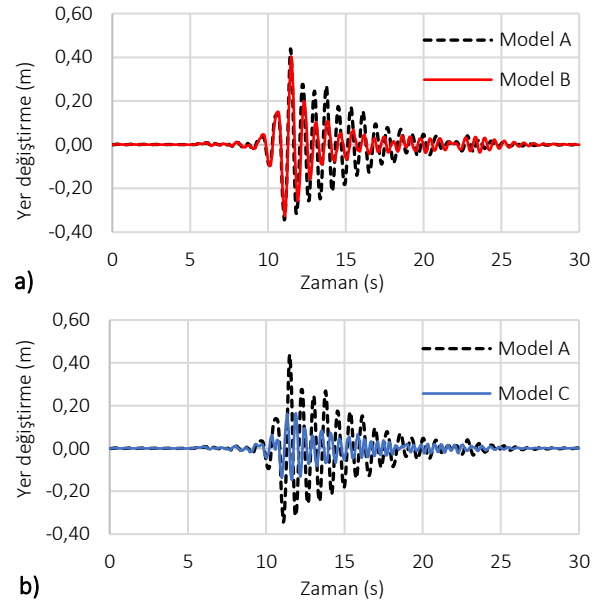
Şekil 12. Model C sıvı sönümleyici çalkantı yüzey şekilleri.

Model C’de su kütlesi petek dış duvarı ve şerefe iç duvarı arasında bir su halkası şeklinde olduğu için deprem salınımlarında hem şerefe duvarlarına hem de petek duvarlarına çarpmaktadır. Bir nevi bölme duvarı veya gözenekli diyafram diyebileceğimiz petek duvarları sıvının sönümleyici etkisini daha belirgin hale getirmektedir. Bu sonuçlar literatür bahsedilen makalelerde elde edilen sonuçlar ile uyumludur [10], [12], [20].

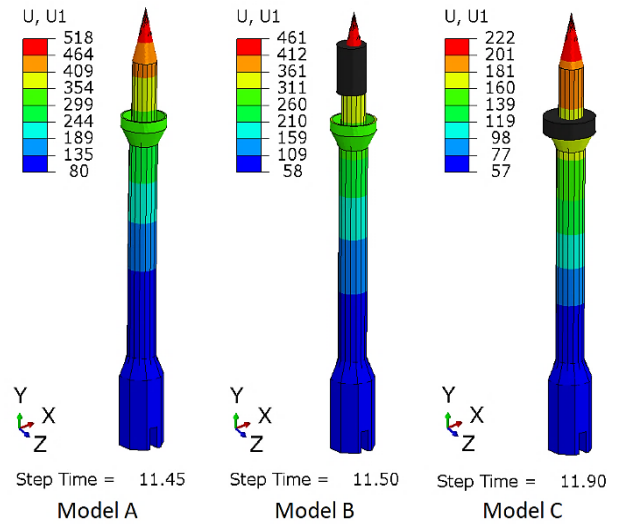
Yer değiştirmeler

Minare tepesi ile tabanı arasındaki yer değiştirme farkı Model A dayanak alınarak sıvı sönümleyici olan Model B ve Model C ile karşılaştırmalı yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 13.a.b’de gösterilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde Model B’deki sıvı sönümleyicinin etkisi Model C’ye göre sınırlı kalmıştır. Sıvı sönümleyici olmayan Model A’da tepe noktası en büyük yer değiştirme değeri 0.438 m iken Model B’de 0.403 m, Model C’de ise bu değer 0.165 m olarak ölçülmüştür.

Sıvı sönümleyici bulunan her iki model de Model A’ya göre minarenin salınımlarının genliğini grafikte 12s-20s arasında gördüğü üzere azaltmıştır. Her üç modelin en büyük göreceli yer değiştirme kontür diyagramları ise Şekil 14’de verilmiştir. Şekil 13 ve 14 de görüleceği üzere sıvı sönümleyici bulunmayan Model A’ya göre Model B’de kullanılan sıvı sönümleyici yöntemi göreceli yer değiştirmeyi %8, Model C’de kullanılan sıvı sönümleyici yöntemi ise göreceli yer değiştirmeyi %62 oranında azaltmıştır.



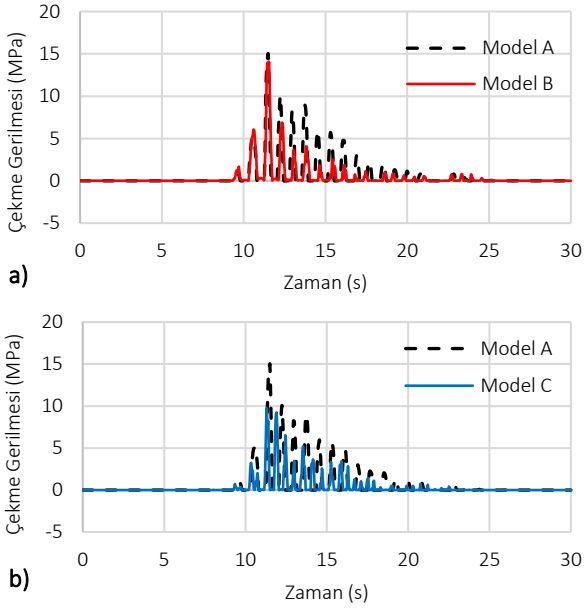
Şekil.13. Minare tepe noktası göreceli yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırması, a) Model A-B, b) Model A-C.



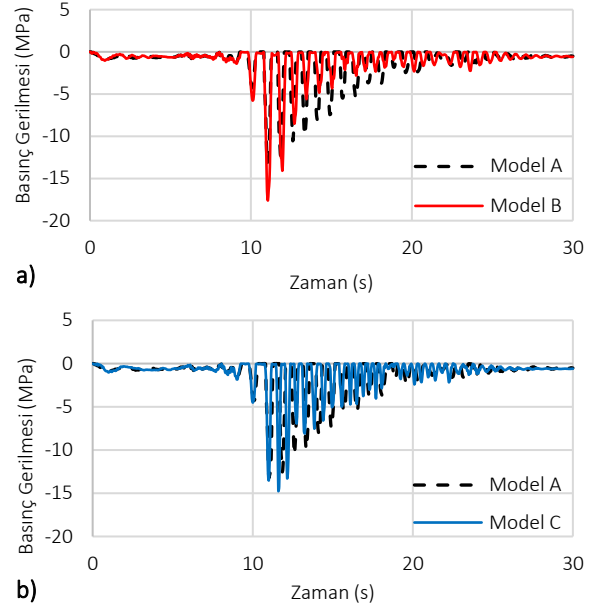
Şekil 14. Göreceli yer değiştirme kontür diyagramları (mm).

Gerilmeler

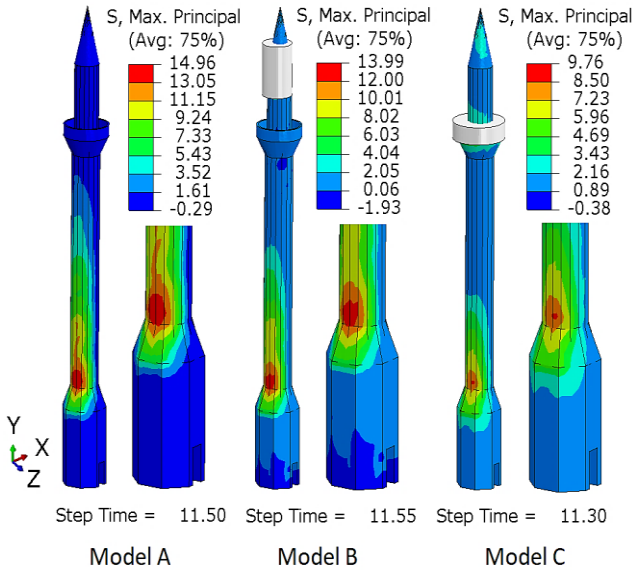
Sıvı sönümleyicilerin ağırlıkları Model B’de yaklaşık 10 kN, Model C’de ise 22 kN’dur. Buda minare üzerinde en büyük asal çekme gerilmelerin de azalış ve en büyük asal basınç gerilmelerinde artışa neden olacağı öngörülmektedir. Şekil 15’te verilen en büyük asal çekme gerilmeleri-zaman grafikleri (S_{max}) ve Şekil 16’da en büyük asal çekme gerilmeleri kontür diyagramları verilmiştir. Şekil 15 ve Şekil 16’da görüleceği üzere Model A’ya göre karşılaştırıldığında, Model B’de en büyük asal çekme gerilmeleri %6.48, Model C’de ise %34.76 oranında azaldığı gözlenmiştir. Model C’de sıvı ağırlığının yanı sıra sönümleme etkisiyle göreceli yer değiştirmedeki azalış asal çekme gerilmelerini daha fazla düşürmüştür. Şekil 17’de en büyük asal basınç gerilmeleri-zaman grafikleri (S_{min}) ve Şekil 18’de en büyük asal basınç gerilmelerinin kontür diyagramları verilmiştir.



Şekil 15. En büyük asal çekme gerilmeleri-zaman grafikleri karşılaştırması (S_{max}), a) Model A-B, b) Model A-C.



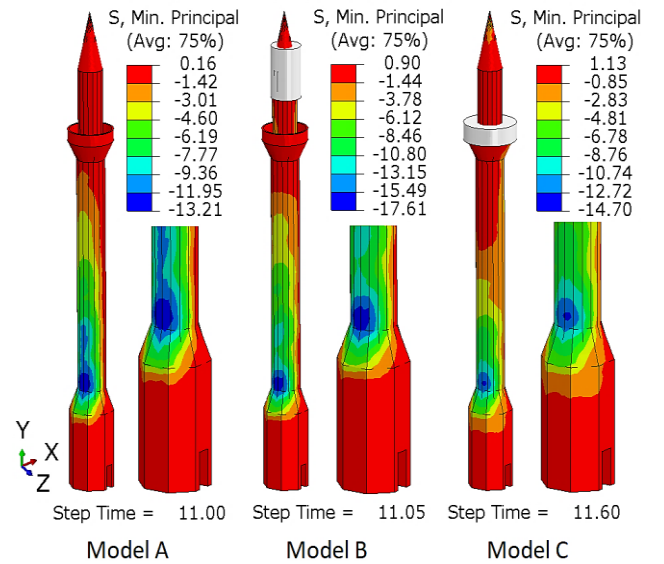
Şekil 17. En büyük asal basınç gerilmeleri-zaman grafikleri karşılaştırması (S_{min}), a) Model A-B, b) Model A-C.



Şekil 16. En büyük asal çekme gerilmeleri kontür diyagramları (MPa).

Model A'ya göre karşılaştırıldığında, Model B'de en büyük asal basınç gerilmeleri %33.3, Model C'de ise %11.27 oranında arttığı gözlenmiştir. Model B'de sıvı sönmüleyici minarenin yer değiştirmesini %8 azaltsa dahi (bk. Şekil 13.) sönmüleyici sıvı ağırlığı Model A'ya göre basınç gerilmelerinin en fazla çıkmasına sebep olmuştur.

Model C'deki sönmüleyici sıvı daha ağır olmasına rağmen yer değiştirmeleri %62 oranında azalttığı için basınç gerilmelerini Model B'den daha az olmuştur. Sıvı sönmüleyici ilave ağırlığı olmayan Model A'da ise en büyük asal basınç gerilmeleri en az olmuştur.



Şekil 18. En büyük asal basınç gerilmeleri kontür diyagramları (MPa).

Gerilmeler genellikle minarelerin depremden en fazla hasar aldığı kaide üstündeki geçiş bölgesi ile gövdenin alt kısmındaki bölgede yoğunlaşmaktadır. Literatür taramasında görülen yıkımlar bu bölgede oluşmuştur [2], [5].

Sonuçlar

Bu çalışmada Manisa Hafsa Sultan Camii minaresinin mevcut hali (Model A), petek kısmında (Model B) ve şerefe kısmında (Model C) yapısal değişikliğe gitmeden uygulanabilecek sıvı sönmüleyici modelleri ile sismik tepkilerinin araştırılması amacıyla doğrusal dinamik analizi yapılmıştır. Sıvı sönmüleyicinin etkisini görebilmek için 0.8g PGA değerine sahip 1999 Düzce D-B deprem kaydı kullanılmıştır. Kalibre edilmiş malzeme özellikleri ve

ölçüleri Hökelekli, (2015)'den alınan minarede akışkan olarak su kullanılmıştır [13]. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Birleşik Eularian-Lagrangian (CEL) yaklaşımı ile su çalkantısının deprem tepkisini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Modelin analizi ile deprem anında çalkalanma ve olası su taşması kolaylıkla gözlemlenebilmiştir.
- Sıvı sönümleyici uygulamasında tüm su kütesini serbest ve bütün hareket edecek şekilde (Model B) modellemek yerine gözenekli veya çıtalı bölmeler şeklinde su kütesinin salınımını kısıtlayacak modellemeler (Model C) daha etkili olmuştur.
- Petekte uygulanabilecek sıvı sönümleyicide su kütesinde çalkantı yüksekliği su seviyesinin yaklaşık üç katına çıkarken şerefede uygulanabilecek sıvı sönümleyicide bir katına çıkmıştır.
- Akışkan-yapı etkileşimi dikkate alındığında sıvı sönümleyici olan modellerde göreceli yer değiştirmelerde azalma gözlemlenmiştir.
- Sıvının sönümleyici etkisi ve sıvı ağırlığı en büyük asal çekme gerilmelerinde (S_{max}) azalmaya sebep olurken en büyük asal basınç gerilmelerinde (S_{min}) artışa sebep olmuştur.
- Tüm modellerde en büyük asal basınç gerilme dağılımları ve en büyük asal çekme gerilme dağılımları minarelerin genellikle depremlerde hasar aldığı kaide ile gövde arasındaki bir alanda yoğunlaşmıştır.
- Model A'ya göre Model B'de kullanılan sıvı sönümleyici yöntemi göreceli yer değiştirmeyi %8, Model C'de ise %62 oranında azaltmıştır.
- Model A'ya göre Model B'de en büyük asal çekme gerilmeleri %6.48, Model C'de ise %34.76 oranında azaldığı gözlenmiştir.
- Model A'ya göre Model B'de en büyük asal basınç gerilmeleri %33.3, Model C'de ise %11.27 oranında arttığı gözlenmiştir.

Bu konuda yapılabilecek farklı çalışmalar ise aşağıda listelenmiştir.

- Tarihi minarelerin boyutları her yapıya özeldir. Bu nedenle sismik performansın artırılmasında en uygun su yüksekliği ve hava payının belirlenmesi konusu araştırılabilir.
- İki veya üç şerefeli tarihi minareler veya betonarme minarelerin sıvı sönümleyici ile deprem tepkilerinin iyileştirilmesi incelenebilir.

Analizler, minarenin sıvı sönümleyici ile iyileştirilmesinin depreme dayanıklılığı önemli ölçüde artırdığını gösterdi. Bu nedenle tarihi minarelerin gelecek nesillere aktarılması için restorasyon veya güçlendirme seçeneklerinin yanı sıra akışkan-yapı etkileşiminin de dikkate alınması önerilmektedir.

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.

Kaynaklar

- [1] M. H. Baştürk, "Bursa Tarihi Yığma Minarelerin Dinamik Davranışların Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2013.
- [2] A. Doğangün, R. Acar, H. Sezen and R. Livaoğlu, "Investigation of dynamic response of masonry minaret structures," *Bull Earthquake Engineering*, vol. 6, pp. 505–517, April 2008.
- [3] Devleti Aliyye-i, "Erzurum Muratpaşa Camii", Accessed on: 16/01/2024, <https://www.devletialiyeyi.com/Zaman-Tuneli/murat-pasa-camii>
- [4] Tarih Gezisi, "Ordu Aziziye Yalı Camii", Accessed on: 16/01/2024, <https://tarihgezisi.com/camiler/aziziye-yali-camii-ordu/>
- [5] Anadolu Ajansı, "Gündem Asrın Felaketi", Accessed on: 16/01/2024, <https://www.aa.com.tr/tr/asrin-felaketi/elbistandaki-tarihi-atik-camisinin-minaresi-artci-depremler-sonrasinda-yikildi/2853966>
- [6] J. S. Love, T. C. Haskett, "Nonlinear modelling of tuned sloshing dampers with large internal obstructions: Damping and frequency effects," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 79, pp. 1-13, May 2018.
- [7] A. Vázquez-Greciano, A. A. López, N. Buratti and J. M. O. Herrera, "Magnetic Fields to Enhance Tuned Liquid Damper Performance for Vibration Control: A Review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 31, pp. 25–45, August 2024.
- [8] A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," *Wind and Structures*, vol. 2, no. 3, pp. 201-251, 1999.
- [9] M. H. Alkmin, M. V. G. de Moraes and A. T. Fabro "Vibration Reduction of Wind Turbines Using Tuned Liquid Column Damper Using Stochastic Analysis," *MOVIC2016 & RASD2016 Journal of Physics: Conference Series*, Southampton, United Kingdom, 3-6 July 2016, pp. 1-11
- [10] J. Hamelin, "The Effect of Screen Geometry on Performance of a Tuned Liquid Damper," Master Thesis, McMaster University, Hamilton, Canadian, 2007.
- [11] M. A. Türk, "Seismic Response Analysis of Masonry Minaret and Possible Strengthening by Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Materials," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, pp. 1-14, Jun 2013.
- [12] T. Novo, H. Varum, F. Teixeira-Dias, H. Rodrigues, S. M. Falcao, C. A. Campos and L. Guerreiro, "Tuned liquid dampers simulation for earthquake response control of buildings," *Bull Earthquake Engineering*, vol. 12, pp. 1007–1024, October 2014.
- [13] E. Hökelekli, "Manisa Hafsa Sultan Camii Deprem Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile

- İncelenmesi,” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2015.
- [14] G. R. Patil and K. D. Singh, “Evaluation of Sloped Bottom Tuned Liquid Damper for Reduction of Seismic Response of Tall Buildings,” *Journal of the Intuition of Engineers (India): Ser. A*, vol. 97, pp. 385–394, November 2016.
- [15] P. K. Pekgökgöz and G. Taş, “Ayarlı kütle sönümleyici yerleştirilmiş betonarme yüksek minarelerin dinamik analizi,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 32, no. 1, pp. 265–282, Jun 2017.
- [16] M. Günaydın, “Tarihi Bir Yığma Minarenin Onarım Sonrasındaki Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi,” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp. 381–395, Mayıs 2018.
- [17] A. Hemmatia, E. Oterkusa and M. Khorasanchib “Vibration suppression of offshore wind turbine foundations using tuned liquid column dampers and tuned mass dampers,” *Ocean Engineering*, vol. 172, pp. 286–295, January 2019.
- [18] Kamgar R, Gholami F, Sanayei HRZ, Heidarzadeh H. “Modified Tuned Liquid Dampers for Seismic Protection of Buildings Considering Soil–Structure Interaction Effects,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44, 339–354, 2020.
- [19] M. Vafaei, A. Pabarja and Alih SC, “An Innovative Tuned Liquid Damper for Vibration Mitigation of Structures,” *International Journal of Civil Engineering*, vol. 19, pp. 1071–1090, April 2021.
- [20] T. Konar and A. Ghosh, “A review on various configurations of the passive tuned liquid damper,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 29, no. 9, 1945–1980, March 2022.
- [21] X. Hu, Z. Zhao, K. Yang, W. Liao and Q. Chen, “Novel triple friction pendulum-tuned liquid damper for the wind-induced vibration control of airport control towers,” *Thin-Walled Structures*, vol. 182, pp. 1–13, January 2023.
- [22] A. Skrzat, “Application of Coupled Eulerian-Lagrangian Approach In Metal Forming Simulations,” *Scientific Letters of Rzeszow University of Technology-Mechanics*, vol. 84, no. 4, pp. 25–35, April 2012.
- [23] D. J. Benson and S. Okazawa, “Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193, no. 39–41, pp. 4277–4298, October 2004.
- [24] D.J. Benson, “A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 140, no 1–2, pp. 59–86, January 1997.
- [25] K. J. Bathe, “Finite element procedures.” 2nd ed. New Jersey, USA, Prentice Hall, 1996.
- [26] Belytschko T, Liu KW, Moran B, Elkhodary KI, “Non-linear Finite Element Analysis for continua and structures,” 2nd ed. New York, USA, Spi, 2014.
- [27] K. S. Al-Athel and M. S. Gadala, “Eulerian volume of solid (VOS) approach in solid mechanics and metal forming,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 200, issue 25–28, pp: 2145–2159, June 2011.
- [28] Türkiye Kültür Portalı, “Manisa’da Gezilecek yerler”, Accessed on: 23/01/2024, <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/manisa/gezilecek/yerler>
- [29] Manisa Gündem, “Manisa mesir’e hazır peki Sultan Camii”, Accessed on: 11/01/2024, <https://www.manisadagundem.com/gundem/manisa-mesir-e-hazir-peki-sultan-camii-h23444.html>
- [30] H. Nohutcu, E. Hökelekli, E. Ercan, A. Demir and G. Altıntaş, “Collapse mechanism estimation of a historical slender minaret,” *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 64, no. 5, pp. 653–660, October 2017.
- [31] M. E. Yiğit, “Investigation of the Seismic Performance of Historical Masonry Aqueducts with Eulerian-Lagrangian Coupled Analysis”, *International Journal of Architectural Heritage*, pp:1–17, 2024. <https://doi.org/10.1080/15583058.2024.2338441>
- [32] M. A. Uğurlu, S. Erdemli Günaslan, ve A. Karaşin, “Dört Ayaklı Minare’nin modellenmesi ve yapısal analizi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 8, sy. 2, ss. 413–422, Nisan 2017.
- [33] N. Işık ve F. M. Halefoğlu, “Tarihi yapılarda Tahribatsız Yöntemlerle Yapısal Sorunların Tespiti; Diyarbakır Hoca Ahmet (Ayn Minare) Camide Georadar (GPR) Ölçümleri ve Değerlendirilmesi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 12, sy. 5, ss. 829–840, 2021, doi: 10.24012/dumf.1051475.
- [34] S. A. Yıldız, M. E. Yiğit and G. Kaplan, “Glass fibre reinforced concrete rebound optimization,” *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol: 113, no: 2, pp: 203–218, 2017.
- [35] H. Koman, ve H. Nohutcu, “Harşısız yığma duvarlı betonarme çerçevenin nümerik analizi,” *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol: 10, no: 1, ss: 266–275, 2021, DOI: 10.28948/ngumuh.785286
- [36] Abaqus, “Abaqus user’s manual”. <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usb/default.htm> (05.06.2023)
- [37] T.C. İçişleri Bakanlığı, “Afet ve Acil Durum Daire Başkanlığı”, 01/11/2023, <https://depem.afad.gov.tr/content/131>
- [38] E. Hökelekli, “Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 11, sy. 2, ss. 825–838, 2020, doi: 10.24012/dumf.626894.
- [39] M. Erdik, “Report On 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes”. Department of Earthquake Engineering, Boğaziçi University, İstanbul, Türkiye, Scientific Report, 39, 2000. [Online] Available: <http://www.koeri.boun.edu.tr/depemuh/eqspecials/kocaeli/kocaelireport.pdf>



Bir borudan çıkan çift fazlı jetin deneysel incelenmesi

*Experimental investigation of a double-phase jet emerging from a pipe*Şeyhmus TÜRÜM¹, Arjin ATA², Tamer BAĞATUR³¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, stumur@dicle.edu.tr, ORCID: [0000-0001-7589-8941](https://orcid.org/0000-0001-7589-8941)² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, arjinata@gmail.com, ORCID: [0000-0002-6327-8734](https://orcid.org/0000-0002-6327-8734)³ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, tbagatur@dicle.edu.tr, ORCID: [0000-0002-4243-3029](https://orcid.org/0000-0002-4243-3029)

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 8 Mayıs 2024
Revizyon 27 Haziran 2024
Kabul 28 Haziran 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Venturimetre, su jeti, çift fazlı akım

Yatay olarak yerleştirilmiş bir boru sisteminden geçen su ve hava-su (çift fazlı) karışımı akım modellerinin; boru sisteminin çıkış noktalarındaki çıkış akım değerleri ve davranışları üzerindeki değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Sisteme yerleştirilmiş iki farklı venturi aygıtı yardımıyla atmosferden vakumlanan farklı hava debilerinin boru sistemindeki çıkış akım değerleri üzerindeki etkisi, çıkış jet uzunluklarının değişimleri ile karşılaştırılmıştır. İki farklı venturi aygıtına bağlı olarak boru sistemindeki çıkış akımlarının sistem performansı ile su jeti uzunlukları üzerindeki değişimleri test edilmiştir. Sonuç olarak çift fazlı su jet boylarının daha kısa ve damlacık özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Deneysel çalışma verileri ile elde edilen matematiksel modeller, denenmemiş durumların sonuçlarının tahmini için kullanılabilir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 8 May 2024
Received in revised form 27 June 2024
Accepted 28 June 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Venturimeter, water jet, dual phase flow

The changes in the discharge flow rates and behaviors at the outlet points of a horizontally placed pipe system for water and air-water (two-phase) mixed flow models have been experimentally investigated. The effect of different air flow rates vacuumed from the atmosphere on the discharge flow rates in the pipe system, using two different venturi devices installed in the system, has been compared with the changes in the discharge jet lengths. The variations in the discharge flows in the pipe system and their effects on the system performance, as well as the changes in water jet lengths, have been tested depending on the two different venturi devices. As a result, it was observed that the dual-phase water jet lengths were shorter and had droplet properties. Mathematical models obtained from experimental study data can be used to predict the outcomes of untested situations.

Doi: 10.24012/dumf.1480658

* Sorumlu Yazar

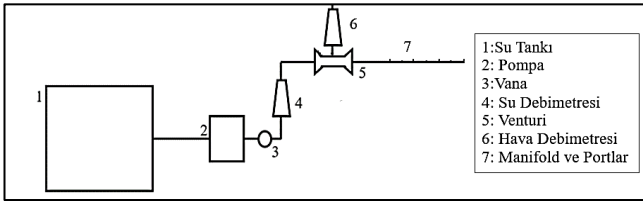
1. Giriş

Su kaynakları mühendisliğinde akışkan akımlarının bir ana boru sistemi ile farklı noktalara dağıtılması halinde projelendirilen sistemlere su dağıtım sistemi adı verilmektedir [1]. Su dağıtım sistemlerindeki akışkan akımı akışı, bir ana su kaynağından (nehir, dere, baraj, su deposu vb.) temin edilerek daha sonra başka bir boşaltma akışında toplanmasının gerekli olduğu birçok tarımsal ve endüstriyel uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Akışkan akışının uygulamaları, su ve atık suyun arıtıldığı arıtma tesislerinde, sulama sistemlerinde ve borulama sistemlerinde deşarj tahsis sistemleridir. Çoğu uygulamada borulama sistemi tasarımının temel amacı, uygulama alanında düzgün bir akış dağılımı elde etmektir. Çok sayıda deneysel, analitik ve sayısal çalışma borulama sistemindeki akışla ilgilidir [2]. Literatürde çift fazlı akım oluşturmada kullanılan venturi aygıtı ile ilgili çalışmalar mevcuttur [3] [4].

2. Materyal ve metot

2.1. Deney düzeneği

Bu çalışmanın deney setleri, Dicle Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik ve Çevre Laboratuvarı'nda oluşturuldu ve test edildi. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1 Deney düzeneğinin şematik görünümü

Yatay olarak yerleştirilmiş bir ana akım boru sisteminden geçen su ve hava-su (çift fazlı) karışımlı akım modellerinin; çıkış akım değerleri ve davranışları üzerindeki değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı hava-su debilerinin ana akım borusu çıkış ağzı ile çıkış akımları üzerindeki değişimi ve çıkış jet uzunluklarının ölçümlerine etkisini araştırmak için iki farklı venturi aygıtından geçen sistem dizayn edilmiştir. Deney setini oluşturan iç çapı 12,7 mm olan ve 250 cm uzunluğundaki ana akım boru sistemine, 300 litre hacme sahip bir su tankından farklı debilerde su sirkülasyonu yapılmıştır.

Deney düzeneğinde su pompası (0,75 kW, Pedrollo Model, İtalya) ile sirkülasyonu sağlanan su akımının debisini ölçmek için bir su debimetresi (0-6 m³/h, 10.1325 Pa) kullanıldı. Su tankı içerisindeki sıcaklık ölçümü termometre (WTW Tetra Con 325 Model) kullanılarak ölçüldü. Sisteme entegre edilen iki farklı venturi aygıtından geçen hava miktarı, hava debimetresi (0,3-3,0 Lt/dak., LZT 6-M) ile ölçüldü. Sistem, su terazisi ile yatayda ve düşeyde dengeye getirildi. Sistemden geçen farklı hava-su debilerinin değişen su jeti uzunlukları çelik metre ile ölçüldü.

2.2. Venturi aygıtı

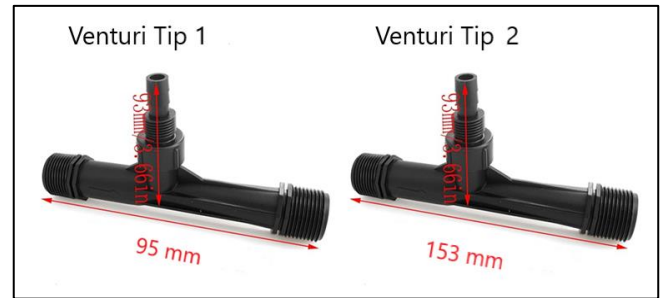
Venturi aygıtı, akışkan debisinin ölçümü için kullanılan bir cihazdır ve akımın hız ve debi değişimlerini Bernoulli ve süreklilik denklemleri ile analiz etmeyi sağlar. İki ucu açık

olan bu ölçüm aleti, İtalyan fizikçi Giovanni Battista Venturi tarafından 18. yüzyılda geliştirilmiştir [5]. Venturi tüpü, genişleyen ve daralan iki tüpün birleşmesiyle oluşan bir yapıya sahiptir. Venturi tüpü; giriş konisi, silindirik dar kesit (boğaz bölgesi) ve çıkış konisi olmak üzere üç bölümden oluşur. Akışkanın hızını artırmak için girişteki boru kesitinden daha küçük bir kesit alanına sahip boğaz bölgesine doğru daralma yapılarak basınç yükünün hız yüküne dönüşmesi sağlanır. Atmosferden oksijen transferi veya oksijen emiliminin fiziksel süreci, kullanılan oksijeni yenileme işlevi görür. Bu işleme yeniden havalandırma veya havalandırma denir. Venturi havalandırması son yıllarda popüler hale gelen bir havalandırma yöntemidir. Venturi tüpü, hava giriş deliklerinden akan suya hava kabarcıklarının girmesini sağlar ve böylece sudaki oksijen seviyesini artırır. Bu çalışmada, hava giriş deliği çapının hava enjeksiyonuna etkisini araştırmak amacıyla venturi tüpleri üzerinde bir dizi deney yapılmıştır. Sonuçlardan venturi tüpü üzerindeki hava giriş deliği çapının hava enjeksiyonunda önemli rol oynadığı ve hava enjeksiyonunu maksimuma çıkaracak optimal bir çapın olduğu görülmüştür [6]. Atmosferik havalandırma süreci, nehirler ve akarsulardaki çözünmüş oksijen konsantrasyonlarını etkileyen organik maddenin bozulmasında ve kendi kendini temizleme süreçlerinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, su kalitesi süreçleri büyük ölçüde akış hızı koşullarına bağlı olabilir. Burada, yüksek havalandırma oranları yüksek akış hızıyla pozitif olarak ilişkilidir. Bu nedenle mevcut çalışma, su konsantrasyonunda ve biyokimyasal oksijen talebinde havalandırma süreci ile birlikte akış hızının rolüne ilişkin bilgiler içermektedir [7].

2.3. Venturi tipleri

Bu çalışmada iki farklı venturi aygıtı kullanılmıştır (Şekil 2). Bu venturi tiplerinin teknik özellikleri

Tablo 1 ve Tablo 2' de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan venturi aygıtlarının boyutları ASME standartlarına uygundur. [8]. Deney setlerinde farklı su debileri, hava vakumlama debileri ve transfer verimlilikleri deneysel olarak incelenmiştir.



Şekil 2 Deneyde kullanılan venturi aygıtları

Tablo 1 Venturi tip 1 aygıtının teknik özellikleri

Su Giriş/Çıkışı	1/2 inç
Hava Emiş Ağız	1/4 inç
Hava emiş Kapasitesi	4-7 Nm ³ /h
Giriş Basıncı	4,92 kg/cm ²
Su Akış Miktarı	400-1200 l/h
Tam boy	95 mm

Tablo 2 Venturi tip 2 aygıtının teknik özellikleri

Su Giriş/Çıkışı	3/4 inç
Hava Emiş Ağız	1/4 inç
Hava emiş Kapasitesi	7,5-10 Nm ³ /h
Giriş Basıncı	2,04-5,098 kg/cm ²
Su Akış Miktarı	1000-3000 l/h
Tam boy	153 mm

Tablo 1 ve Tablo 2' de özellikleri belirtilen venturi aygıtları deney setlerine entegre edilerek laboratuvarında 0,60 m³/h, 0,75 m³/h, 0,85 m³/h ve 1,0 m³/h' lik debilerle çalışılmıştır.

2.4. Deneysel ölçümler

Deneysel ölçümler sistematik akım diyagramı **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** de **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** verilen deney düzeneği üzerinde yapılmıştır. Deneysel ölçümler temel olarak; ana akım borusunun sabit çıkış ağız çapı, farklı ana boru debisi ve hava emiş debisi, sistemin iki farklı venturi aygıtına bağlı olarak jet çıkış uzunluğundaki değişimlerinden oluşmaktadır. Deneysel ölçümler için çıkış ağızlık çapı $d=12,7$ mm; ana boru debisi $Q_s= 17-27,8 \times 10^{-5}$ m³/s ve hava emiş debisi $Q_a= 1,25-4,6 \times 10^{-5}$ m³/s olarak seçilmiştir. Bu çalışmada yapılan ölçümlerde çeşme suyu kullanılmıştır. Suyun kinematik viskozite değerini birincil referans standart olarak kabulü için çalışma sıcaklığı yaklaşık 20 °C seviyelerinde sabit tutulmuştur. Deney düzeneğinde kullanılan ana akım borusunun yatay olarak dengeye alınmıştır (Şekil 3).



Şekil 3 Deney düzeneğinin yatay dengeye alınması

2.4.1. Hava emiş debisinin ölçülmesi Bu çalışmada

Tablo 1 ve Tablo 2' de özellikleri belirtilen iki farklı venturi aygıtı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bir su tankına bağlı sirkülasyon pompasına bağlı akışkan akımı deneysel setlere uygulanmıştır. Akışkan akımı, debi kontrol vanasıyla kontrol edilmekte ve ana boru içindeki debi su debimetresinden okunmaktadır. Akışkanın venturi aygıtından geçerken vakumladığı hava miktarını ölçmek için daralma bölgesindeki hava deliğine bir hava debimetresi yerleştirilmiştir. Su sirkülasyonu ile alınan akışkan akımı, venturi aygıtının daralma bölgelerinde vakumlanan hava ile karışarak iki fazlı bir akım oluşturmaktadır [9]. Sistem farklı debilerde ve iki farklı venturi aygıtı ile çalıştırılarak vakumlanan hava miktarı ölçülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4 Hava debimetresi ile ölçüm

2.4.2. Jet çıkış uzunluklarının ölçülmesi

Bu çalışmada venturi tip 1 ve venturi tip 2 aygıtlı sistemde ana akım borusunun çıkış ağızında oluşan su jeti çıkış uzunluklarındaki değişim gözlemlenmiştir. Ana akım borusundaki farklı debi değerleri için deneysel çalışmalar yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5 Su jeti uzunluklarının ölçülmesi

2.4.2.1. Venturi tip 1 ve venturi tip 2 aygıtları ile yapılan deneysel çalışmada jet çıkış uzunluklarının ölçülmesi

Venturi tip 1 ve venturi tip 2 aygıtları ve farklı ana boru akım debileriyle yapılan deneysel çalışmada elde edilen hava emiş debileri ve su jeti çıkış uzunlukları, Tablo 3 ve Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 3 Venturi tip 1 aygıtının kullanıldığı deney setinden elde edilen veriler

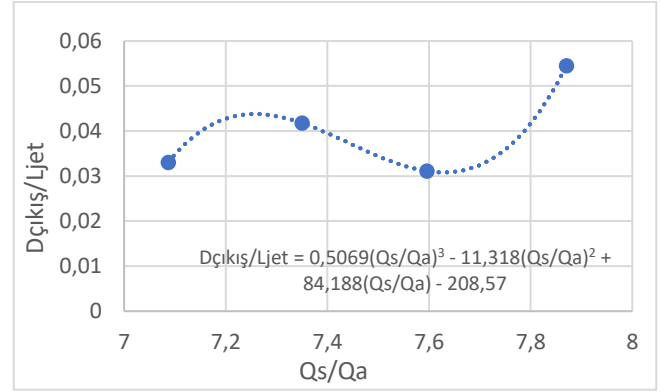
Qs (x10 ⁻⁵ m ³ /s)	Qa (x10 ⁻⁵ m ³ /s)	Jet Uzunluğu (cm)
17	2,16	23,3
20,8	2,83	30,4
23,6	3,33	38,4
27,8	3,66	40,8

Tablo 4 Venturi tip 2 aygıtının kullanıldığı deney setinden elde edilen veriler

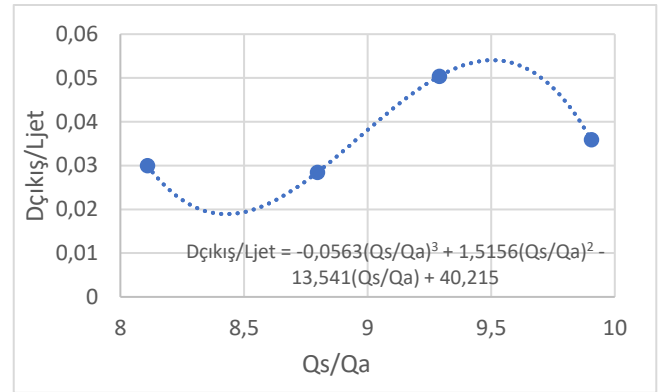
Qs (x10 ⁻⁵ m ³ /s)	Qa (x10 ⁻⁵ m ³ /s)	Jet uzunluğu (cm)
17	1,83	25,2
20,8	2,1	35,4
23,6	2,91	42,4
27,8	3,16	44,6

2.4.3. Boyutsuz parametre analizleri

Elde edilen deneysel veriler için boyutsuz parametre analizleri yürütülmüştür. En uygun olabilecek parametre arayışları Q_s/Q_a ve $D_{çıkış}/L_{jet}$ olarak çalışılmıştır. Buna göre boyutsuz değişkenler arasında iyi bir saçılım olduğu ve kuvvetli bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Şekil 6)(Şekil 7). Bazı çalışmalarda boyutsuz parametre analizleri ile bir matematiksel model elde edilerek değişkenler arasındaki ilişki belirlenmiştir. Böylece oluşturulan matematiksel model denenmemiş durumların sonuçlarının tahmininde kullanılabilir. Bu nedenle bu çalışmada da boyutsuz parametre analizi yapılmıştır.



Şekil 6 Venturi tip 1 deney setinde Dport/Ljet-Qs/Qa saçılım diyagramı



Şekil 7 Venturi tip 2 deney setinde Dport/Ljet-Qs/Qa saçılım diyagramı

2.4.4. Reynolds sayısının değişimi

Reynolds sayısı, Navier-Stokes denkleminin boyutsal analizinden elde edilen ve akışkan akımının laminar-türbülanslı olması hakkında bilgi veren boyutsuz bir parametredir [10]. Bazı çalışmalarda, bir venturi aygıtı içindeki hava vakum işleminin Reynolds sayısı ile ilişkisi olduğu belirtilmektedir [11]. Bu nedenle bu çalışmada da boyutsuz parametrelerden olan Reynolds sayısının değişimi incelenmiştir. Reynolds sayısı, aşağıdaki denklemden hesaplanmaktadır. Yürütülen bu çalışmada deneysel sisteme ait Reynolds sayısının değişim değerleri, Tablo 5' de özetlenmiştir Reynolds sayısının formülü Denklem (1)' de verilmiştir.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

Burada; Re = Reynolds Sayısı, V =Ana boru akım hızı (m/s), D = Ana boru çapı (m) ve ν = Suyun kinematik viskozite değeridir (m^2/s).

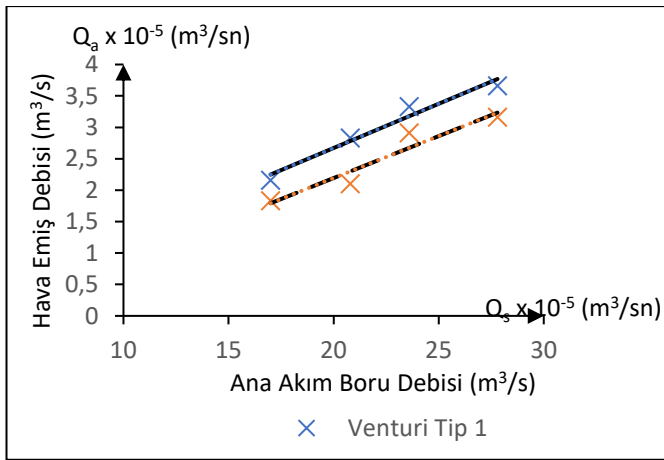
Tablo 5 Reynolds sayısının değişimi

Ana boru akım hızı, m/s	Reynolds sayısı (Re)
$V_1=1,34$	16850
$V_2=1,64$	20620
$V_3=1,86$	23388
$V_4=2,20$	27663
$D=1,27 \times 10^{-2}$ m, $\nu = 1,01 \times 10^{-6}$ m^2/s (20°C su sıcaklığı için)	

2.5. Deneysel çalışmalar

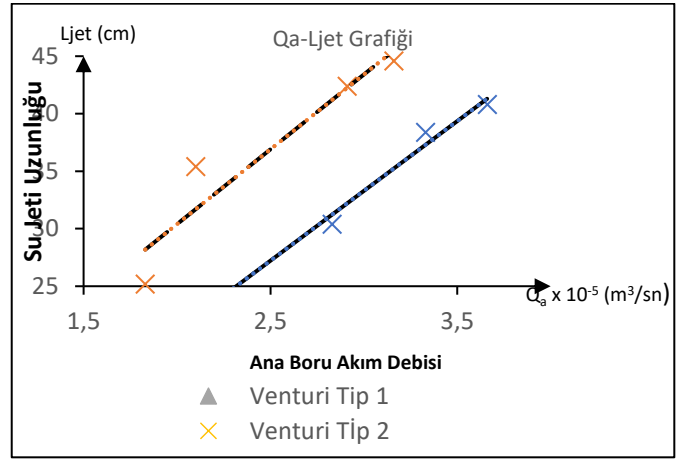
Bu çalışmada çıkış ağızlık çapı dairesel kesitli olan ve sabit çapa sahip bir ana akım boru sistemine bağlanan iki farklı venturi aygıtı ile hem farklı debilerdeki çıkış su jeti uzunlukları hem de hava emiş performansı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

Artan ana akım borusu debisiyle birlikte hava emiş debisinin de lineer olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 8). Buna göre venturi tip 1, venturi tip 2'ye göre artan debiyle birlikte daha fazla hava emiş performansı göstermiştir.



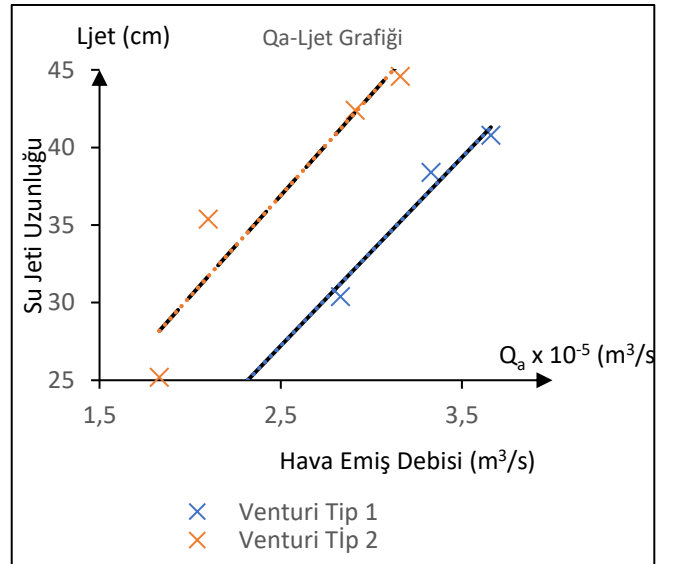
Şekil 8 Venturi Tip 1 ve Venturi Tip 2 aygıtının kullanıldığı deney setinden elde edilen hava emiş debisi ile ana akım boru debisi grafiği

Ana akım borusu debisinin artışıyla birlikte su jeti uzunluklarının lineer olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 9). Buna göre venturi tip 2 aygıtı ile çalıştırılan deney seti venturi tip 1 aygıtına göre artan debiyle birlikte daha fazla su jeti uzunluğu yönelimi göstermiştir.



Şekil 9 Venturi Tip 1 ve Venturi Tip 2 aygıtının kullanıldığı deney setinden elde edilen su jeti uzunluğu ile ana akım boru debisi grafiği

Hava emiş debisinin artmasıyla birlikte su jeti uzunluklarının lineer olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 10). Buna göre venturi tip 2 aygıtı ile çalıştırılan deney seti venturi tip 1 aygıtına göre artan hava emiş debisiyle birlikte daha fazla su jeti uzunluğu yönelimi göstermiştir.



Şekil 10 Venturi Tip 1 ve Venturi Tip 2 aygıtının kullanıldığı deney setinden elde edilen su jeti uzunluğu ile hava emiş debisi grafiği

3. Bulgular ve Tartışma

Deneysel ölçümler sistematik akım diyagramı Şekil 1' de verilen deney düzeneği üzerinde yapılmıştır. Deneysel ölçümler temel olarak sürüklenen ve emilen hava miktarı, su debisi, su jeti boyu tayininden oluşmaktadır. Bu ölçümlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar grafiksel olarak ifade edilmiştir. Bununla birlikte elde edilen ölçüm sonuçları ile farklı tasarlanan deney düzeneklerinin su ve hava-su (çift fazlı) karışım akım modellerinin; çıkış akım değerleri ve davranışları üzerindeki değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı hava-su debilerinin ana akım borusu çıkış çapı ile çıkış akımları üzerindeki etkisi, çıkış jet

uzunluklarının ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu deneysel sonuçlar farklı ana akım borusu çıkış debileri ve farklı venturi aygıtı seçimi ile yürütülmüş ve grafikler halinde gösterilmiştir. Böylece verilerin yorumlanması sağlanmıştır. Ayrıca boyutsuz parametre analizleri ile sayısal model çalışmaları yapılmıştır. Baylar, Özkan ve Ünsal (2010) tarafından yapılan çalışmada hava giriş deliği çapının hava enjeksiyonuna etkisini araştırmak amacıyla venturi tüpleri üzerinde bir dizi deney yapılmıştır. Sonuçlardan venturi tüpü üzerindeki hava giriş deliği çapının hava enjeksiyonunda önemli rol oynadığı ve hava enjeksiyonunu maksimuma çıkaracak optimal bir çapın olduğu görülmüştür [6]. Bu çalışmada farklı tipteki venturimetre aygıtında yapılan deneysel ölçümlerde ağızlık çapı değişimi ile hava emiş debisinin aynı debilerle arttığı görülmüştür. Bu deneysel çalışmamızda ağızlık çapı değişiminin hava emiş debisine etkisinin olduğu görülmüştür.

4. Sonuçlar

Venturi tip 1 aygıtı ve venturi tip 2 aygıtı bulunan çift fazlı sistem, ilk olarak farklı ana akım borusu debileri ile çalıştırılmıştır. Sistem farklı ana akım borusu debilerinde çalıştırılarak deney setinde vakumlanan hava miktarları ölçülmüştür.

Artan ana akım borusu debisiyle birlikte hava emiş debisinin de lineer olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 8). Buna göre venturi tip 1, venturi tip 2'ye göre artan debiyle birlikte daha fazla hava emiş performansı göstermiştir.

Ana akım borusu debisinin artışıyla birlikte su jeti uzunluklarının lineer olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 9). Buna göre venturi tip 2 aygıtı ile çalıştırılan deney seti venturi tip 1 aygıtına göre artan debiyle birlikte daha fazla su jeti uzunluğu yönelimi göstermiştir.

Hava emiş debisinin artmasıyla birlikte su jeti uzunluklarının lineer olarak arttığı belirlenmiştir (Şekil 10). Buna göre venturi tip 2 aygıtı ile çalıştırılan deney seti, venturi tip 1 aygıtına göre artan hava emiş debisiyle birlikte daha fazla su jeti uzunluğu yönelimi göstermiştir.

Hidrolik olarak düşük boyuna ve yersel yük kayıpları için ideal gösterilen 1-2 m/s civarındaki akım hızının burada da kendini gösterdiği görülmektedir.

Sistem için belirlenen temel parametreler d , D , V , L_j , Q_s , Q_a olarak seçilmiştir.

Bu çalışmadaki $V_1=1,34$ m/s, $V_2=1,64$ m/s, $V_3=1,86$ m/s ve $V_4=2,20$ m/s olan manifold ana akım hızlarına göre sırasıyla 16850, 20620, 23388 ve 27663 olan Reynolds sayıları elde edilmiştir.

Deneysel çalışma verileri ile elde edilen matematiksel modeller, denenmemiş durumların sonuçlarının tahmini için kullanılabilir.

5. Kaynakça

- [1] J. Yingzi, W. Alawee, F. Essa, A. Abdullah, Z. Omara and H. Ahmad , "Effect of area ratio and Reynolds number on the distribution of discharge in dividing manifold," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, pp. 1271-1279, 2022.
- [2] T. Bagatur, F. Önen and N. Kayaalp, "Testing of System Performance for Different Aerator Configuration Using Venturi," *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 5, no. 3, pp. 724-733, 30 09 2018.
- [3] S. Laksitanonta and G. Singh, "Development of a Venturi Aerator for Aquaculture Pond," *ASAE Annual International Meeting*, 2003.
- [4] J. Zhu, C. F. Miller, C. Dong, S. Wu, L. Wang and S. Mukhtar, "Aerator Module Development Using Venturi Air Injectors to Improve Aeration Efficiency," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 23, no. 5, pp. 661-667, 2007.
- [5] R. Daugherty, J. Franzini and E. Finnemore, *Fluid Mechanics with Engineering Applications*, New York: McGraw-Hill, 1985.
- [6] A. Baylar , F. Ozkan and M. Unsal, "Effect of Air Inlet Hole Diameter of Venturi Tube on Air Injection Rate," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 489-492, 2010.
- [7] W. Assar , "Quantitative study for the effect of water velocity on water quality change," *European Journal of Science and Technology*, no. 47, pp. 37 - 41, 31 01 2023.
- [8] ASME Standard MFC-3M-1989, *Measurement of fluid flow in pipes using orifice, nozzle and venturi*, ASME, 2021.
- [9] A. Baylar and M. E. Emiroglu, "Air Entrainment and Oxygen Transfer in a Venturi," *Water and Maritime Engineering*, vol. 156, no. 3, pp. 249-255, Eylül 2003.
- [10] M. S. Kırkgöz, *Akışkanlar Mekaniği*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2013.
- [11] T. Bagatur, "Minimal conditions for venturi aeration of water flows," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, vol. 158, no. 3, pp. 127-130, 2005.



Investigation of the Adsorption Performance of Aqueous Solution of Malachite Green Dye on Kaolin Clay

Alper SOLMAZ^{1*}

¹Iskenderun Technical University, Iskenderun Vocational School of Higher Education, Department of Environmental Protection and Control, alper.solmaz@iste.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-6928-3289

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 May 2024
Received in revised form 18 July 2024
Accepted 01 August 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Adsorption, malachite green, kaolin clay, wastewater treatment, kinetics, isotherm.

Doi: 10.24012/dumf.1488794

* Corresponding author

ABSTRACT

In this study, the removal of Malachite green (MG) dye, which has a toxic effect on the aquatic ecosystem, was carried out with kaolin clay, a natural and inexpensive material. In batch adsorption tests, the effects of pH, adsorbent dose, initial dye concentration and contact time were determined. Also, Pseudo first order and Pseudo second order kinetic models and Freundlich, Langmuir and Temkin isotherm models were tested. On the other hand, Scanning Electron Microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) analyzes of raw and MG-loaded kaolin clay were performed. According to the results obtained, the removal efficiency was over 99% at 23±2 °C, pH 7.0 (±0.5), initial MG concentration of 4 mg/L and kaolin dosage of 1.75 g/L. Also, the most suitable kinetic and isotherm models were determined as Pseudo second order (R^2 : 0.999) and Freundlich (R^2 : 0.960), respectively. Additionally, the amount of MG dye removed per unit kaolin (q_{max}) was calculated as 16.36 mgMG/gkaolin. This study reveals the suitability of using kaolin clay in the adsorption of MG dye.

Introduction

The dyes of different qualities are used in industrial production around the world, including paper, paint, plastic, automotive, cosmetics and textile production. In addition to many organic dyes such as turmeric, onion and henna etc., there are also many synthetic dyes such as acid, direct, reactive, disperse, vat and basic. Almost 10% of these dyes are released into the receiving environment (lake, pond, stream, river and sea) [1].

MG dye is a synthetic organic compound. MG, known as cationic dye, is widely used in many industries such as cotton, wool, fabric, leather, paper, plastic and metal. [2]. In addition, it is also used as a food coloring agent and in medical processes [3]. It is known that this widely used dye causes carcinogenic, mutagenic and teratogenic effects for the ecosystem [4]. It also causes accumulation in the tissues of living creatures in the aquatic ecosystem, especially fish. On the other hand, it has a negative effect on photosynthetic organisms by affecting light transmittance. Thus, it threatens the lives of upper category creatures that feed on photosynthetic creatures [5].

There are many various physicochemical treatment processes such as adsorption, membrane, chemical and electrochemical coagulation/flocculation and ion exchange to minimize the toxic effects of dyes in the environment

where they are discharged. There are also chemical purification methods such as advanced oxidation and photocatalytic. In addition, removal is carried out by biological treatment methods including aerobic, anaerobic or hybrid systems [1], [6], [7], [8]. These methods have many advantages and disadvantages, which are closely related to the quantity, quantity and discharge of wastewater. However, treatment technologies that achieve high removal efficiency at low cost are preferred by researchers. In this context, the adsorption process is the frequently preferred process [9], [10].

In the adsorption process, the pollutant is removed by binding to the surface of the adsorbent in various physicochemical aspects. The main reason why this process can be preferred over others is the cost of the adsorbent. In this context, the most commonly used adsorbents are burned by using various chemicals and at high temperatures (500-1000 °C) [11], [12], [13]. For this purpose, trees such as oak and pine are used as raw materials, and many biomaterials such as walnuts, almonds, hazelnuts, olives and corn are used [14]. Since their production costs are quite high, there is a tendency towards less costly biomaterials (agricultural product wastes such as rice, corn and plant wastes and microalgae, bacterial and fungal cultures) [15], [16], [17] and materials such as zeolite, bentonite and kaolin. Among these, various researches are being carried out on kaolin clay in terms of cost and removal capacity.

Clay minerals are frequently found as precipitates in nature and in the ocean. It is a very porous, earthy and natural material. In general, the majority of kaolin is kaolinite, but it contains various minerals such as quartz and mica [18]. There are ionizable groups within the clay and on its surface. Thus, it has a charge that can easily interact with ions in solution [19]. They are frequently preferred in adsorption processes due to their high absorption capacity, high stability and easy availability [20].

There are studies on the removal of heavy metals (cadmium, lead, chromium and iron, etc.), various organic/inorganic pollutants and dyes with raw and modified kaolin [14], [21].

This study was carried out to determine the amount of kaolin that effectively removes dye in a short time at low dye concentration. A removal study of MG dye was carried out with kaolin clay, which is a natural and inexpensive product. The effect of environmental parameters (pH, material dose, initial pollutant concentration and contact time) was investigated with batch adsorption tests. The obtained results were tested with 2 different kinetic and 3 different isotherm models, and FTIR and SEM analyzes of raw and MG-loaded kaolin were performed.

Materials and method

Chemicals

All chemicals used in adsorption studies are of analytical purity. Powder malachite green oxalate ($C_{23}H_{25}N_2.C_2HO_4.0.5C_2H_2O_4$, 463.50 g/mol, Sigma-Aldrich), sodium hydroxide in pellet form (NaOH, 40.00 g/mol, $\geq 99.0\%$, Sigma-Aldrich) and sulfuric acid in liquid form ($H_2(SO_4)_3$, 1.81 g/cm³, $\geq 90-91\%$, Merck) were used.

Preparation of kaolin clay

Kaolin clay used in experimental studies was sieved in a sieve with a pore size of 75 microns. Then, it was dried in an oven at 50°C for 24 hours and stored in a closed container.

Adsorption studies

Stock solution of MG dye (1000 mg/L) was prepared for adsorption studies. The equation $y = 0.1753x + 0.0191$ ($R^2 = 0.9999$) was obtained by creating a calibration curve on a UV-Vis spectrophotometer (Hach DR6000, Germany) at 617 nm wavelength [22], [23], [24] by diluting this stock solution at certain rates.

The absorbance value measured in each experiment was converted to concentration with the help of this equation. Adsorption studies were carried out on an orbital shaker (Heidolph, Unimax1010, Germany) with a mixing speed of 250 rpm. In order to determine the capacity of kaolin to adsorb MG dye, optimum values were determined by studying the variable pH effect, variable adsorbent effect, variable initial MG dye concentration, contact time and variable temperature parameters. Numerical results obtained from each experiment were interpreted with the help of equations 1 and 2.

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (2)$$

Here, R expresses the removal efficiency of MG dye in %, while C_0 and C_e expressions express the MG concentration in the solution at the beginning and end of the experiment in mg/L. In addition, the expression q_e refers to the amount of MG dye removed per gram of kaolin (mg/g), the expression V refers to the solution volume in L, and the expression m refers to the amount of kaolin in mg.

First of all, time, adsorbent amount, and initial concentration were kept constant to find the optimum pH. In this context, experiments were carried out at varying pHs in a volume of 10 mL, an adsorbent amount of 10 mg, a reaction time of 30 minutes and an initial dye concentration of 4 mg/L. Then, to find the optimum amount of adsorbent, experiments were carried out with varying adsorbent amounts in a volume of 10 mL, pH 7, reaction time of 30 min and initial dye concentration of 4 mg/L, and the amount of adsorbent with the highest removal was selected. Then, a kinetic study was conducted at pH 7, with an initial dye concentration of 4 mg/L and an adsorbent amount of 17.5 mg. However, in order for the experimental study to be carried out easily, 5 times more work was done. That is, the initial dye concentration is 4 mg/L, the solution volume is 50 mL and the amount of kaolin is 87.5 mg. Finally, in order to determine the effect of the initial concentration and make isotherm calculations, other conditions were kept constant but the initial dye concentration was changed.

Adsorption kinetics

Experiments for kinetic evaluation were carried out at neutral pH at 23 ± 2 °C. 87.5 mg kaolin was added to a 50 mL volume beaker where the initial MG concentration was 4.0 mg/L. And samples were taken at certain time intervals and these MG concentrations were read on a UV-Vis spectrophotometer. Pseudo first order and Pseudo second order kinetic models were tried to interpret the obtained results. The equation used for the Pseudo first order kinetic model is presented in equation 3 [25] and the equation used for the Pseudo second order kinetic model is presented in equation 4 [26].

$$\text{Pseudo first order: } \ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (3)$$

$$\text{Pseudo second order: } \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

Here, the expression q_e describes the amount of pollutant removed per unit adsorbent in equilibrium by the reaction on a mg/g basis, while the expression q_t expresses the amount of pollutant removed per unit adsorbent at any time t of the reaction, also on a mg/g basis. The expression k_1 in the equation refers to the first-order adsorption rate constant on the basis of h^{-1} . The expression k_2 refers to the quadratic constant on the basis of $g.mg^{-1}.h^{-1}$.

Adsorption isotherms

Experiments to determine the most suitable isotherm model were carried out at 23 ± 2 °C and neutral pH. 1 mg of kaolin was added to 8 different tubes of 10 mL volume, with initial dye concentration ranging from 7.8 to 133.3 mg/L, and at the end of the period, the dye concentrations were read on a UV-Vis spectrophotometer. Freundlich [27], Langmuir [28] and Temkin [29] isotherm models were used to interpret the

obtained values. The equations used for these models are presented in equations 5, 6 and 7, respectively.

$$\text{Freundlich: } \log(q_e) = \log(k_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (5)$$

Here, the q_e expression seen in each model expresses the amount of pollutant removed by the unit adsorbent in equilibrium state on a mg/g basis. k_F is the Freundlich adsorption constant, and $1/n$ is a measure of the intensity of adsorption.

$$\text{Langmuir: } \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}k_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (6)$$

Here, k_L represents the Langmuir equivalence constant based on L/g. In addition, the dispersion constant (R_L) must be determined. For this, equation no. 7 is used.

$$R_L = \frac{1}{1+a_L C_0} \quad (7)$$

Here, R_L expresses whether the isotherm is suitable or not, while a_L expresses the constant related to the adsorption energy on a L/mg basis.

$$\text{Temkin: } q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(k_T) + \frac{RT}{b_T} \ln(C_e) \quad (8)$$

Here, R refers to the universal gas constant on the basis of 8.314 j/mol.K, T refers to the temperature on the basis of K , and b_T refers to the Temkin isotherm constant on the basis of kj/mol

Results

Characteristic of kaolin clay

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

In order to understand the adsorption of MG dye on kaolin clay, FTIR spectra of raw and MG-loaded kaolin were determined. FTIR spectrum results of raw and MG loaded kaolin clay are presented in Figure 1. There are various differences in functional groups before and after adsorption. Si-O-Mg, Si-O-Si and Si-O-Al stretching vibrations were observed in the 467-789 cm^{-1} bands in both raw and MG charged particles [30]. Additionally, hydroxyl groups were detected in the 900 bands and the 3618 and 3691 cm^{-1} bands [31]. Si-O and Si-O-Si stretching vibrations are observed in the 1032 cm^{-1} bands [31] and -CH groups are observed in the 2800-3000 cm^{-1} bands [32].

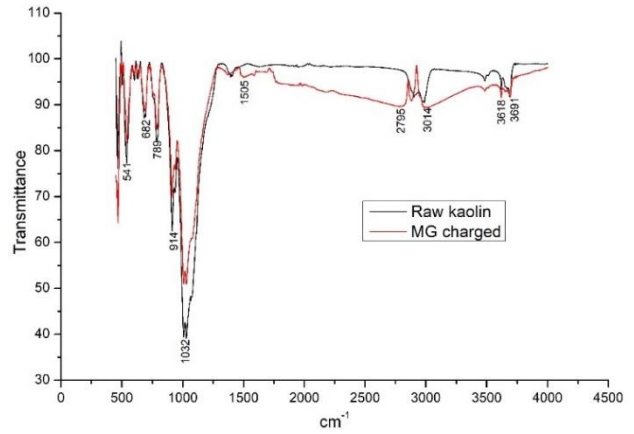


Figure 1. FTIR diagram before and after reaction

Scanning electron microscopy (SEM)

Before the reaction, the morphological structures of raw and MG-loaded kaolin clay were tried to be determined by SEM analysis. Figure 2 (a) shows the general appearance of raw kaolin clay. Here, the image appears clear, clear and bright in terms of surface features. In addition, the surface structure of clay is quite irregular and has a partially indented porous structure. On the other hand, the image of MG-loaded kaolin clay is presented in Figure 2(b). It can be said that in the image loaded with MG, the roughness of the clay surfaces is partially reduced and the overall image becomes blurred. Thus, it is very important for the MG dye to adhere to the irregular and porous surface [33].

Influence of experimental parameters

Effect of pH

pH is a very effective parameter in adsorption. Various experiments were carried out to determine the effect of pH on the adsorption of MG dye by kaolin clay. Experiments were carried out at room temperature and 250 rpm. 10 mg kaolin was added to 10 mL tubes with an initial MG dye concentration of 4 mg/L and the initial pH values were adjusted to 3, 5, 7 and 9. After 30 minutes, centrifugation was performed and dye measurements were performed in the upper phase water.

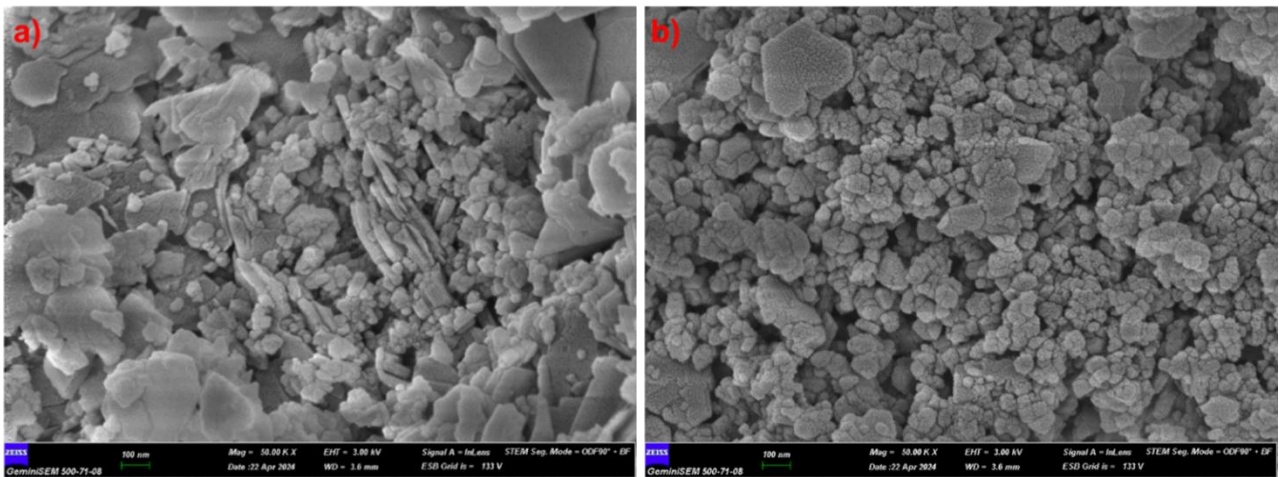


Figure 2. SEM images of kaolin clay before and after reaction; a) Raw kaolin clay, b) MG charged.

While the removal efficiency was 87.75% at pH 3, the efficiency increased to 95.75% as the pH increased. But the efficiency increase is around 8.3%. Experimental studies can continue at the highest efficiency, but the studies were carried out at neutral pH (7 ± 0.5) since the efficiency is not significantly high and additional chemical consumption will be required to increase the pH. In literature, the removal efficiency of MB dye at high pH was high, but it was reported that the increase in efficiency was not relatively high [34].

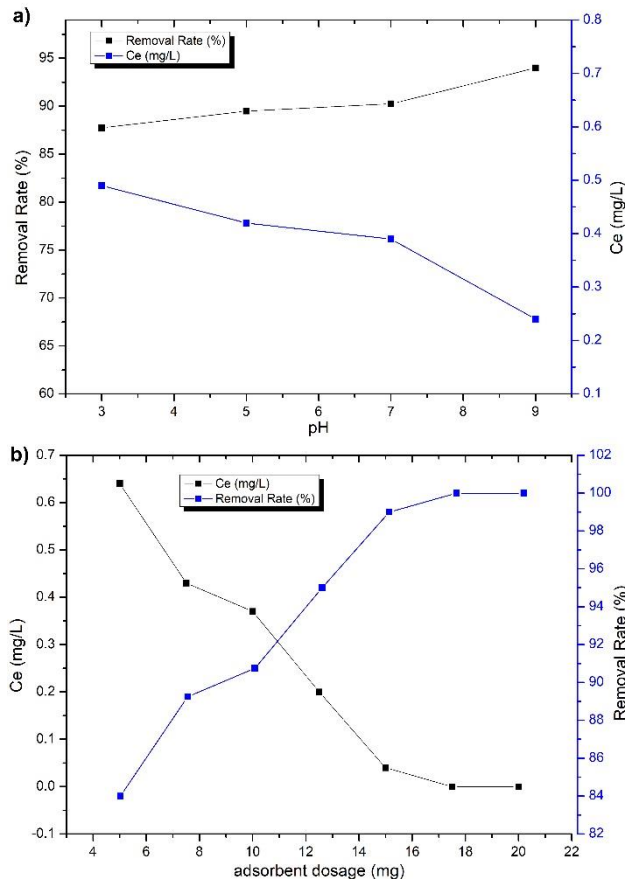


Figure 3. a) Effect of the initial pH (V: 10 mL, C_0 : 4 mg/L, T: 298 K, adsorbent dosage: 1,0 g/L, reaction time: 30 min.), b) Effect adsorbent dosage (V: 10 mL, C_0 : 4 mg/L; T: 298 K, pH: 7.0 ($\pm 0,5$), reaction time: 30 min.)

Effect of adsorbent dosage

The effect of the change in the amount of adsorbent on the pollutant removal efficiency was tried to be determined. For this purpose, experiments were carried out under similar environmental conditions. Kaolin was added in the range of 5-20 mg (increase amount of 2.5 mg) to 7 different test tubes with a volume of 10 mL at an initial dye concentration of 4 mg/L and neutral pH. MG analysis was performed at the end of the 30-minute experimental period. Accordingly, while the removal efficiency was around 84% in the experiment with 5 mg kaolin, the removal efficiency also increased as the amount increased. Ultimately, while the removal efficiency reached 99% in the presence of 15 mg kaolin, no dye concentration in the solution was observed when the presence of kaolin increased to 17.5 mg. When the literature is examined, when the amount of adsorbent is purified in the adsorption of MG dye onto kaolin clay, the removal efficiency increases proportionally. This can be

explained by the fact that less pollutant falls on more surface area of the adsorbent [5].

Effect of initial dye concentration

Experiments were carried out under the same environmental conditions to determine the effect of the change in initial pollutant concentration on the removal efficiency. MG dyes were added to 8 different test tubes with a volume of 10 mL, each containing 10 mg of kaolin clay, with the initial dye concentration varying between 7.8-133 mg/L, and dye analyzes were performed at the end of the period. Accordingly, while the removal efficiency was 70.53% in the presence of 7.8 mg/L MG, the q_e value was calculated as 5.5 mg/g. At the initial MG concentration of 133 mg/L, the removal efficiency was calculated as 12.25% and q_e was calculated as 16.33. Accordingly, as the MG concentration increased, a decrease in the removal efficiency was observed, but an increase was observed in the amount of dye removed per unit adsorbent. The reason for this is that as the pollutant concentration increases, the transfer of the pollutant onto the adsorbent becomes easier due to the increase in the repulsive force between the molecules. When the literature was examined, it was reported that the q_e value increased with increasing dye concentration in studies conducted with similar dyes [35].

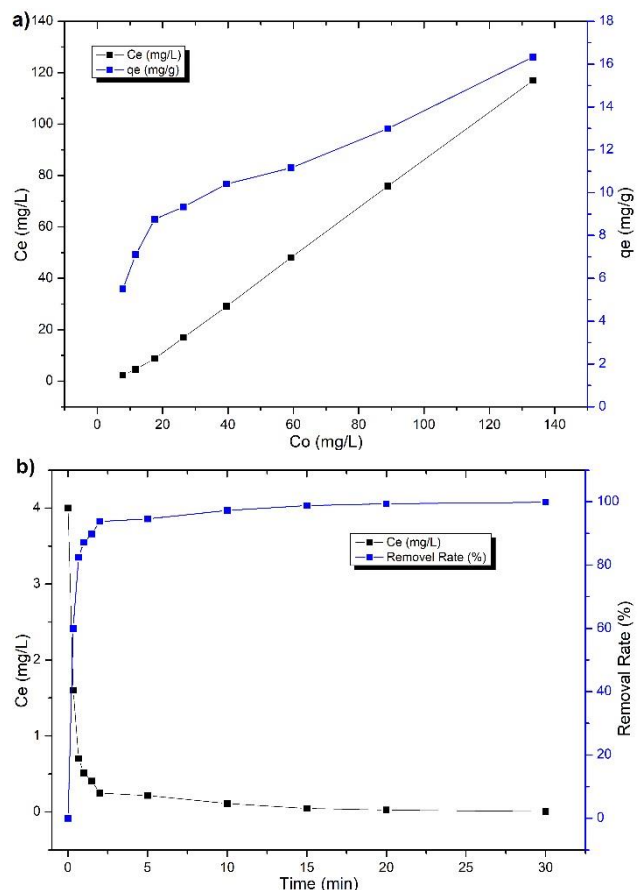


Figure 4. a) Effect of initial dye concentration (V: 10 mL, m: 1 g/L, T: 298 K, adsorbent dosage: 1,0 g/L, reaction time: 30 min.), b) Effect contact time (V: 50 mL, C_0 : 4 mg/L, adsorbent dosage: 1,75 g/L) T: 298 K, pH: 7.0 ($\pm 0,5$)

Effect of contact time

The contact time of the adsorbent and the pollutant is very important in terms of removal efficiency. To determine this effect, under similar environmental conditions, 1.75 mg of kaolin clay was added to MG dye with a concentration of 4 mg/L in a volume of 50 mL and samples were taken at certain time intervals. Accordingly, while the efficiency was 59.96% in the first 20 seconds of the experiment, the efficiency increased to 87.19% in the 1st minute. It has been reported that as time progresses, although the efficiency increases, the rate of increase decreases and when the 20th minute is reached, the efficiency exceeds 99%. Finally, at the 30th minute and later, the dye concentration in the solution fell below the measurement limits. Similarly, in the literature, it has been reported that while high removal efficiency was achieved in a short contact time, the increase in efficiency continued but the rate of increase decreased as the time increased [36].

Adsorption kinetics

In order to determine the mechanism of removing MG dye from kaolin clay, the numerical data obtained from the analyzes performed in the laboratory were tested in kinetic models. In this context, the results of the linear forms of the Pseudo first order and Pseudo second order kinetic models are presented in Table 1. In addition, the graph created from the data obtained with the equation is presented in Figure 5.

Table 1. Results of the calculated kinetic models for the adsorption of MG dye onto kaolin clay.

Kinetic models	Pseudo first order	Pseudo second order
Parameter	$k_1 = 0.051$	$k_2 = 0.217$ $q_e = 2.294$
R^2	0.868	0.999

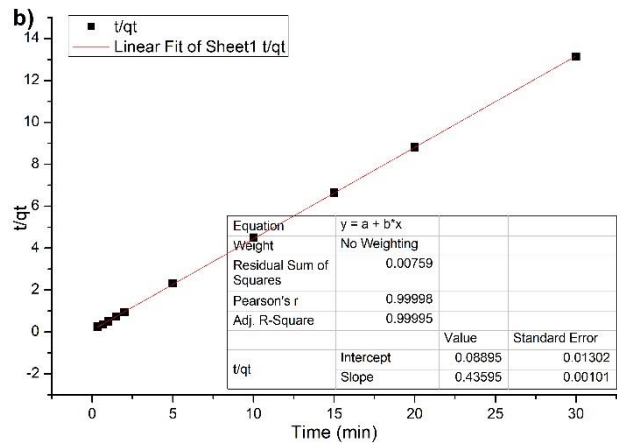
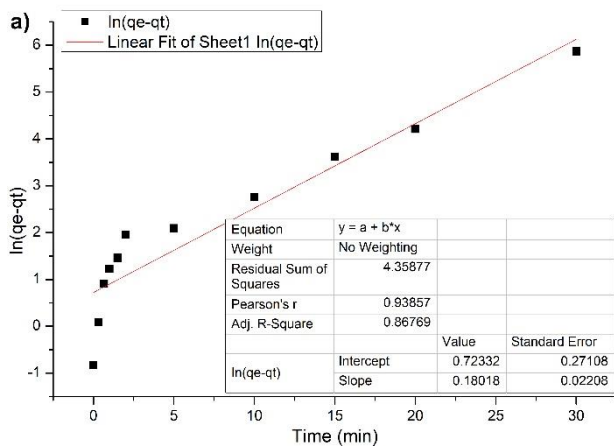


Figure 5. Regression curves of kinetic models a) Pseudo first order, b) Pseudo second order.

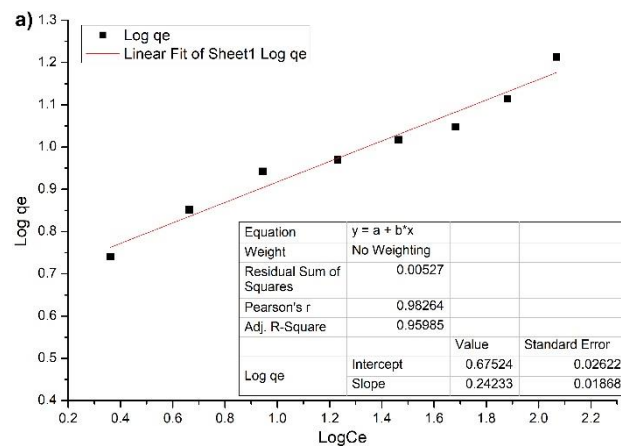
Accordingly, the R^2 value of the Pseudo first-order model was calculated as 0.868, and the R^2 value of the Pseudo second-order kinetic model was calculated as 0.999. According to R^2 values, the most suitable kinetic model for the adsorption of MG dye on kaolin clay is the Pseudo second order model. When the literature was examined, in a study in which MG dye was removed with activated carbon, it was reported that the most appropriate model was Pseudo second order with an R^2 value of 0.999 [37]. Additionally, in a study in which MG dye was removed by using waste ginger materials as biosorbents, it was reported that there was a Pseudo second order kinetic model with an R^2 value of 0.996 [38].

Adsorption isotherm

The results obtained to determine which of the Freundlich, Langmuir and Temkin isotherm models is the most suitable are presented in Table 2. On the other hand, the obtained graphics are displayed in Figure 6.

Table 2. Results of isotherm models calculated for the adsorption of MG dye on kaolin clay.

Isotherm models	Parameters		R^2
Freundlich	$k_F = 4.74$	$1/n = 0.242$	0.960
Langmuir	$k_L = 0.089$	$R_L = 0.407$ $q_{max} = 16.36$	0.958
Temkin	$B_T = 1.032$	$k_T = 3.881$	0.907



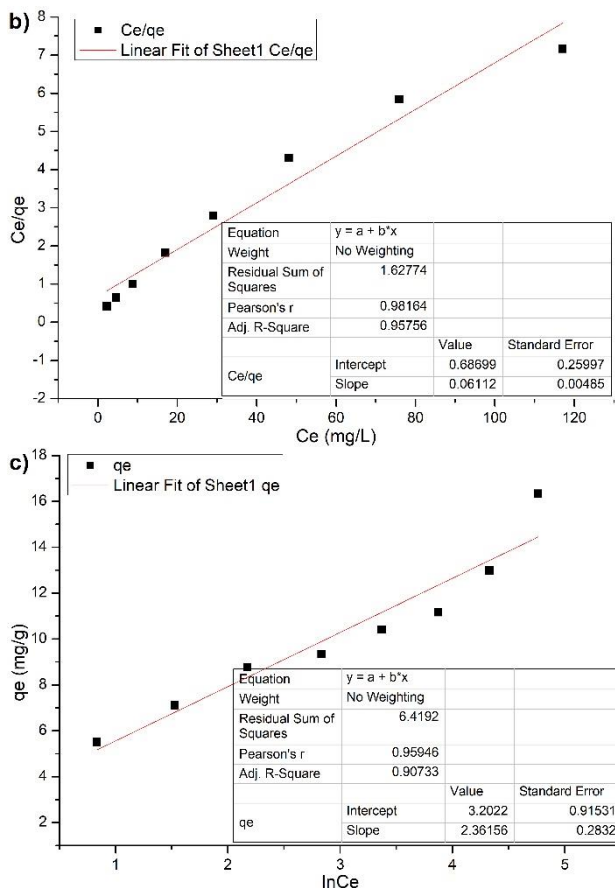


Figure 6. Regression curves of isotherm models (a) Freundlich, b) Langmuir, c) Temkin.

When Table 2 and Figure 6 are examined, the R^2 values of the Langmuir and Temkin models are calculated as 0.958 and 0.907, respectively. On the other hand, the R^2 value of Freundlich isotherm model result is calculated as 0.960. Accordingly, it was determined that the most appropriate isotherm model for the adsorption of MG dye on kaolin clay was Freundlich. Additionally, when looking at the amount of MG dye removed per unit kaolin, this value was calculated as 16.36 mg/g. When the literature was examined, in a study on the removal of MG dye with a composite material, it was reported that the most appropriate model was the Freundlich ($R^2:0.99$) isotherm. On the other hand, the pollutant removal capacity of the composite material was reported to be 44.85 mg/g [39]. Differently, the adsorption of MG dye with rice bran, a natural material, was investigated. In the study, it was reported that the most appropriate model was Freundlich and its q_m value was 68.972 [40].

Conclusions

In this study, the adsorption of MG dye, which causes toxic effects in water, was carried out with kaolin, a cheap, naturally obtained material. The effects of varying pH, adsorbent amount, dye concentration and contact time were investigated, which are effective parameters on adsorption, were examined. According to the results obtained from batch adsorption tests, it was determined that the most suitable kinetic model for the removal of MG dye was Pseudo second order ($R^2: 0.999$), and the most suitable

isotherm model was Freundlich ($R^2: 0.960$). Also, it was determined that the removal efficiency of MG dye was over 99% at room temperature and neutral pH under conditions where the initial dye concentration was 4 mg/L and the amount of kaolin was 1.75 g/L. In addition, FTIR and SEM analyzes were performed on both untreated clay and MG-loaded kaolin clay to obtain information about the characterization of the material. This study found that kaolin clay, a natural and inexpensive material, is effective in removing MG dye.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

Ethics committee approval is not required for this study.

There is no conflict of interest for this study.

References

- [1] S. Dawood and T. K. Sen, "Review on Dye Removal from Its Aqueous Solution into Alternative Cost Effective and Non-Conventional Adsorbents," *Journal of Chemical and Process Engineering*, vol. 1, pp. 1–11, 2014.
- [2] E. Bulut, M. Özacar, and İ. A. Şengil, "Adsorption of malachite green onto bentonite: Equilibrium and kinetic studies and process design," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 115, no. 3, pp. 234–246, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.micromeso.2008.01.039.
- [3] H. Tang, W. Zhou, and L. Zhang, "Adsorption isotherms and kinetics studies of malachite green on chitin hydrogels," *J Hazard Mater*, vol. 209–210, pp. 218–225, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.01.010.
- [4] S. Arellano-Cárdenas, S. López-Cortez, M. Cornejo-Mazón, and J. C. Mares-Gutiérrez, "Study of malachite green adsorption by organically modified clay using a batch method," *Appl Surf Sci*, vol. 280, pp. 74–78, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.apsusc.2013.04.097.
- [5] A. S. Eltaweil, H. Ali Mohamed, E. M. Abd El-Monaem, and G. M. El-Subruiti, "Mesoporous magnetic biochar composite for enhanced adsorption of malachite green dye: Characterization, adsorption kinetics, thermodynamics and isotherms," *Advanced Powder Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 1253–1263, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apt.2020.01.005.
- [6] N. Y. Donkadokula, A. K. Kola, I. Naz, and D. Saroj, "A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques," *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 19, no. 3, pp. 543–560, Sep. 2020, doi: 10.1007/s11157-020-09543-z.
- [7] H. M. Solayman *et al.*, "Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review," *J*

- Environ Chem Eng*, vol. 11, no. 3, p. 109610, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.109610.
- [8] H. Çelebi, İ. Bilican, İ. Şimşek, T. Bahadır, and Ş. Tulun, "Sentetik Atıksulardan Reaktif Sari 145 Boyasının Uzaklaştırılması: Yer Fıstığı Kabuklarının Adsorban Olarak Değerlendirilmesi," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 12, no. 1, pp. 190–204, Mar. 2024, doi: 10.21923/jesd.1445574.
- [9] M. Farahani, S. R. S. Abdullah, S. Hosseini, S. Shojaeipour, and M. Kashisaz, "Adsorption-based Cationic Dyes using the Carbon Active Sugarcane Bagasse," *Procedia Environ Sci*, vol. 10, no. PART A, pp. 203–208, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.PROENV.2011.09.035.
- [10] A. Solmaz, T. Turna, and A. Baran, "Ecofriendly synthesis of selenium nanoparticles using agricultural <scp> *Citrus fortunella* </scp> waste and decolourization of crystal violet from aqueous solution," *Can J Chem Eng*, Jan. 2024, doi: 10.1002/cjce.25179.
- [11] J. M. Dias, M. C. M. Alvim-Ferraz, M. F. Almeida, J. Rivera-Utrilla, and M. Sánchez-Polo, "Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review," *J Environ Manage*, vol. 85, no. 4, pp. 833–846, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.jenvman.2007.07.031.
- [12] Y. Li *et al.*, "Comparative study of methylene blue dye adsorption onto activated carbon, graphene oxide, and carbon nanotubes," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, no. 2, pp. 361–368, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.CHERD.2012.07.007.
- [13] Ö. Kazak, "Single-step pyrolysis for producing activated carbon from sucrose and its properties for methylene blue removal in aqueous solution," *Environmental Research and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 165–175, Jun. 2021, doi: 10.35208/ert.910576.
- [14] R. Rashid, I. Shafiq, P. Akhter, M. J. Iqbal, and M. Hussain, "A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 8, pp. 9050–9066, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-12395-x.
- [15] M. Minamisawa, H. Minamisawa, S. Yoshida, and N. Takai, "Adsorption Behavior of Heavy Metals on Biomaterials," *J Agric Food Chem*, vol. 52, no. 18, pp. 5606–5611, Sep. 2004, doi: 10.1021/jf0496402.
- [16] L.-T.-T.-T. Hoang *et al.*, "Annona glabra L. Seeds: An Agricultural Waste Biosorbent for the Eco-Friendly Removal of Methylene Blue," *Arch Environ Contam Toxicol*, vol. 86, no. 1, pp. 48–57, Jan. 2024, doi: 10.1007/s00244-023-01044-8.
- [17] A. Yildirim, M. F. Baran, and H. Acay, "Kinetic and isotherm investigation into the removal of heavy metals using a fungal-extract-based bio-nanosorbent," *Environ Technol Innov*, vol. 20, p. 101076, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101076.
- [18] M. Jiang, X. Jin, X.-Q. Lu, and Z. Chen, "Adsorption of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) onto natural kaolinite clay," *Desalination*, vol. 252, no. 1–3, pp. 33–39, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.desal.2009.11.005.
- [19] A. H. Jawad and A. S. Abdulhameed, "Mesoporous Iraqi red kaolin clay as an efficient adsorbent for methylene blue dye: Adsorption kinetic, isotherm and mechanism study," *Surfaces and Interfaces*, vol. 18, p. 100422, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.surfin.2019.100422.
- [20] A. Sari, M. Tuzen, D. Citak, and M. Soylak, "Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of adsorption of Pb(II) from aqueous solution onto Turkish kaolinite clay," *J Hazard Mater*, vol. 149, no. 2, pp. 283–291, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.03.078.
- [21] A. H. Jawad and A. S. Abdulhameed, "Mesoporous Iraqi red kaolin clay as an efficient adsorbent for methylene blue dye: Adsorption kinetic, isotherm and mechanism study," *Surfaces and Interfaces*, vol. 18, p. 100422, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.surfin.2019.100422.
- [22] R. K. Liew *et al.*, "Microwave pyrolysis with KOH/NaOH mixture activation: A new approach to produce micro-mesoporous activated carbon for textile dye adsorption," *Bioresour Technol*, vol. 266, pp. 1–10, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2018.06.051.
- [23] S. Wang and E. Ariyanto, "Competitive adsorption of malachite green and Pb ions on natural zeolite," *J Colloid Interface Sci*, vol. 314, no. 1, pp. 25–31, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.jcis.2007.05.032.
- [24] J. Zhang, Y. Li, C. Zhang, and Y. Jing, "Adsorption of malachite green from aqueous solution onto carbon prepared from *Arundo donax* root," *J Hazard Mater*, vol. 150, no. 3, pp. 774–782, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.05.036.
- [25] S. Azizian, "Kinetic models of sorption: a theoretical analysis," *J Colloid Interface Sci*, vol. 276, no. 1, pp. 47–52, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.jcis.2004.03.048.
- [26] S. Nethaji, A. Sivasamy, G. Thennarasu, and S. Saravanan, "Adsorption of Malachite Green dye onto activated carbon derived from *Borassus aethiopicum*

- flower biomass,” *J Hazard Mater*, vol. 181, no. 1–3, pp. 271–280, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.008.
- [27] M. Özacar and İ. A. Şengil, “Adsorption of reactive dyes on calcined alunite from aqueous solutions,” *J Hazard Mater*, vol. 98, no. 1–3, pp. 211–224, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(02)00358-8.
- [28] C. Gerente, V. K. C. Lee, P. Le Cloirec, and G. McKay, “Application of Chitosan for the Removal of Metals From Wastewaters by Adsorption—Mechanisms and Models Review,” *Crit Rev Environ Sci Technol*, vol. 37, no. 1, pp. 41–127, Jan. 2007, doi: 10.1080/10643380600729089.
- [29] S. J. Allen, G. McKay, and J. F. Porter, “Adsorption isotherm models for basic dye adsorption by peat in single and binary component systems,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 280, no. 2, pp. 322–333, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.jcis.2004.08.078.
- [30] S. Ullah *et al.*, “Adsorption of Malachite Green Dye onto Mesoporous Natural Inorganic Clays: Their Equilibrium Isotherm and Kinetics Studies,” *Water (Basel)*, vol. 13, no. 7, p. 965, Mar. 2021, doi: 10.3390/w13070965.
- [31] A. Moumen *et al.*, “Spectral, Isotherm, Kinetic, and Thermodynamic Studies of Malachite Green Dye Adsorption from Aqueous Solutions onto Low-cost Treated Kaolin,” *Physical Chemistry Research*, vol. 12, no. 1, pp. 47–60, 2024.
- [32] J. Zhang *et al.*, “Enhanced adsorption of malachite green on hydroxyl functionalized coal: Behaviors and mechanisms,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 163, pp. 48–57, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.04.072.
- [33] P. Saha, S. Chowdhury, S. Gupta, and I. Kumar, “Insight into adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics of Malachite Green onto clayey soil of Indian origin,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 165, no. 3, pp. 874–882, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.cej.2010.10.048.
- [34] E. Bulut, M. Özacar, and İ. A. Şengil, “Adsorption of malachite green onto bentonite: Equilibrium and kinetic studies and process design,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 115, no. 3, pp. 234–246, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.micromeso.2008.01.039.
- [35] M. Rajabi *et al.*, “Adsorption of malachite green from aqueous solution by carboxylate group functionalized multi-walled carbon nanotubes: Determination of equilibrium and kinetics parameters,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 34, pp. 130–138, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.jiec.2015.11.001.
- [36] A. A. Alqadami, Mu. Naushad, Z. A. Allothman, and T. Ahamad, “Adsorptive performance of MOF nanocomposite for methylene blue and malachite green dyes: Kinetics, isotherm and mechanism,” *J Environ Manage*, vol. 223, pp. 29–36, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.090.
- [37] Y. Önal, C. Akmil-Başar, and Ç. Sarıcı-Özdemir, “Investigation kinetics mechanisms of adsorption malachite green onto activated carbon,” *J Hazard Mater*, vol. 146, no. 1–2, pp. 194–203, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.12.006.
- [38] R. Ahmad and R. Kumar, “Adsorption studies of hazardous malachite green onto treated ginger waste,” *J Environ Manage*, vol. 91, no. 4, pp. 1032–1038, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.jenvman.2009.12.016.
- [39] A. A. Khan, R. Ahmad, A. Khan, and P. K. Mondal, “Preparation of unsaturated polyester Ce(IV) phosphate by plastic waste bottles and its application for removal of Malachite green dye from water samples,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 6, no. 4, pp. 361–368, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.arabjc.2010.10.012.
- [40] X. S. Wang, Y. Zhou, Y. Jiang, and C. Sun, “The removal of basic dyes from aqueous solutions using agricultural by-products,” *J Hazard Mater*, vol. 157, no. 2–3, pp. 374–385, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.004.



Hesko Kaynağı'nın Sulama ve İçme Suyu Kalitesinin Mevsimsel Analizi: Şirvan, Siirt Örneği

Seasonal Analysis of Irrigation and Drinking Water Quality of Hesko Spring: The Case of Şirvan, Siirt

Veysel Süleyman Yavuz

Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Ana Bilim Dalı, vsyavuz@siirt.edu.tr, vsyavuz@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5867-7677>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Mayıs 2024
Revizyon 5 Temmuz 2024
Kabul 1 Ağustos 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Karstik Kaynak,
Sulama Suyu Kalitesi,
Yeraltı Suyu,
Hidrojeokimyasal Analiz,
Piper Diyagramı,
USSL ve Wilcox

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 May 2024
Received in revised form 5 July 2024
Accepted 1 August 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Karst Spring,
Irrigation Water Quality,
Groundwater,
Hydrogeochemical Analysis,
Piper Diagram,
USSL and Wilcox

Doi: 10.24012/dumf.1489246

ÖZ

Bu çalışma, Siirt ili Şirvan ilçesinde bulunan Hesko kaynağının su kalitesinin mevsimsel değişimlerini değerlendirmektedir. 2019/2020 sezonunda gerçekleştirilen düzenli arazi çalışmalarıyla su numuneleri aylık olarak toplanmış ve çeşitli su kalitesi parametreleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, suyun pH, elektriksel iletkenlik (EC), toplam çözülmüş madde (TDS), kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}), sodyum (Na^+), potasyum (K^+), bikarbonat (HCO_3^-), karbonat (CO_3^{2-}), sülfat (SO_4^{2-}), klorür (Cl^-), florür (F^-) ve nitrat (NO_3^-) gibi parametrelerde mevsimsel değişiklikler göstermektedir. Piper diyagramı kullanılarak yapılan hidrokimyasal analiz, suyun büyük ölçüde kalsiyum ve bikarbonat iyonları tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. USSL ve Wilcox diyagramları, suyun orta tuzluluk ve düşük sodyum içeriğine sahip olduğunu göstermiştir, bu da sulama için mükemmel bir su kalitesi anlamına gelir. Bu bulgular, Hesko kaynak suyunun hem içme hem de sulama amacıyla güvenilir bir kaynak olduğunu göstermektedir.

ABSTRACT

This study evaluates the seasonal variations in the water quality of the Hesko spring located in the Şirvan district of Siirt province. Monthly water samples were systematically collected during the 2019/2020 season and various water quality parameters were analyzed. The analysis results indicate seasonal changes in pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), bicarbonate (HCO_3^-), carbonate (CO_3^{2-}), sulfate (SO_4^{2-}), chloride (Cl^-), fluoride (F^-), and nitrate (NO_3^-). Hydrochemical analysis using the Piper diagram revealed that the water is predominantly controlled by calcium and bicarbonate ions. The USSL and Wilcox diagrams indicated that the water has medium salinity and low sodium content, making it excellent for irrigation purposes. These findings demonstrate that Hesko spring water is a reliable source for both drinking and irrigation purposes.

Giriş

Karstik kaynaklar, sulama amaçlı su temini için önemli su kaynaklarıdır. Tarım ürünlerinin büyümesi ve gelişimi için gerekli olan suyun sürekli olarak sağlanmasını temin ederler. Ancak, karstik kaynaklardan gelen suyun kalitesinin sağlanması, ürün sağlığı ve verimliliği üzerinde olumsuz etkileri önlemek için hayati öneme sahiptir. Karstik kaynak sularının sulama amaçlı kullanılabilirliğini belirlemek için pH, elektriksel iletkenlik ve sodyum içeriği gibi parametrelerin değerlendirilmesi gerekmektedir [1].

Karstik kaynaklarda sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesi, tarım ürünlerinin sağlığı ve verimliliğini korumak için kritik öneme sahiptir. Bahsedilen parametrelerin yanı sıra, suyun içinde ağır metaller, pestisitler ve mikrobiyal kirleticilerin varlığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kirleticilerle ilgili potansiyel risklerin anlaşılması, karstik kaynak suyunun sulama için uygunluğu hakkında bilinçli kararlar almak için esastır. Bu değerlendirme, tarımsal ekosistemin korunmasında ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımında temel bir adım olarak hizmet eder. Karstik kaynaklar, altta yatan jeolojik oluşumlarla doğrudan bağlantılı olduklarından, kontaminasyona karşı özellikle hassastırlar. Bu nedenle, suyun içinde ağır metaller, pestisitler ve mikrobiyal kirleticilerin varlığının değerlendirilmesi çok önemlidir. Kurşun, kadmiyum ve arsenik gibi ağır metaller bitki büyümesi üzerinde zararlı etkiler yapabilir ve toprakta birikerek ürün sağlığı üzerinde uzun vadeli riskler oluşturabilir. Benzer şekilde, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan pestisitler ve hayvan atıkları veya insan kaynaklı mikrobiyal kirleticiler su kalitesini ve dolayısıyla tarımsal ürünleri tehlikeye atabilir [2].

Kimyasal ve mikrobiyal yönlerin yanı sıra, karstik kaynakların hidrolojik özelliklerini anlamak da temeldir. Akış dinamikleri, kalış süresi ve çevreleyen akiferle etkileşim, genel su kalitesini belirlemede önemli bir rol oynar. Ayrıca, karstik akiferlerin yüzey kirleticilerinin hızlı infiltrasyonuna karşı duyarlılığı, bu su kaynaklarını etkili bir şekilde yönetmek ve korumak için hidrojeolojik özelliklerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir [3].

Sulama suyunun toprak kalitesi ve tarımsal uygulamaların uzun vadeli sürdürülebilirliği üzerindeki etkisi de dikkate alınmalıdır. Sudan gelen aşırı tuzluluk veya yüksek besin seviyeleri, zamanla toprakta bozulmalara yol açarak sadece mevcut ürün verimini değil, aynı zamanda tarımsal arazinin genel verimliliğini de etkileyebilir [4].

Sonuç olarak, karstik kaynaklarda sulama suyu kalitesinin kapsamlı bir değerlendirmesi hidrojeolojik, toprak ve uzun vadeli sürdürülebilirlik yönlerini içeren bütünsel bir yaklaşımı kapsar. Bu şekilde, tarımsal sistemlerin devam eden sağlık ve verimliliği sağlanabilir. Karstik kaynak

suyundaki kirleticilerin risklerini ve etkilerini anlamak, sürdürülebilir tarım için hayati öneme sahiptir.

Dünyada karstik kaynakların sulama suyu olarak kullanımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, karstik kaynakların su kalitesinin değerlendirilmesine ve bu suların tarımsal sulama için uygunluğunun belirlenmesine odaklanmaktadır. Hoaghia vd. [5], Romanya'daki Apuseni Dağları'nda karstik kaynakların mikrobiyal su kalitesi ve sağlık risklerini değerlendirmiştir, Fashina vd. [6], Tennessee'deki karstik kaynakların mikrobiyal ve fizikokimyasal özelliklerini incelemiştir. Ghaffari vd. [7] karstik bölgelerdeki yeraltı suyu kalitesi ve kirlilik kaynaklarını analiz etmiştir. Dünyanın birçok yerinde yapılan çalışmalar [8-12] karstik kaynakların sulama suyu olarak kullanılmasının önemini göstermektedir.

Türkiye'de karstik kaynakların sulama suyu olarak kullanımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Katsanou vd. [13] Türkiye'nin güneybatısındaki Azmak karstik kaynağın kirlilik kaynaklarını araştırmış, kaynağın hidrodinamik özellikleri ve su kalitesini analiz etmişlerdir. Kaçaroğlu [14] Sivas'ın Gürün ilçesindeki Gökpınar karst kaynaklarının hidrojeolojik incelemesini yaparak sulama suyu sınıflarını belirlemiştir. Diğer yapılan çalışmalar da [15-17], karstik kaynakların su kalitesinin değerlendirilmesine ve bu suların tarımsal sulama için uygunluğunun belirlenmesine odaklanmaktadır.

Bu çalışma, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin Siirt iline bağlı Şirvan ilçesinde bulunan Hesko kaynak suyu üzerinde yapılmıştır. Bu kaynak, 300.000'den fazla kişinin içme ve tarımsal sulama olarak kullandığı kritik bir kaynaktır. 2019/2020 sezonunda gerçekleştirilen düzenli arazi çalışmalarıyla, su numuneleri aylık olarak titizlikle toplanmıştır. Bu numuneler, pH, sıcaklık, toplam çözülmüş madde (TDS), elektriksel iletkenlik (EC) ve Kalsiyum (Ca^{2+}), Magnezyum (Mg^{2+}), Sodyum (Na^{+}), Potasyum (K^{+}), Bikarbonat (HCO_3^{-}), Karbonat (CO_3^{2-}), Sülfat (SO_4^{2-}), Klorür (Cl^{-}), Florür (F^{-}), Nitrat (NO_3^{-}) gibi temel katyon ve anyonlar gibi çeşitli parametrelerin değerlendirilmesi için kapsamlı bir analizden geçirilmiştir. Bu su kalitesi parametreleri arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmak için korelasyon analizleri yapılmış ve bu parametreler mevsimsel olarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada, su kalitesi analizleri ve veri görselleştirmesi için ArcGIS ve OriginPro yazılımları kullanılmıştır. Piper diyagramı, Hesko kaynak suyunun jeokimyasal özelliklerini ortaya koyarak, suyun kimyasal bileşiminin jeolojik formasyonlarla ilişkisini anlamamıza yardımcı olmuştur. Bu analiz, suyun kaynağındaki kayaçların çözünmesi ve kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan iyonik bileşenlerin su kalitesine nasıl katkıda bulunduğunu belirlemede kullanılmıştır. Piper diyagramı ayrıca, suyun sınıflandırılmasında ve farklı su türlerinin karşılaştırılmasında etkili bir araç olmuştur. Sulama suyu

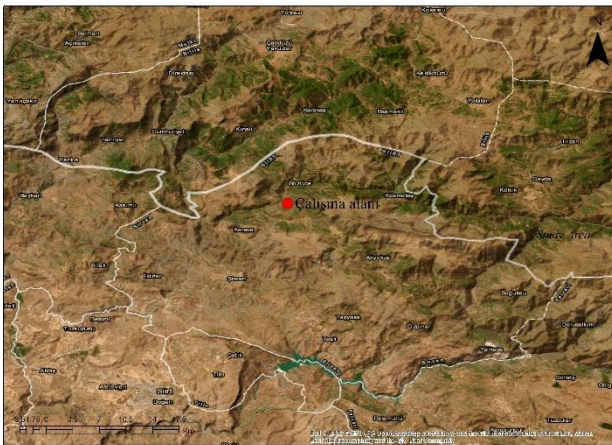
kalitesini değerlendirmek için SAR ve %Na hesaplanmış ve kaynak suyunun sulama uygunluğunu kategorize etmek için ABD Tuzluluk Laboratuvarı (USSL) ve Wilcox diyagramları kullanılmıştır.

Materyal ve Metot

Çalışma Alanı

Çalışma alanı, çeşitli jeolojik yapıları ve önemli hidrojeolojik özellikleriyle dikkat çeken Siirt ilini kapsamaktadır. Toros Dağları silsilesi içinde yer alan Siirt, kuzey ve doğudaki yüksek dağlardan güney ve batıya doğru Mezopotamya ovalarına kadar kademeli olarak eğimlenen karmaşık bir araziye sahiptir. İl, kuzey enlemleri 37°34' ve 38°17', doğu boylamları 41°13' ve 42°40' arasında yer almakta olup, yaklaşık 5.406 kilometrekarelik bir alanı kaplamaktadır. Siirt'in iklimi ağırlıklı olarak karasaldır; sıcak, kuru yazlar ve soğuk, karlı kışlar ile karakterize edilir ve bu durum bölgenin çeşitli topoğrafyasını yansıtır. Yıllık yağış miktarı ortalama 600 mm civarındadır ve ağırlıklı olarak ilkbahar ve sonbahar aylarında gerçekleşir, bu da ildeki tarımsal döngüleri ve su kaynakları yönetimini önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışma alanındaki yükselti, alçak bölgelerde 600 metreden dağlık alanlarda 3.000 metrenin üzerine kadar geniş bir aralıkta değişiklik göstererek çeşitli ekolojik manzaralar yaratmaktadır [18].

İlin nüfusu yaklaşık 330.000 olup, bu nüfus Siirt şehir merkezinde ve çeşitli kırsal kasaba ve köylerde dağılım göstermektedir. Siirt'in hidrojeolojisinin önemli bir özelliği, karstik oluşumlardan 1110 metre yükseklikte çıkan ve içme suyu sağlayan kritik bir kaynak olan Hesko kaynağıdır. 38°8'40.7" Doğu ve 42°4'24.4" Kuzey koordinatlarında bulunan bu kaynak, 1990 yılından bu yana tüm nüfusa su sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. İçme suyu sağlamanın ötesinde, ilin ekonomisinin temelini oluşturan ve kültürel bir simgesi olan Siirt fıstığı bahçelerinin sulanmasında da Hesko kaynak suyu kullanılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı.

İlin jeolojik temeli, kireçtaşı ve dolomit gibi sedimanter kayalardan oluşmakta olup, karstik peyzajların oluşumunda kritik bir rol oynamaktadır. Bu jeolojik koşullar, Hesko gibi kaynakların ortaya çıkmasını sağladığı gibi yeraltı su kaynaklarının dağılımını ve

kullanılabilirliğini de belirlemektedir. Sonuç olarak, Siirt'in jeolojik oluşumları, iklimi ve hidrojeolojisi arasındaki etkileşim, tarımsal uygulamalardan kentsel ve kırsal su temin sistemlerine kadar her şeyi şekillendirerek ilin çevresel ve sosyo-ekonomik yapısının oluşmasında belirleyici olmaktadır.

Arazi Çalışması

Su numuneleri kaynaktan toplanmıştır. Numune toplama süreci, su kalitesindeki mevsimsel değişimleri yakalamak için bir yıl boyunca aylık olarak gerçekleştirilmiştir. Her numune alma işlemi, önceden temizlenmiş polietilen şişelere doldurulmuştur. Şişeler, kimyasal değişiklikleri en aza indirmek için kapatılıp 4°C'de saklanmıştır. GPS koordinatları ile kaynak noktası için koordinatları kaydedilmiştir.

Laboratuvar Analizleri

Numuneler toplandıktan sonra, 24 saat içinde analize gönderilmiştir. Su ve atık su incelemesi için standart yöntemler [19] takip edilmiştir. Sıcaklık, pH ve EC yerinde ölçülmüştür. Toplam sertlik (TH), bikarbonat alkalinitesi ve toplam alkalinite titrimetrik yöntemlerle belirlenmiştir. EDTA titrimetrik yöntemi ile sertlik ve sülfürik asit ile pH 4.5'e titrasyon yapılarak alkalinite ölçülmüştür [20].

Kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonları, ICP-OES kullanılarak ölçülmüştür. Sodyum ve potasyum seviyeleri alev fotometrisi veya ICP-OES ile belirlenmiştir. Bikarbonat ve karbonat iyonlarının konsantrasyonları, alkalinite titrasyonu sırasında ölçülmüştür. Sülfat konsantrasyonu, bulanıklık veya iyon kromatografisi ile değerlendirilmiştir. Klorür, gümüş nitrat ile titrasyon veya iyon kromatografisi ile ölçülmüştür. Nitrat seviyeleri, UV spektrofotometri veya iyon kromatografisi ile belirlenmiştir. Florür konsantrasyonu, iyon-selektif elektrot veya iyon kromatografisi ile ölçülmüştür.

ICP-OES cihazı PerkinElmer Inc. Optima 2100 DV, pH; Hanna Hı 2211 pH/Orp Metre, EC; Mettler Toledo SevenCompact Conductivity ve TDS; VWR CO30000L marka ve modelleri kullanılmıştır.

Piper Diyagramı

Piper diyagramı, Piper [21] tarafından tanımlan ve su numunelerinin hidrokimyasal fasiyeslerine göre kapsamlı bir şekilde sınıflandırılmasını sağlayan bir üçgen diyagramdır. Bu diyagram, katyonlar (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Na^{+}+K^{+}$) ve anyonlar (Cl^{-} , SO_4^{2-} , $CO_3^{2-}+HCO_3^{-}$) için iki ayrı üçgen diyagramı, katyon ve anyon verilerini birleştiren merkezi bir grafikte birleştirir. Bu grafiksel temsil, suyun kimyasal özelliklerini tanımlamada ve su kimyasını etkileyen jeolojik süreçleri anlamada yardımcı olur.

SAR ve %Na

Sulama suyundaki sodyum tehlikesini değerlendirmek için, Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) ve Sodyum yüzdesi (%Na) kritik göstergelerdir. SAR formülü ve %Na hesaplaması, sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum konsantrasyonlarının miliekivalan/litre

(meq/L) cinsinden ölçülmesini içerir ve bu sayede suyun tarımsal kullanım için uygunluğu değerlendirilebilir [22].

SAR, suyun tarımsal kullanım için uygunluğunu belirlemek amacıyla kullanılan bir ölçüdür ve sodyumun toprakta birikme potansiyelini ve bunun toprak yapısı ve verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirir. Yüksek SAR değeri, toprak sodikliğine yol açabilecek bir riski gösterir ve bu da toprak suyu infiltrasyonunu ve hava dolaşımını engelleyebilir. Genellikle, SAR değeri 10'un altında olan sular çoğu bitki için güvenli kabul edilirken, 18'in üzerinde olan değerler sodyum birikimi riski nedeniyle toprak bozulmasına yol açabileceğini belirtir.

SAR şu şekilde hesaplanır:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

Sulama suyu için %Na, suyun tarımsal sulama için uygunluğunu değerlendirirken kritik bir parametredir, çünkü toprak yapısını, geçirgenliğini ve bitki büyümesini etkiler ve şu şekilde hesaplanır:

$$\%Na = \frac{Na^+}{Na^++K^++Ca^{2+}+Mg^{2+}} \times 100 \quad (2)$$

USSL ve Wilcox Diyagramları

USSL tuzluluk diyagramı, sulama suyu kalitesini değerlendirmek için kullanılır ve suyun tuzluluk tehlikesi ile SAR'ını değerlendirir. ABD Tuzluluk Laboratuvarı tarafından geliştirilen bu diyagram, EC ve SAR değerlerine dayanarak suyu sınıflandırır ve suyun sulama için uygunluğunu belirler [23]. Wilcox diyagramı ise suyun SAR ve EC değerlerine göre sulama için uygunluğunu değerlendiren grafiksel bir temsildir [24]. Bu diyagram, suyu 'çok iyi'den 'sulamaya uygun değil'e kadar farklı uygunluk kategorilerine ayırır. Bu yöntemler, su kalitesinin kapsamlı analizinde, hidrojeokimyasal özelliklerin ve suyun çeşitli kullanımlar için uygunluğunun belirlenmesinde önemli bir rol oynar.

Bu çalışmada, Hesko kaynağının su kalitesinin mevsimsel değişimlerini değerlendirmek için çeşitli hidrojeokimyasal analiz yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerin seçilmesinin ardındaki nedenler ve bu yöntemlerin sağladığı faydalar bulunmaktadır. Bunlar; Piper diyagramı, su numunelerinin kimyasal bileşenlerini grafiksel olarak temsil eden ve suyun hidrojeokimyasal fasyelerini belirlemeye yardımcı olan etkili bir yöntemdir. Bu diyagram, suyun içindeki ana anyon ve katyonların oranlarını göstererek suyun genel kimyasal karakterini ortaya koyar. Piper diyagramının kullanılması, suyun jeokimyasal süreçlerini anlamamıza yardımcı olur ve su kalitesini değerlendirmede önemli bir araçtır. Alternatif yöntemler arasında Stiff veya Schoeller diyagramları yer alsa da, Piper diyagramı daha kapsamlı bir temsil sağlar ve bu nedenle tercih edilmiştir. USSL ve Wilcox diyagramları, sulama suyunun kalitesini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu diyagramlar, suyun EC ve SAR gibi parametrelerine dayalı olarak suyun tuzluluk ve sodyum içeriğini analiz eder. Bu yöntemler, sulama suyu kalitesini değerlendirmede standart kabul edilir ve tarımsal uygulamalarda suyun kullanılabilirliğini belirlemede

büyük önem taşır. Alternatif olarak Cation Ratio veya Residual Sodium Carbonate (RSC) gibi diğer yöntemler kullanılabilir, ancak USSL ve Wilcox diyagramları daha geniş kabul görmekte ve güvenilir sonuçlar sağlamaktadır. Su numunelerinin laboratuvar analizleri, suyun kimyasal bileşenlerini belirlemek için titrimetrik yöntemler, alev fotometrisi ve ICP-OES gibi ileri teknoloji ekipmanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler, suyun içindeki iyon konsantrasyonlarını yüksek doğrulukla ölçmekte ve su kalitesini kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir. Alternatif yöntemler arasında gravimetrik analizler veya renk tayini yöntemleri yer alsa da, kullanılan yöntemler daha yüksek hassasiyet ve güvenilirlik sunmaktadır. Su kalitesindeki mevsimsel değişiklikleri değerlendirmek için su numuneleri düzenli aralıklarla toplanmış ve analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, suyun kalitesindeki mevsimsel değişimlerin tam olarak izlenmesini sağlar.

Bu yöntemlerin seçilmesindeki ana nedenler, su kalitesinin kapsamlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak, suyun hem içme hem de sulama amaçlarına uygunluğunu belirlemek ve elde edilen sonuçların geçerliliğini ve güvenilirliğini artırmaktır.

Sonuçlar ve Tartışma

Hesko kaynağından alınan su numunelerinin analizi ile karstik akifer sisteminin su kalitesi ve hidrojeokimyasal özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlanmıştır. Sonuçlar Tablo 1a ve 1b'de sunulmaktadır. Siirt'teki su sertliği, mevsimsel mineral çözünmesi nedeniyle dalgalanmakta olup, bu da potansiyel kireçlenme sorunlarına işaret eden daha sert su anlamına gelmektedir. Sulama açısından önemli olan sodyum, kademeli bir artış gösterirken, potasyum düşük seviyelerde kalmaktadır. Karbonat minerallerinin etkisiyle bikarbonat dengesi, suyun hafif alkalin pH seviyesini korumakta, bu da suluc yaşam için faydalı olup korozyonu minimize etmektedir. Doğal veya insan kaynaklı olabilecek sülfat ve klorür değişiklikleri, suyun tadını ve sağlığını etkileyebilir. Nitrat izleme, sağlık riskleri ve ötrofikasyon potansiyeli nedeniyle önemlidir. Mevsimsel sıcaklık değişimleri, su kimyasını ve organizmaların davranışlarını etkiler. EC ve TDS seviyeleri, mineralizasyonu yansıtarak içme ve tarım için uygun olan taze su kalitesini göstermekte, ancak belirli kullanımlar için tuzluluk ve pH yönetimi gerektirmektedir.

Kalsiyum ve Magnezyum; su sertliğine büyük katkıda bulunan kalsiyum ve magnezyumun varlığı, aylara göre değişiklik göstermektedir. Bu değişiklikler, çevredeki jeolojiden minerallerin çözünmesini etkileyen mevsimsel su akışı değişikliklerinden kaynaklanabilir. Bu iyonların daha yüksek konsantrasyonları genellikle daha sert suyu gösterir ve bu durum, borularda ve cihazlarda kireçlenme gibi ev ve sanayi kullanımları için önemli olabilir. Analiz sonuçlarındaki sertlik değerleri de sırasıyla; mart, 132.178; nisan, 137.97; mayıs, 93.85; haziran, 131.18; temmuz, 155.9; ağustos, 178.66; eylül, 150.9; ekim, 157.98; kasım, 314.86; aralık, 291.31; ocak, 303.21 ve şubat, 161.279 mg CaCO₃/l olarak bulunmuştur.

Sodyum ve Potasyum; sodyum seviyeleri, kalsiyum ve magnezyuma göre oldukça düşük olmasına rağmen, yavaşça artmaktadır ve bu suyun sulama için kullanılması durumunda sodyuma duyarlı bitkiler için potansiyel endişeler yaratabilir. Potasyum seviyeleri sürekli olarak düşüktür, bu kaynak sular için tipiktir çünkü potasyum jeolojik malzemelerde daha az bulunur.

Tablo 1a. Kaynak suyu analiz sonuçları.

Aylar	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Mart	7.64	357	41.10	7.176	0.487	0.200
Nisan	7.55	339	46.85	5.262	0.559	0.104
Mayıs	7.49	276	31.92	3.437	0.354	0.500
Haziran	7.62	296	43.10	5.722	0.511	0.154
Temmuz	7.47	349	50.80	7.314	0.720	0.214
Ağustos	7.46	391	55.71	9.606	0.979	0.216
Eylül	7.43	413	44.59	9.606	0.858	0.112
Ekim	7.51	422	46.66	10.07	1.153	0.210
Kasım	7.59	390	105.3	12.61	1.416	0.616
Aralık	7.75	358	99.00	10.71	1.199	0.559
Ocak	7.77	373	102.3	11.60	1.230	0.571
Şubat	7.14	375	54.27	6.257	0.725	0.300

pH: birimsiz; EC: $\mu\text{S}/\text{cm}$; katyonlar: mg/l

Bikarbonat seviyelerinin istikrarı, suya karışan karbonat minerallerinin sürekli etkisini göstermektedir ve bu durum suyun pH'ını hafif alkali bir aralıkta tutarak doğal bir tamponlama etkisi sağlar. Bu istikrar, sucul yaşam için önemlidir ve diğer minerallerin çözünürlüğünü etkileyebilir.

Tablo 2b. Kaynak suyu analiz sonuçları.

Aylar	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	TDS
Mart	268.40	9.787	0.94	1.278	0.04	170.3
Nisan	268.40	7.079	0.79	0.966	0.02	170.6
Mayıs	207.40	4.752	0.43	0.942	0.05	121.0
Haziran	207.40	9.103	0.53	1.133	0.02	135.0
Temmuz	280.60	11.39	0.72	1.482	0.01	165.3
Ağustos	329.70	16.00	0.86	1.579	0.09	167.7
Eylül	345.26	18.42	1.29	0.764	0.12	189.0
Ekim	314.76	19.95	3.02	1.374	0.14	197.1
Kasım	314.76	20.80	1.24	1.545	0.11	193.3
Aralık	240.34	19.90	1.25	3.678	0.09	176.8
Ocak	272.06	19.68	1.21	2.617	0.09	182.4
Şubat	292.80	11.38	1.02	1.616	0.06	200.8

tüm birimler mg/l 'dir.

Sülfat ve Klorür konsantrasyonlarındaki değişiklikler, tarımsal akıntılar veya endüstriyel deşarjlar gibi farklı kirlilik kaynaklarını veya evaporit minerallerin çözünmesi gibi doğal süreçleri gösterebilir. Bu anyonların yüksek seviyeleri, suyun tadı, korozyonu ve bazı durumlarda sağlık sorunları açısından endişe kaynağı olabilir.

Nitrat seviyeleri düşük başlamasına rağmen, özellikle gübre kullanımının yüksek olduğu tarımsal alanlarda izlenmesi önemlidir. Yüksek nitrat seviyeleri, özellikle bebekler için insan sağlığı açısından risk oluşturabilir ve sucul ortamlarda ötrofikasyon potansiyelini gösterir.

EC'deki değişiklikler, suyun toplam iyon içeriğini yansıtır ve daha yüksek değerler, daha yüksek mineralizasyonu gösterir. EC, genel su kalitesinin hızlı bir

göstergesi olabilir ve içme suyu standartları ve tarımsal kullanım açısından, özellikle bitkilerde tuzluluk stresi açısından önem taşır.

pH; hafif alkali aralıkta kalan pH'taki hafif değişiklikler, dağıtım sistemlerinde korozyonu önlemek için faydalıdır ve çoğu kullanım için genellikle uygundur. Ancak, suyun belirli endüstriyel işlemler veya hassas ekosistemler için uygunluğu, pH kontrolünü daha yakından gerektirebilir.

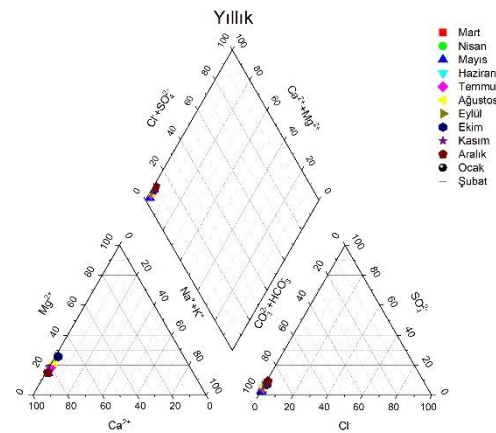
TDS seviyeleri, su kalitesinin genel bir ölçüsünü sağlar ve gözlemlenen aralık, nispeten taze suyu göstermektedir. Yüksek TDS, suyun tadını etkileyebilir ve aşırı yüksek seviyeler, toksisite veya tuzluluk sorunları nedeniyle içme veya sulama için su kullanımını sınırlayabilir.

Sertlik; su, orta sertliktedir ve bu durum, kireçtaşı veya dolomitten etkilenen yeraltı suları için tipiktir. Ev kullanımı için su yumuşatma düşünülebilir, ancak sertlik insan sağlığı için faydalıdır.

Sıcaklık; mevsimsel sıcaklık değişiklikleri, sudaki kimyasal reaksiyonları, gazların çözünürlüğünü ve sucul organizmaların davranışlarını etkileyebilir. Kayıtlı sıcaklıklar, ılıman bir iklimi işaret etmektedir ve bu durum mevsimsel su kalitesi değişiklikleri için potansiyel anlam taşır.

Bu sonuçlar, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımı için sürekli izleme ve yönetimin önemini vurgulamaktadır. Kapsamlı analiz, eğilimleri, potansiyel kirlilik kaynaklarını ve farklı kullanımlar için su kalitesi standartlarını karşılamak için gerekli olan spesifik arıtma süreçlerini belirlemede yardımcı olur.

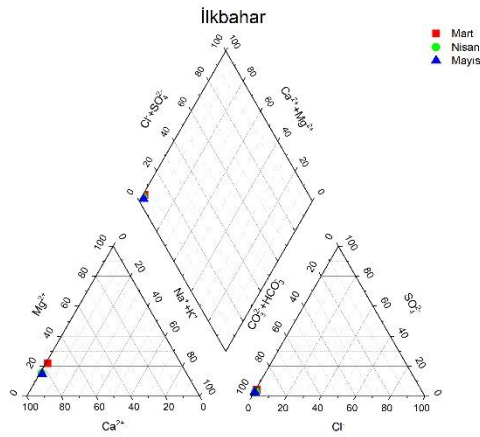
Hesko kaynak suyunun Piper diyagramı, yıl boyunca nispeten sabit bir su kimyasını göstermekte olup, baskın iyonlar tipik bir karstik sistem etkisini işaret etmektedir. Kalsiyum ve bikarbonat konsantrasyonları, suyun kireçtaşı veya dolomit ile etkileşime girdiğini ve bu minerallerin suya çözündüğünü göstermektedir. Yıl boyunca sürekli olarak sülfat varlığı, alçıtaşı çözünmesi veya tarımsal akıntılar gibi insan kaynaklı girdilerin etkisini işaret etmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Hesko kaynağı Piper diyagramı.

Mevsimsel değişiklikler mevcut olmakla birlikte büyük fark bulunmamaktadır, bu da suyun farklı aylarda genel

kalitesini koruduğunu göstermektedir. Mart ayında kalsiyumda hafif bir artış gözlenmekte olup, bu durum daha yağışlı dönemlerde artan su-kaya etkileşimine bağlanabilir. Buna karşılık, genellikle daha kurak olan Haziran ile Ağustos ayları arasında klorür seviyelerinde hafif bir artış gözlenmekte, bu da yağışlardan kaynaklanan seyrelmenin azalmasına bağlı olabilir. Hesco kaynak suyu için Piper diyagramındaki yıllık eğilimler, içme ve tarımsal amaçlar için kullanıma uygun, iyi tamponlanmış ve dengeli iyonik bileşime sahip bir su tipi önermektedir. Ayrıca, aylık verilerin çizimdeki pozisyonlarında önemli değişimlerin olmaması, uzun vadeli planlama ve kullanım için güvenilir ve tutarlı bir su kaynağı olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 3. İlkbahar mevsimi Piper diyagramı.

Şekil 3'de görülen ilkbahar mevsimi için Piper diyagramı, kaynak suyunun hidrokimyasal fasiyelerini göstermektedir. Veri noktalarının dağılımı, kalsiyum ve bikarbonat iyonları tarafından büyük ölçüde etkilenen bir su tipini işaret etmekte olup, bu durum karbonat litolojileri ile kaya-su etkileşimi geçiren sular için tipiktir.

Kasyon üçgeninde, veri noktaları kalsiyum köşesine doğru yoğunlaşmış olup, bu da kalsiyumun magnezyum, sodyum ve potasyum gibi diğer kasyonlara göre önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, akiferde bulunan kalsit veya dolomit minerallerinin çözünmesi ile tutarlıdır. Anyon üçgeninde bikarbonatın baskınlığı bu yorumu desteklemekte ve karbonat ayrışmasının temel jeokimyasal süreç olduğunu göstermektedir.

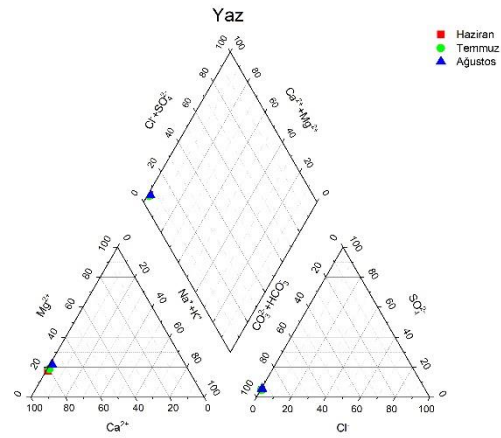
Mart, Nisan ve Mayıs aylarından alınan numuneler, ilkbahar mevsimi boyunca istikrarlı hidrokimyasal koşulları göstererek birbirine yakın gruplandırılmıştır. Bazı numunelerde anyon üçgeninde sülfat tarafına doğru hafif bir yayılma görülmekte olup, bu durum alçıtaşı veya anhidrit gibi sülfat minerallerinin çözünmesinden veya tarımsal akıntılar gibi insan kaynaklı kaynaklardan küçük bir katkı olabileceğini göstermektedir.

Kasyon ve anyon verilerini birleştiren merkezi grafik, suyun kalsiyum-bikarbonat tipi olarak sınıflandırılmasını daha da doğrulamaktadır. Bu dönemde su kimyasının istikrarı, akiferin önemli mevsimsel değişimlere maruz

kalmadığını ve tutarlı bir mineral dengesi koruduğunu göstermektedir (Şekil 3).

Şekil 4'de yaz mevsimi için oluşturulan Piper diyagramı verilmiştir. İlkbahar'dan gelen hidrokimyasal özelliklerde bir süreklilik göstermekte olup, kalsiyum ve bikarbonat iyonlarına açık bir vurgu yapmaktadır. Bu durum, akiferin su kimyası üzerinde güçlü bir kontrol sağlamaya devam ettiğini ve mevsimsel geçişin önemli hidrokimyasal değişiklikler getirmediğini göstermektedir.

Kasyon üçgeninde, yaz aylarındaki numuneler de kalsiyum baskınlığına doğru eğilim göstermekte olup, karbonat minerallerinin çözünmesinin devam eden hidrojeokimyasal süreç olduğunu pekiştirmektedir. Anyon üçgeninde bikarbonat baskınlığı süreklilik göstermekte olup, sülfat ve klorür iyonlarının ihmal edilebilir varlığı, bu dönemde önemli buharlaşma veya insan kaynaklı etkilerin olmadığını gösterebilir.



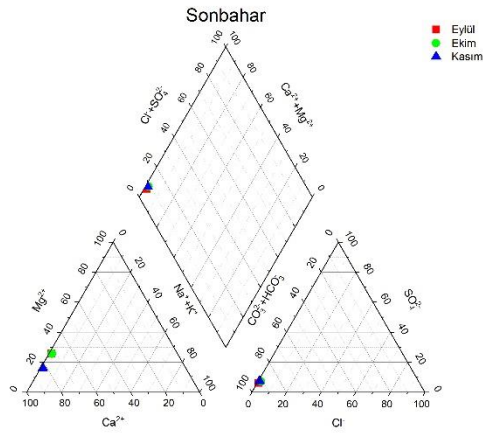
Şekil 4. Yaz mevsimi Piper diyagramı.

Haziran, temmuz ve ağustos aylarına ait veri noktaları, merkezi grafikteki kalsiyum-bikarbonat alanı içinde sıkıca gruplandırılmıştır. Bu sıkı gruplama, iyon konsantrasyonları ve oranlarında minimal bir varyasyon olduğunu ve akiferin önemli mevsimsel etkiler olmadan sabit bir iyon salınımı sağladığını düşündürmektedir.

Bazı numunelerde magnezyum artışına doğru hafif bir kayma, dolomit ayrışmasını veya akiferin jeolojisinde magnezyum kaynaklarını işaret edebilir. Ancak, bu kayma, genel su tipinde büyük bir değişiklik öneren kadar önemli değildir (Şekil 4).

Şekil 5'de sonbahar mevsimi için Piper diyagramı görünmekle beraber, önceki mevsimlerle tutarlı hidrokimyasal karakteri göstermekte olup, ağırlıklı olarak kalsiyum ve bikarbonat iyonları tarafından yönetilmektedir. Veri noktaları, kasyon üçgeninin kalsiyum köşesine doğru sabit kalmakta olup, karbonat minerallerinin sürekli çözünmesini işaret etmektedir. Bu, yıl boyunca istikrarlı ve devam eden bir süreçtir.

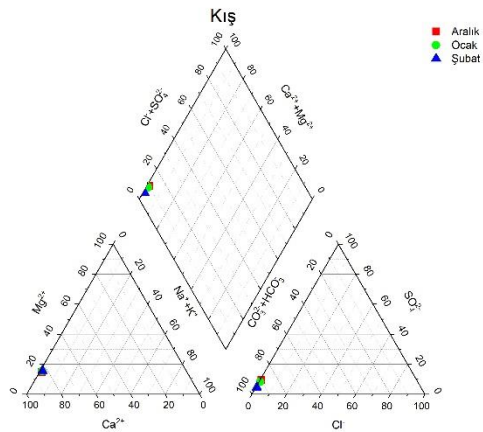
Anyon üçgeni de bikarbonat baskınlığını sürdürmektedir. Anyon bileşimindeki bu süreklilik, akiferin tamponlama kapasitesinin etkili kaldığını ve organik madde dönüşümü gibi sonbahar değişikliklerinin kaynağını su kimyasını önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir.



Şekil 5. Sonbahar mevsimi Piper diyagramı.

Sonbahar aylarına ait veri noktaları, merkezi grafikte kalsiyum-bikarbonat su tipi sınıflandırmasını korumaktadır. Eylül, ekim ve kasım aylarından alınan numuneler birbirine yakındır, bu da yaz mevsiminden sonbahara geçişin kaynak suyu üzerinde önemli bir hidrojeokimyasal etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Bu aylardaki istikrar, kısa vadeli mevsimsel değişimlere karşı dirençli, iyi tamponlanmış bir sistemi işaret etmektedir.

Bu hidrokimyasal istikrar, aynı zamanda, büyüme sezonunda yeraltı suyuna ek iyonlar katkıda bulunan önemli tarımsal faaliyetlerin yokluğunu da yansıtabilir. Diğer iyonlara doğru minimal kayma, yeraltı suyunun sonbahar dönemindeki diğer potansiyel kaynaklardan önemli miktarda girişi almadığını göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 6. Kış mevsimi Piper diyagramı.

Şekil 6'da kış mevsimi için Piper diyagramı verilmiş olup önceki mevsimlerde gözlemlenen kalsiyum-bikarbonat su tipi eğiliminin devam ettiğini göstermektedir. Veri noktaları, katyon üçgeninde kalsiyum köşesine ve anyon üçgeninde bikarbonat köşesine doğru sabit kalmakta olup, karbonat kaya ayrışmasının suyun kimyasını tanımlamadaki rolünü daha da vurgulamaktadır.

Kış boyunca, katyon üçgeni, kalsiyumun magnezyum, sodyum ve potasyum üzerinde devam eden baskınlığını göstermektedir. Bu durum, daha soğuk sıcaklıkların mineral çözünme kinetiğini yavaşlatmasına rağmen, kalsit ve dolomit ayrışmasını desteklemesiyle açıklanabilir. Anyon üçgeni, bikarbonat baskınlığını pekiştirmekte olup, sülfat ve klorürün sadece iz seviyelerinde temsil edilmesi, buharlaşma yoğunlaşması veya insan kaynaklı kirliliğin kısım bile önemsiz veya var olmayan bir rol oynadığını göstermektedir.

Aralık, ocak ve şubat aylarına ait veri noktaları, merkezi grafikte kalsiyum-bikarbonat alanı içinde sıkıca gruplandırılmıştır. Bu tekdüzelik, artan yağış veya eriyen karın su kimyasını seyreltme potansiyeline rağmen, akiferin karakteristik mineral çözünme profilini koruduğunu göstermektedir.

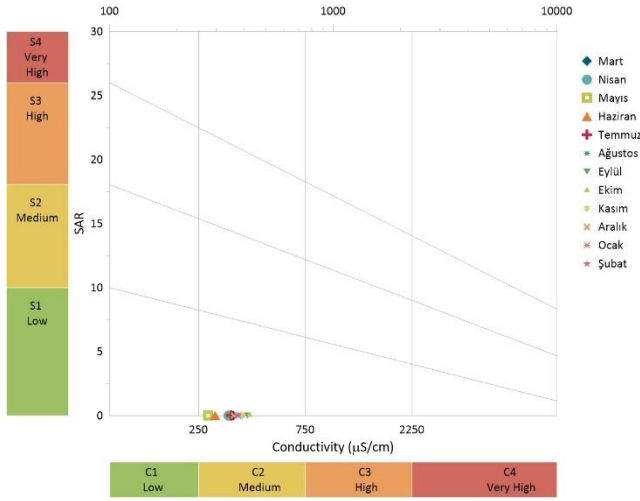
Ayrıca, kış diyagramının diğer mevsimlerle olan benzerliği, mevsimsel değişiklikleri, özellikle donma-çözülme döngüleri ve potansiyel yol tuzu sızıntıları gibi kış hava koşullarının getirebileceği değişiklikleri etkin bir şekilde hafifleten güçlü bir tamponlama kapasitesine sahip hidrojeolojik bir sistemi işaret etmektedir.

Kış mevsimi Piper diyagramı, yıllık hidrokimyasal döngüyü tamamlayarak, kaynak suyunun yıl boyunca akiferin karbonat jeolojisinin belirgin etkisini yansıtan son derece stabil bir kalsiyum-bikarbonat imzasına sahip olduğunu doğrulamaktadır (Şekil 6).

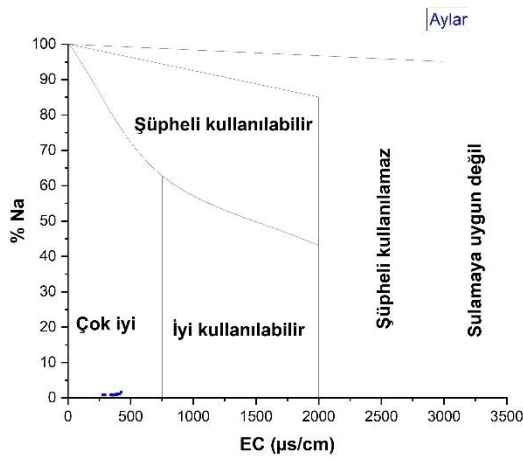
Dört mevsim boyunca Piper diyagram analizleri, jeolojik temel tarafından yönetilen tutarlı bir hidrokimyasal çerçeveyi göstermektedir. Su tipi mevsimler boyunca kalsiyum-bikarbonat olarak kalmakta olup, önemli bir tamponlama kapasitesine sahip ve dış faktörlerden minimal etkilenen stabil bir akifer sistemini işaret etmektedir. Bu sonuçlar, akiferin hidrojeokimyasal dinamiklerinin ve su kaynakları yönetimi üzerindeki etkilerinin ayrıntılı bir tartışması için temel oluşturmaktadır.

Kaynak suyu için oluşturulan USSS diyagramı, tüm aylık veri noktalarını 'C2S1' bölgesinde göstermektedir, bu da orta tuzluluk ve düşük sodyum içeriğine sahip su anlamına gelir. Bu sınıflandırma, suyun sulama amaçları için mükemmel olduğunu, toprakta tuzluluk birikimi veya sodyum kaynaklı toprak yapısı bozulması riski taşımadığını göstermektedir. Ekim ve Eylül aylarındaki en yüksek SAR değerleri bile suyu 'S1' kategorisinden çıkarmamakta, bu da bitkiler için önemsiz bir sodyum tehlikesine karşılık gelmektedir (Şekil 3).

Wilcox diyagramı, %Na'yı EC ile ilişkilendirerek suyu sulama için 'Çok iyi' den 'Sulamaya uygun değil'e kadar değişen sınıflara ayırır. Yıl boyunca kaynak suyu verileri 'Çok iyi' kategorisinde yer almakta olup, sodyum içeriği ve tuzluluk açısından ideal sulama suyu olduğunu göstermektedir. Tüm aylarda %Na değerleri düşük ve EC değerleri de düşük olup, bu da kaynak suyunun toprakta tuzlanma veya sodiklik yaratmayacağını göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 3. Hesko kaynağı USSS diyagramı.



Şekil 4. Hesko kaynağı Wilcox diyagramı.

Hesko kaynağının su kalitesinin mevsimsel değişimlerini inceleyen bu çalışmada elde edilen bulgular, bölgedeki hidrojeokimyasal süreçlerin ve su kalitesinin detaylı bir analizini sunmaktadır. Bu bölümde, elde edilen sonuçlar daha derinlemesine incelenmiş ve su kalitesine ilişkin önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Mevsimsel değişimler ve hidrojeokimyasal süreçler; çalışmanın sonuçları, Hesko kaynağının su kalitesinin mevsimsel değişimlere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, kalsiyum ve bikarbonat iyonlarının baskın olduğu görülmüştür. Bu bulgu, karstik kaynakların karakteristik özellikleriyle uyumludur ve suyun kimyasal bileşiminin çevresel koşullara ve mevsimsel değişimlere duyarlılığını göstermektedir. Piper diyagramları, suyun kimyasal bileşiminin yıl boyunca stabil kaldığını ve kalsiyum-bikarbonat su tipinin baskın olduğunu göstermektedir.

Önceki çalışmalarla karşılaştırma; elde edilen bulgular, Türkiye ve dünya genelinde yapılan diğer karstik kaynak çalışmalarıyla uyumludur. Örneğin; Hoaghia vd. [5] tarafından Romanya'daki Apusenî Dağları'nda yapılan çalışmada da karstik kaynakların mikrobiyal su kalitesi ve sağlık riskleri incelenmiş ve suyun kimyasal bileşiminin mevsimsel olarak değiştiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, Fashina vd. [6] Tennessee'deki karstik kaynakların

mikrobiyal ve fizikokimyasal özelliklerini incelemiş ve su kalitesinin mevsimsel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur.

Türkiye'deki karstik kaynakların sulama suyu olarak kullanılabilirliğine ilişkin çalışmalar da bu bulgularla tutarlıdır. Katsanou vd. [13] Türkiye'nin güneybatısındaki Azmak karstik kaynağının kirlilik kaynaklarını ve su kalitesinin mevsimsel olarak değişebileceğini belirtmiştir. Kaçaroglu [14] Sivas'ın Gürün ilçesindeki Gökpınar karstik kaynaklarının hidrojeolojik incelemesini yaparak sulama suyu sınıflarını belirlemiştir ve bu çalışma da su kalitesinin mevsimsel olarak farklılık gösterebileceğini ortaya koymuştur.

Su kalitesinin sürdürülebilir kullanımı ve yönetimi; bu çalışmanın bulguları, Hesko kaynağının su kalitesinin sürdürülebilir yönetimi ve kullanımı için önemli bilgiler sunmaktadır. Su kalitesindeki mevsimsel değişikliklerin sürekli izlenmesi ve bu değişikliklere dayalı su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, suyun hem içme hem de sulama amaçları için güvenilir bir kaynak olarak kalmasını sağlayacaktır. Ayrıca, su kalitesinin korunması ve iyileştirilmesi için kirlilik kaynaklarının kontrol edilmesi ve toplumsal bilinçlendirme faaliyetlerinin artırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, Hesko kaynağının su kalitesinin mevsimsel değişimlerini detaylı bir şekilde ortaya koymakta ve suyun sürdürülebilir yönetimi için önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen bulgular, su kalitesine ilişkin önceki çalışmalarla uyumlu olup, karstik kaynakların kimyasal bileşiminin mevsimsel olarak değişebileceğini göstermektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, Siirt ilinin Şirvan ilçesinde bulunan Hesko kaynak suyunun su kalitesi ve hidrojeokimyasal özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan analizler, Hesko kaynağının su kalitesinin mevsimsel olarak istikrarlı olduğunu ve büyük ölçüde kalsiyum ve bikarbonat iyonları tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. Piper diyagramları, her mevsim boyunca suyun kalsiyum-bikarbonat su tipi olarak sınıflandırılmasını desteklemiştir.

Kalsiyum ve Magnezyum; kaynak suyunda kalsiyum ve magnezyum konsantrasyonları, mevsimsel değişiklikler göstermiştir. Mart ayında kalsiyum konsantrasyonu 41.10 mg/L iken, Kasım ayında 105.3 mg/L'ye yükselmiştir. Magnezyum konsantrasyonları ise Mart ayında 7.176 mg/L iken, Kasım ayında 12.61 mg/L olarak kaydedilmiştir. Bu değişiklikler, çevredeki jeolojik formasyonların mineral çözünmesi ile ilişkilidir ve suyun sertliğini artırarak potansiyel kireçlenme sorunlarına yol açmaktadır.

Sodyum ve Potasyum; sodyum seviyeleri kademeli bir artış göstermiştir. Mart ayında sodyum konsantrasyonu 0.487 mg/L iken, Ocak ayında 1.230 mg/L'ye ulaşmıştır. Potasyum seviyeleri ise genellikle düşük kalmış ve Mart ayında 0.200 mg/L iken, Aralık ayında 0.559 mg/L olarak

ölçülmüştür. Sodyum artışı, sulama için kullanıldığında sodyuma duyarlı bitkiler için endişe yaratabilir.

Bikarbonat seviyeleri genel olarak istikrarlı kalmıştır. Mart ayında 268.40 mg/L olarak kaydedilen bikarbonat, Eylül ayında 345.26 mg/L'ye kadar yükselmiştir. Bu durum, suyun pH'ını hafif alkalın aralıkta tutarak doğal bir tamponlama etkisi sağlamaktadır ve sucul yaşam için faydalıdır.

Sülfat ve klorür konsantrasyonlarında belirli değişiklikler gözlenmiştir. Sülfat konsantrasyonu Mart ayında 9.787 mg/L iken, Ekim ayında 19.95 mg/L'ye yükselmiştir. Klorür seviyeleri ise Mart ayında 0.94 mg/L iken, Ekim ayında 3.02 mg/L'ye ulaşmıştır. Bu değişiklikler, doğal süreçler veya insan kaynaklı kirliliklerin etkilerini gösterebilir.

Nitrat seviyeleri genellikle düşük başlamış ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde izlenmesi gereklidir. Mart ayında nitrat konsantrasyonu 1.278 mg/L iken, Aralık ayında 3.678 mg/L'ye yükselmiştir. Yüksek nitrat seviyeleri, insan sağlığı ve sucul ekosistemler için risk oluşturabilir.

EC ve TDS seviyeleri, suyun mineralizasyonunu yansıtmaktadır. Mart ayında EC 357 μ S/cm iken, Ekim ayında 422 μ S/cm'ye çıkmıştır. TDS seviyeleri ise Mart ayında 170.3 mg/L iken, Şubat ayında 200.8 mg/L olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, suyun içme ve tarım için uygun olduğunu göstermektedir ancak belirli kullanımlar için tuzluluk ve pH yönetimi gerekmektedir.

pH ve Sıcaklık; pH değerleri hafif alkali aralıkta kalmıştır. Mart ayında pH 7.64 iken, Ocak ayında 7.77 olarak ölçülmüştür. Sıcaklık değişimleri ise suyun kimyasal reaksiyonlarını ve sucul organizmaların davranışlarını etkileyebilir. Kayıtlı sıcaklıklar, ılıman bir iklimi işaret etmektedir ve bu durum mevsimsel su kalitesi değişiklikleri için potansiyel anlam taşır. Gelecek çalışmalarda ağır metaller, pestisitler ve mikrobiyal kirleticiler gibi parametrelerin dahil edilmesi, su kalitesinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayacaktır. Bu parametrelerin analizi, suyun içme ve sulama amaçlarına uygunluğunu daha detaylı bir şekilde ortaya koyacaktır.

Hesko kaynak suyunun kapsamlı analizi, suyun yıl boyunca nispeten sabit bir kimyasal bileşime sahip olduğunu ve büyük ölçüde kalsiyum ve bikarbonat iyonları tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Mevsimsel değişiklikler mevcut olmakla birlikte, suyun genel kalitesi korunmuş ve önemli bir hidrojeokimyasal istikrar sergilemiştir. Bu bulgular, Hesko kaynağının hem içme suyu hem de tarımsal sulama için güvenilir ve tutarlı bir kaynak olduğunu ortaya koymaktadır. Kaynak suyu, düşük tuzluluk ve sodyum içeriği ile toprakta tuzluluk birikimi veya sodyum kaynaklı toprak yapısı bozulması riski taşımamaktadır. Bu nedenle, Hesko kaynak suyunun sürdürülebilir yönetimi ve korunması, Siirt ilindeki su kaynaklarının verimli kullanımı için büyük önem taşımaktadır.

Su kalitesindeki mevsimsel değişikliklere bağlı olarak önerilen su yönetimi ve koruma stratejilerinin daha

detaylı ele alınması, suyun sürdürülebilir kullanımı için hayati öneme sahiptir. Bu bağlamda, Hesko kaynağının su kalitesindeki mevsimsel değişiklikler dikkate alınarak aşağıdaki stratejiler önerilmektedir; 1. Mevsimsel izleme ve veri toplama: Su kalitesinin mevsimsel değişimlerini sürekli izlemek ve düzenli olarak veri toplamak, su yönetimi ve koruma stratejilerinin etkinliğini artıracaktır. 2. Kirlilik kaynaklarının kontrolü: Tarım ve sanayi kaynaklı kirliliklerin su kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek için, bu kirleticilerin kontrolü ve yönetimi sağlanmalıdır. Bu kapsamda, ağır metaller, pestisitler ve mikrobiyal kirleticiler gibi parametrelerin düzenli olarak izlenmesi önemlidir. 3. İklim ve hidrolojik değişkenlerin entegrasyonu: Su kalitesi üzerinde etkili olan iklim ve hidrolojik değişkenlerin analiz edilerek, bu değişkenlere dayalı adaptif su yönetimi stratejileri geliştirilmelidir. 4. Sürdürülebilir su kullanımı: Hem içme hem de sulama amaçlı su kullanımında sürdürülebilirlik ilkelerine uygun hareket edilmelidir. Bu amaçla, su tasarrufu ve verimli su kullanımı teşvik edilmelidir. 5. Toplumsal bilinçlendirme ve eğitim: Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımı konusunda toplumun bilinçlendirilmesi ve eğitilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, su yönetimi ve koruma stratejileri hakkında farkındalık artırıcı programlar düzenlenmelidir. 6. Yasal ve kurumsal düzenlemeler: Su kalitesinin korunması ve sürdürülebilir kullanımı için gerekli yasal ve kurumsal düzenlemeler yapılmalıdır. Bu düzenlemeler, su yönetimi ve koruma stratejilerinin uygulanmasını destekleyecek nitelikte olmalıdır.

Bu stratejiler, Hesko kaynağının su kalitesinin korunması ve sürdürülebilir kullanımı için temel adımlar olarak görülmelidir. Suyun mevsimsel değişimlerine uygun olarak geliştirilen bu stratejiler, su kaynaklarının verimli ve uzun vadeli kullanılmasını sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] M. Mujib, T. Adj, N. Suma, F. Ikhsan, and T. R. D. Indartin, "The quality and usability of spring water for irrigation (case study: Ngerong Spring, Rengel Karst, Tuban, East Java)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 485, no. 1: IOP Publishing, p. 012025.
- [2] G. Imfeld and S. Vuilleumier, "Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: a critical review," *European journal of soil biology*, vol. 49, pp. 22-30, 2012.
- [3] K. Song, G. Yang, F. Wang, J. Liu, and D. Liu, "Application of Geophysical and Hydrogeochemical Methods to the Protection of Drinking Groundwater in Karst Regions," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 10, p. 3627, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/10/3627>.
- [4] A. O. Okorogbona *et al.*, "Water quality impacts on agricultural productivity and environment," *Sustainable Agriculture Reviews* 27, pp. 1-35, 2018.

- [5] M.-A. Hoaghia *et al.*, "Water quality and hydrogeochemical characteristics of some karst water sources in Apuseni Mountains, Romania," *Water*, vol. 13, no. 6, p. 857, 2021.
- [6] L. Fashina, I. Luffman, T. A. Joyner, and A. Nandi, "Geospatial assessment of karst spring water quality in Northeast Tennessee, USA," *Geosciences*, vol. 12, no. 8, p. 303, 2022.
- [7] M. Ghaffari, A. A. Chavoshbashi, A. Eslami, H. Hatami, M. Pourakbar, and M. Hashemi, "Spatial and temporal variation of groundwater quality around a volcanic mountain in northwest of Iran," *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 14, p. 100627, 2021.
- [8] Y. Wu, X. Tian, M. Zhang, R. Wang, and S. Wang, "A case study of initial vegetation restoration affecting the occurrence characteristics of phosphorus in Karst geomorphology in Southwest China," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12277, 2022.
- [9] F. K. Zaidi, S. Mogren, M. Mukhopadhyay, and E. Ibrahim, "Evaluation of groundwater chemistry and its impact on drinking and irrigation water quality in the eastern part of the Central Arabian graben and trough system, Saudi Arabia," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 120, pp. 208-219, 2016.
- [10] C. Butscher and P. Huggenberger, "Intrinsic vulnerability assessment in karst areas: a numerical modeling approach," *Water Resources Research*, vol. 44, no. 3, 2008.
- [11] C. Butscher and P. Huggenberger, "Enhanced vulnerability assessment in karst areas by combining mapping with modeling approaches," *Science of the total environment*, vol. 407, no. 3, pp. 1153-1163, 2009.
- [12] Z. Stupar, E. A. Levei, E. Neag, A. Baricz, E. Szekeres, and O. T. Moldovan, "Microbial water quality and health risk assessment in karst springs from Apuseni Mountains, Romania," (in English), *Frontiers in Environmental Science*, Original Research vol. 10, 2022-September-16 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.931893.
- [13] K. Katsanou, T. Maramathas, Ç. Sağır, B. Kurtulus, A. Baba, and N. Lambrakis, "Determination of karst spring characteristics in complex geological setting using MODKARST model: Azmak Spring, SW Turkey," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 16, 12/17 2022, doi: 10.1007/s12517-022-11049-7.
- [14] F. Kaçaroğlu, "Gökpinar karst kaynaklarının (Gürün-Sivas) hidrojeoloji incelemesi," *Yerbilimleri*, vol. 27, no. 3, pp. 181-194, 2006.
- [15] H. Doğanay, "Türkiye'de Az Tanınan Üç Doğa Harikası: Tomara-Sırakayalar ve Muradiye Çağlayanları," *Doğu Coğrafya Dergisi*, vol. 6, no. 3, 2000.
- [16] R. Yetiş, "Şanlıurfa Balıklıgöl havzası karstik su kaynaklarının kalite parametrelerinin incelenmesi," Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [17] G. Yüce, "Yenişehir ve Cüdeyde (Reyhanlı-Hatay) Karst Kaynaklarının Boşalım Hidrodinamiği ve Hidrojeokimyasal Özellikleri," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 20, no. 2, pp. 159-188, 2007.
- [18] M. Utmanoğulları, "Şirvan-Özpınar (Siirt) Dolayının, Jeolojisi, Yeraltı Jeolojisi ve Hidrokarbon Olanakları," M.Sc., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, 2012.
- [19] E. W. Rice, L. Bridgewater, and A. P. H. Association, *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American public health association Washington, DC, 2012.
- [20] R. Baird *et al.*, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Twenty-third edition ed. Washington, D.C.: American Public Health Association (in English), 2017.
- [21] A. M. Piper, "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 25, no. 6, pp. 914-928, 1944.
- [22] J. D. Hem, *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. Department of the Interior, US Geological Survey, 1985.
- [23] L. A. Richards, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (no. 60). US Government Printing Office, 1954.
- [24] L. Wilcox, *Classification and use of irrigation waters* (no. 969). US Department of Agriculture, 1955.



Evaluation of Pore Water Pressure Generation in Sands Containing Kaolin

Irem BOZYIGIT*

Ege University, Civil Engineering Department, irem.kalipcilar@ege.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-7189-8098

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 June 2024

Received in revised form 17 September 2024

Accepted 24 September 2024

Available online 30 September 2024

Keywords:

Kaolin clay, pore pressure ratio, cyclic triaxial test, poorly graded sand

Doi: 10.24012/dumf.1507526

* Corresponding author

ABSTRACT

Accurately predicting pore-water pressure is essential for comprehending soil behavior under seismic loads and for estimating effective stresses. In recent years, various models have been proposed to estimate pore pressure development for clean sands, silts, and clays. However, in nature, soils often consist of mixed formations. Considering the nature of soil formations, in this study the pore pressure development of clayey sand was investigated. The excess pore water pressure development of clayey sand under dynamic loads using three different models from the literature is analyzed. For this purpose, stress-controlled dynamic triaxial test were performed on specimens prepared poorly graded sands with three different kaolin clay contents (FC=5-15) to measure excess pore water pressure generation at four cyclic stress ratios. Specimens were prepared by using wet tamping method to be ensure homogeneity. The tests were conducted under an effective confining pressure of 100 kPa. The results were used to obtain excess pore water pressure development of clayey sands under undrained dynamic conditions. Then, the results were compared with three different pore water pressure generation models. The model coefficients of three models were updated for clayey sand. Although it was proposed for clean sands, the model presented by Seed et al. [23] has also proven to be quite suitable for clayey sands.

Introduction

Liquefaction is a significant hazard associated with earthquakes. Liquefaction happens when relatively loose saturated soils lose its strength due to increased pore water pressure during seismic loading. During seismic effect, as the drainage rate decreases, the excess pore pressure does not have sufficient time to dissipate, resulting in an increase in excess pore pressure [1, 2]. Thus, in order to comprehensively examine liquefaction behavior, it is necessary to understand the development of excess pore water pressure under cyclic loading. Generally, pore water pressure distribution phenomenon has been searched within various frameworks including plasticity-based, stress-based, deformation-based and energy-based approaches. Moreover, since the excess pore water pressure accumulation is the main mechanism leading to liquefaction, various models have been suggested to predict excess pore water pressure distribution [3-5]. One of the first method for calculation the pore water pressure distribution which marks a significant initial step towards quantitatively formulating liquefaction is suggested by Martin et al. [6]. However, through Martin et al.'s [6] investigation, it was assumed that the volume-change characteristics of dry sand under cyclic loading were related

with the pore water pressure increment of saturated sand subjected to undrained cyclic experiments. Then, Ishibashi et al. [7] proposed another model based on the undrained cyclic tests performed on Ottawa sand to address this uncertainty of Martin et al.'s [6] approach and it is still one of the most commonly used model for pore water pressure prediction. In the establishment phase of the model, Ishibashi et al. [7] considered various parameters which were the stress history, the number of cycles and the applied shear stress. Later, Ishibashi et al. [7] and Sherif et al. [8] updated the model by considering additional parameters such density, mean grain size, the coefficient of uniformity and curvature.

Nemat-Nasser and Shokooh [9], focuses on energy dissipation rather than the number of cycles to liquefaction. Subsequently, some researchers have worked on models that obtain pore water pressure generation based on energy [10-13]. Besides, many other earliest models were proposed by Seed et al. [14] and Booker et al. [15] using a stress-based approach. Later, Dobry et al. [16] established strain-based pore water pressure build-up model by considering threshold shear strain. Additionally, Çetin et al. [17] described probabilistic models for evaluating the cyclic large strain and the resulting pore water pressure responses of saturated pure sands. Green et al. [18] and Jafarian et al.

[19], on the other hand, have used an energy-based method approach to determine excess pore water pressure development for cohesionless soils. Besides, Baziar et al. [20] examines the effectiveness of a simple model to estimate pore water pressure development in non-plastic silty sand. Although many models have been proposed for the development of pore water pressure under dynamic loads through a time, these models have generally focused on clean sands and sands with non-plastic silts. It should be noted that in clayey sand, differences in pore water pressure development are observed depending on the plasticity and clay content. Karakan et al. [21-22] updated model parameters suggested by Booker et al. [15], Seed et al. [23] and Polito et al. [24] for non-plastic silts. Moreover, Chiaradonna et al. [25] updated a simplified model for predicting pore pressure development and proposed new coefficient values for Adapazari silt, Scortichino sandy silt, Monterey sand and Messina sandy gravel considering fine content, relative density and cyclic stress ratio. Porcino and Diano [26] found that for a sand-silt mixture with fines content (FC) below 20%, the β value ranged between 0.6 and 1.0 in the model proposed by Booker et al. [15]. However, considering the fines content between 20 and 35%, the β value showed significant variation, ranging from 0.69 to 1.41. El Hosri et al. [27] conducted cyclic triaxial tests on clean sand and silty clay soils and found that the pore water pressure (PWP) generation behavior in non-plastic sandy soils was different from that in plastic silty clay soils.

Generally, in literature fines have been classified into three categories: non-plastic fines, low-plasticity fines, and high-plasticity fines. The studies mentioned above mostly focus on soils containing non-plastic and low-plasticity fines. In this study, for fines inclusion, kaolin clay with a high plasticity (with a liquid limit of 56) has been chosen to investigate the effect of fines on pore water pressure development. The proposed pore water pressure models have been suggested for sand and silty sands, and the aim of this study is to modify the model and model coefficients for clayey sands with high plasticity. The primary objective of this study is to examine the current cyclic pore water pressure models on clayey sand. For this purpose, kaolin type of clay is selected at three clay inclusion levels (5, 10 and 15%). The pore water pressure buildup of these clayey sands is investigated at different CSR (cyclic stress ratio) levels. The compatibility of the models for clayey sand has been examined and new coefficients were obtained.

Materials and Methods

Materials

The experimental program utilized on fine sand with a mean grain size (D_{50}) of 0.21 mm, characterized by a coefficient of uniformity (C_u) of 1.56 and a coefficient of curvature (C_c) of 0.56. According to the Unified Soil Classification System (USCS), this sand was classified as poorly graded sand (SP). The maximum and minimum void ratios of sand were obtained as 0.98 and 0.63 in accordance with ASTM 4254, ASTM 4253, respectively. In addition, specific gravity of

sand was determined as 2.52. Additionally, kaolin type of clay with a plasticity index of 25 was selected to investigate influence of clay content on pore water distribution. The maximum void ratio of kaolin was obtained as 1.43, while the minimum void ratio was achieved as 0.87. The clayey specimens were prepared at 5%, 10%, and 15% clay content. Furthermore, the maximum (e_{max}) and minimum (e_{min}) void ratios for each sand-clay mixture were found according to ASTM D4254 and ASTM D4253 standards and were provided in Table 1.

Table 1. The maximum and minimum void ratio values of clay-sand mixtures

Clay content (%)	Kaolin	
	e_{max}	e_{min}
5	0.87	0.58
10	0.85	0.55
15	0.79	0.49

Specimen Preparation and Experimental Procedure

The experiments were conducted using a cyclic triaxial device manufactured by Seiken company in accordance with JGS 0541-2000 standards, with sinusoidal loading frequencies between 0.001 and 10 Hz (Fig. 1).



Figure 1. Cyclic triaxial device used in study

The specimens were prepared using the wet tamping method, achieving a moisture content of 5% at a relative density of 50%. Specimen preparation procedure begins with blending sand and clay in dry states in the correct proportions. Then, necessary amount of water is added to this mixture to reach 5% water content, and the mixture is stirred again to obtain homogeneous mixture. Then, the prepared mixture is stored in a humidity room for at least 12 hours to allow the fines to fully saturate. The experimental setup involves placing a membrane and a split mold, followed by applying a -20 kPa vacuum to the mold. The weight of the material required for each layer is measured. The sand or sand-clay mixture is then poured into the mold and compacted at five layers using a wooden tamper. Afterwards, the cell was filled with water and, before releasing the vacuum, a confining pressure of 20 kPa was applied to ensure the specimen remained self-standing. According to the standards, the saturation phase of the specimen generally consists of CO₂ flushing, de-aired water flushing, and back pressure stages. In this case that specimens prepared by using wet tamping method, the voids of the specimens partially filled with water which causes a disturbance of specimens during CO₂ flushing. Consequently, the saturation process is completed by water flushing for a minimum 12 hours and back pressure increment. The specimen is considered saturated when the B value exceeds 0.96.

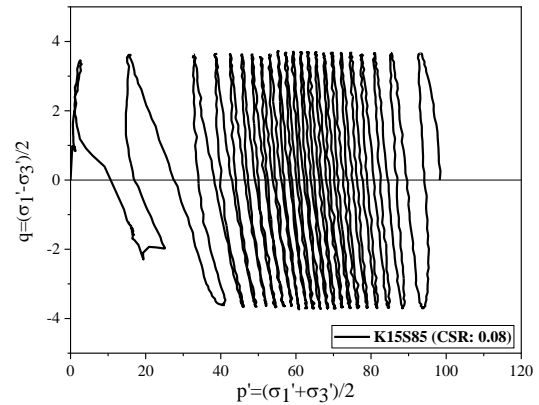
After completing the saturation stage, the specimens consolidated at 100 kPa effective pressure for 2 hours. During this stage, volume change and axial strain were measured and recorded to calculate actual volume and cross section of specimen (Fig. 2).



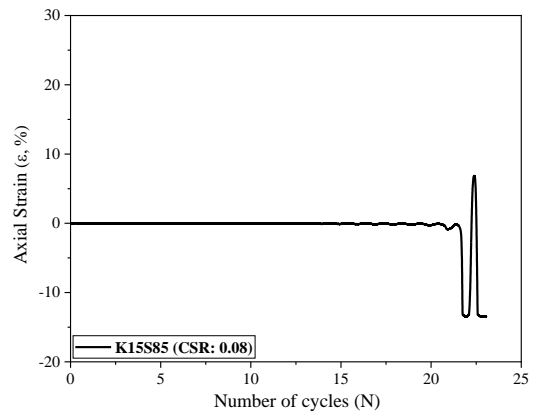
Figure 2. Consolidated specimen inside the cell before the loading stage.

Once consolidation process is completed, specimen is subjected sinusoidal type of cyclic loading with a frequency of 0.1 Hz. According to the JGS 0541-2000 standards, liquefaction happened if either of the following conditions are occurred within 200 cycles; the double amplitude strain

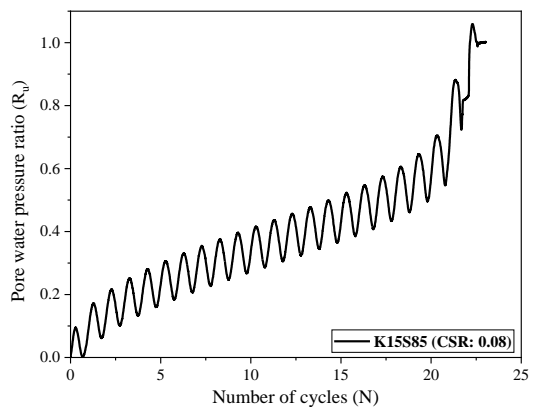
is reached 5% or the excess pore water pressure ratio exceeds 0.95. Typical test results obtained from a dynamic triaxial test on clayey sand are shown in the Fig. 3.



(a)



(b)



(c)

Figure 3. Relationship between (a) q and p' (b) axial strain and number of cycles (c) pore water pressure ratio and number of cycles (d)

Pore water pressure generation models

As it is mentioned before, for prediction of excess pore water pressure, various excess pore models have been established for sands. Seed et al. [23] formulated a model

from the undrained stress-controlled experiments on clean sand and proposed a relationship between excess pore pressure ratio-the cyclic ratio which is given in Equation 1.

$$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 * \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Here, α is an empirical constant depending on test conditions and soil properties, also N is number of uniform cyclic loading cycles. According to the test data, Seed et al. [23] recommended a value of 0.70 for parameter “ α ”. Then, this value (α) is revised by Polito et al. [24] regarding to various factors, such as relative density, fine content and CSR.

$$\alpha = 0.01166 * FC + 0.007397 * D_r + 0.01034 * CSR + 0.5058 \quad (2)$$

In this equation, FC , D_r and CSR indicate fine content, relative density and cyclic stress ratio. The equation (2) is applicable mostly coarse-grained soils that have a fine content lower than 35%. It should be noted that for clean sands, the main influencing factor is relative density (D_r) and cyclic stress ratio (CSR) is almost negligible. Futhermore, Booker et al. [15] revised to simplify the model established by Seed et al. [23] and presented in Equation (3).

$$r_u = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} \right] \quad (3)$$

As mentioned before, α is an empirical constant and N_{liq} specify number of cycles to liquefaction. After several stress-controlled undrained cyclic triaxial experiments on silty sands, Baziar et al. [20] modified Equation (3) to adjust the formula for silty soils by using statistical software.

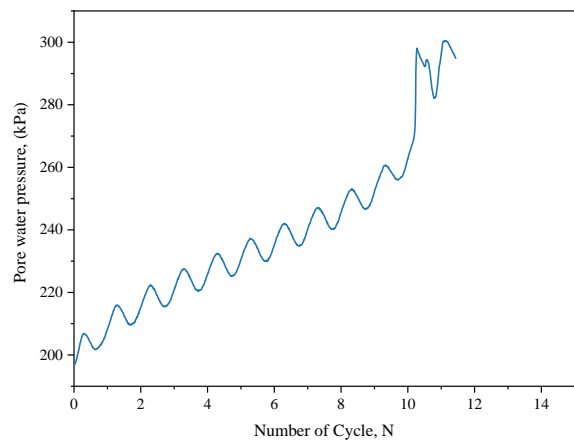
$$r_u = \frac{u_g}{\sigma} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} + \beta \sqrt{\left(1 - \left(2 \frac{N}{N_l} - 1 \right)^2 \right)} \quad (4)$$

Although the Seed et al. [23] model closely aligns the measured build-up of pore pressure, model has several limitations. The primary drawback is that it requires N and N_L to be defined a priori, making it unsuitable for coupled numerical analysis. Additionally, the model cannot be applied to non-liquefiable soils, for which N_L cannot be defined. On the other hand, the approach suggested by Seed et al. [23] is relatively simple and widely used model for generating pore water pressure build-up.

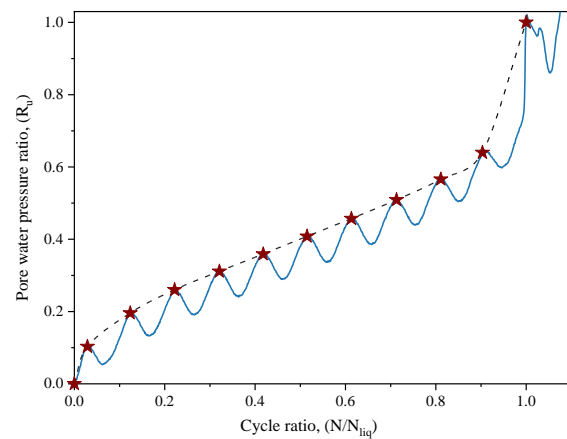
Methodology

In this study, excess pore water pressure models proposed by Seed et al. [23], Broker et al. [15] and Polito et al. [24] were used. The “ α ” value for each model has been calculated for clayey sand with using non-linear least squares fitting.

Firstly, the relationship between the number of cycles and excess pore water pressure was obtained from the dynamic triaxial test results, as shown in Fig. 4a. Since the experiments were conducted under an effective stress of 100 kPa, when the pore water pressure increased by 100 kPa, the effective stress value decreased to zero, resulting in liquefaction. Subsequently, the pore water pressure and the number of cycles in Figure 4a were normalized to apply the models (Fig. 4b). Then, the peak points in each cycle were identified, and the pore water pressure ratio and cycle ratio curve were obtained (Fig. 4b). After obtaining peak values of pore water pressure each cycle, “ α ” values of for each model were calculated by using non-linear least squares fitting for each experiment. Then, using the models and calculated “ α ” value, pore water ratio versus cycle ratio curve was drawn and compared with actual experiment curve (Fig. 5).



(a)



(b)

Figure 4. a) Pore water pressure and number of cycles b) Pore water pressure ratio and cycle ratio curves

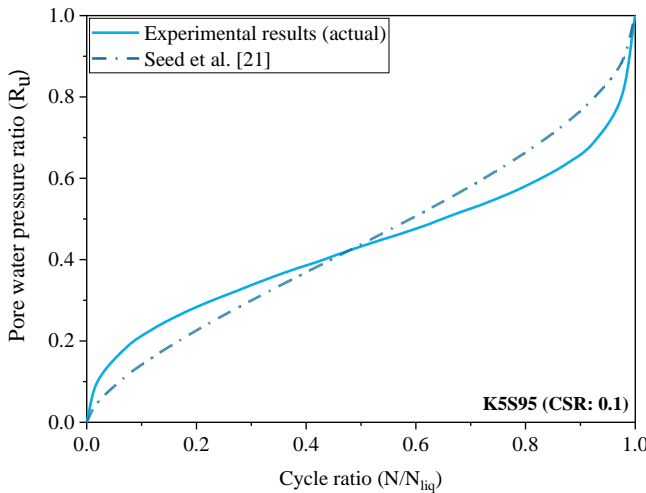


Figure 5. Comparison of the pore water pressure ratio-cycle ratio relationship obtained from experiment with the model obtained by Seed et al. [23]

Results And Discussion

As mentioned before, for clean sands, Seed et al. [23] suggested an “ α ” value of 0.7 for Equation 1. Upon reevaluation, it was observed that in Seed et al.'s [23] approach, the “ α ” value was determined to be very close to the original “ α ” value. However, in Equation 3 established by Booker et al. [15], the “ α ” value calculated very similar to the Seed et al. [23] approach, despite minimal differences. In light of the data obtained in the laboratory, the “ α ” values for all three models are presented in Table 2. It was observed that the minimum value of the “ α ” coefficient is 0.63 and the maximum value is 0.92 for Equation 1. The mean value was calculated as 0.75, which

is very close to the value proposed by Seed et al. [23]. Moreover, MSE values varied between 0.001 and 0.009.

In the Booker et al.'s [15] approach, the minimum and maximum values were obtained as 0.65 and 0.92, respectively, with MSE values ranging from 0.0008 to 0.009. Similar to this study, Porcino and Diano [26] found the α value to be between 0.6 and 1 in silty sands with fines content below 20% in soils containing sand and silt. Polito et al. [24] recommended various “ α ” coefficients based on relative density, fines content, and cyclic stress ratio, for a model originally proposed by Seed et al. [23]. However, the equation can be applied to soils with a fines content of less than 35% (FC <35%). In this study, “ α ” coefficients suggested by Polito et al. [24] were updated by using experimental results. When the updated equation was examined, it was observed that the CSR value and fines content were more effective than relative density. Comparing the coefficients obtained with the “ α ” coefficients proposed by Polito et al. [24], it was determined that, specifically for sands containing kaolin clay, the effect of CSR was greater. It was also determined that relative density did not show a significant difference. However, it can be said that as the plasticity of fines increases, their percentage also has a greater impact on the α parameter.

In Fig. 6a, the relationship between pore water pressure ratio (R_u) and cycle ratio of experimental results were presented. Then, pore water pressure ratio (R_u) and cycle ratio relationship obtained by using non-linear least squares fitting was shown in Fig. 6b. Considering Fig. 6b, it was observed that the pore water pressure formed in a narrower range when comparing with experimental results, which was also emphasized by Karakan et al. [22]. This situation was observed more distinctly in the Polito et al. [24] and Booker et al. [15] models.

Table 2. Limit state functions and updated coefficients of models

Model	Limit State Functions	α_1	α_2	α_3	α_4	
Seed et al. [23]	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 * \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right] \right\}$	Maximum	0.92	-	-	-
		Mean	0.75	-	-	-
		Minimum	0.63	-	-	-
		Original value	0.70			
Booker et al. [15]	$r_u = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} \right]$	Maximum	0.92	-	-	-
		Mean	0.77	-	-	-
		Minimum	0.65	-	-	-
		Original value	Ranged according to soil type			
Polito et al. [24]	$r_u = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 * \left(\frac{N}{N_{liq}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right] \right\}$ $\alpha = \alpha_1 * FC + \alpha_2 * D_r + \alpha_3 * CSR + \alpha_4$		0.0935	0.00826	0.111	0.7617
		Original value	0.01166	0.007397	0.01034	0.5058

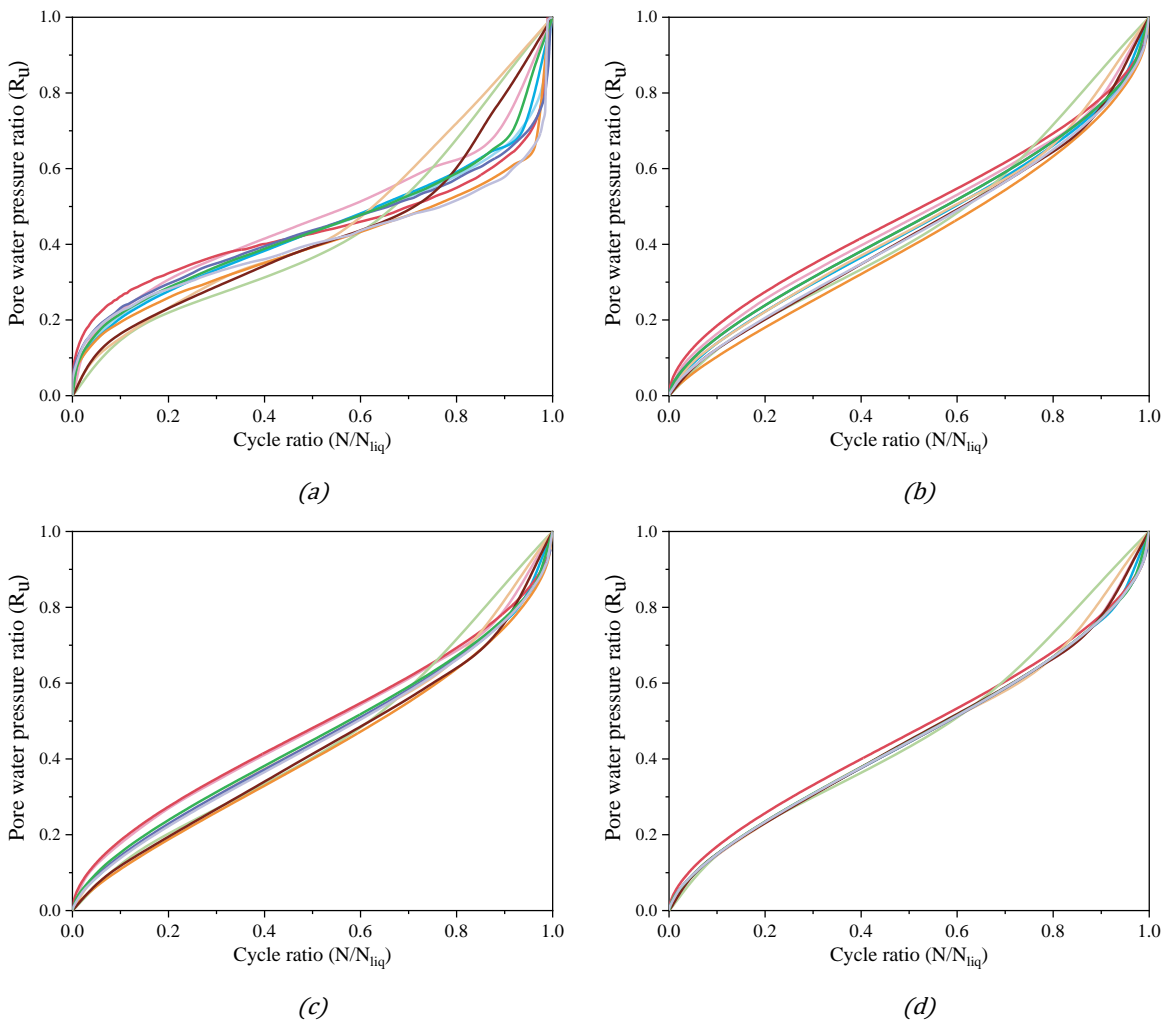


Figure 6. Pore pressure response -cycle ratio relationship obtained (a) from experiments (b) from method suggested by Seed et al. [23] (c) from method suggested by Booker et al. [15] (d) from method suggested by Polito et al. [24]

Conclusion

In this study, pore water pressure build-up under undrained cyclic triaxial experiments on clayey sand was investigated. Moreover, empirical models for pore water pressure generation by considering pore water pressure ratio-cycle ratio response of clayey sand are discussed from the literature. Suggested coefficients were updated according to experimental results. Three different pore water pressure generation models were examined, and the new coefficients were proposed for sand with kaolin clay. Considering the models and coefficients proposed by Seed et al. [23], Booker et al. [15], and Polito et al. [24], it was determined that the existing coefficients were quite close to the obtained coefficients, and the model proposed by Seed showed higher performance compared to the other models in sandy soils containing kaolin. Considering the coefficients in the model proposed by Polito [24], it has been observed that for the modified model (for sand containing kaolin), the fine-grained content is more effective compared to the original model. Moreover; it has been determined that the pore water pressure models proposed for sand and silty sands can also be used for clayey sands with minor modifications.

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

Bozyigit I: Study conception and design, acquisition of data, analysis and interpretation of data, drafting of manuscript

References

- [1] F. Alshawmar, M. Fall, "Dynamic response of thickened tailings in shaking table testing," *Int. j. Geo-Engin*, vol.12, pp. 1-25, 2021.
- [2] J. Wang, L. Guo, Y. Cai, C. Xu, C. Gu, "Strain and pore pressure development on soft marine clay in triaxial tests with a large number of cycles," *Ocean Eng.*, vol.74, pp. 125-132, 2013

- [3] T. T. Nhan, H. Matsuda, H. Sato, D. Q. Thien, P. V. Tien, N. T. T. N, "Effective stress change and cyclic resistance of saturated sands under uniform and irregular cyclic shears," *Indian Geotech J.*, vol.52, no. 3, pp. 507-518, 2022.Examples:
- [4] C. S. Chang, L. C. L. Kuo, E. T. Selig, "Pore pressure development during cyclic loading," *J. Geotech. Eng.*, vol.109, no.1, pp. 103-107, 1983.
- [5] R. J. Mitchell, B. I. Dubin, "Pore pressure generation and dissipation in dense sands under cyclic loading," *Can. Geotech. J.*, vol.23, no.3, pp. 393-398, 1986
- [6] G. R. Martin, W. D. L. Finn, H. B. Seed, "Fundamentals of liquefaction under cyclic loading," *J. Geotech. Eng.*, vol.101, no.5, pp. 423-438, 1975.
- [7] I. Ishibashi, M. A. Sherif, C. Tsuchiya, "Pore-pressure rise mechanism and soil liquefaction," *Soils Found.*, vol.17, no.2, pp. 17-27, 1977.
- [8] M. A. Sherif, I. Ishibashi, C. Tsuchiya, "Pore-pressure prediction during earthquake loadings," *Soils Found.*, vol.18, no.4, pp. 19-30, 1978.
- [9] S. Nemat-Nasser, A. Shokooh, "A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing," *Can. Geotech. J.*, vol.16, no.4, pp. 659-678, 1979.
- [10] K. T. Law, Y. L. Cao, G. N. He, "An energy approach for assessing seismic liquefaction potential," *Can. Geotech. J.*, vol.27, no.3, pp. 320-329, 1990.
- [11] J. L. Figueroa, A. S. Saada, L. Liang, N. M. Dahisaria, "Evaluation of soil liquefaction by energy principles," *J. Geotech. Eng.*, vol.120, no.9, pp. 1554-1569, 1994.
- [12] H. M. Dief, J. L. Figueroa, "Liquefaction assessment by the unit energy concept through centrifuge and torsional shear tests," *Can. Geotech. J.*, vol.44, no.11, pp. 1286-1297, 2007.
- [13] C. P. Polito, H. H. Moldenhauer, "Energy dissipation and pore pressure generation in stress-and strain-controlled cyclic triaxial tests," *Geotech. Test. J.*, vol.42, no.4, pp. 1083-1089, 2019.
- [14] H. B. Seed, I. M. Idriss, F. Makdisi, N. Banerjee, "Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975
- [15] J. R. Booker, M. S. Rahman, H. B. Seed, "GADFLEA—A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading," Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, 1976.
- [16] R. Dobry, W. G. Pierce, R. Dyvik, G. E. Thomas, R. S. Ladd, "Pore pressure model for cyclic straining of sand," Civil Engineering Department, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, 1985.
- [17] K. O. Cetin, H. T. Bilge, "Cyclic large strain and induced pore pressure models for saturated clean sands," *J. Geotech. Geoenviron.*, vol.138, no.3, pp. 309-323, 2012.
- [18] R. A. Green, J. K. Mitchell, C. P. Polito, "An energy-based pore pressure generation model for cohesionless soils," in *Proc., John Booker Memorial Symp. Developments in Theoretical Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, Jan. 2000, pp. 383-390.
- [19] Y. Jafarian, I. Towhata, M. H. Baziar, A. Noorzad, A. Bahmanpour, "Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments," *Soil Dyn Earthq Eng.*, vol.35, pp.13-28, 2012.
- [20] M. H. Baziar, H. Shahnazari, H. Sharafi, "A laboratory study on the pore pressure generation model for Firouzkooh silty sands using hollow torsional test," *Int. J. Civ. Eng.*, vol.9, no.2, 126-134, 2011.
- [21] E. Karakan, N. Tanrınian, A. Sezer, "Evaluation of excess pore water pressure build-up during cyclic triaxial tests on a non-plastic silt", *DÜBİTED*, c. 6, sy. 2, ss. 513–524, 2018.
- [22] E. Karakan, "Validation of pore water pressure model calibration parameters for non-plastic silt," *Fresenius Environ. Bull.*, vol.29, no.12, 10500-10510, 2020.
- [23] H. B. Seed, P. P. Martin, J. Lysmer, "The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction," Rep. No. EERC 75-26. Univ. of California, Berkeley, 1975.
- [24] C. P. Polito, R. A. Green, J. Lee, "Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol.134, no.10, 1490–1500, 2008.
- [25] A. Chiaradonna, G. Tropeano, A. D'onofrio, F. Silvestri, "Development of a simplified model for pore water pressure build-up induced by cyclic loading", *Bull. Earthq. Eng.*, vol.16, 3627–3652, 2018.
- [26] D. D. Porcino, V. Diano, "The influence of non-plastic fines on pore water pressure generation and undrained shear strength of sand-silt mixtures", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol.10101, 311–321.
- [27] M. S. El Hosri, H. Biarez, P. Y. Hicher, Liquefaction characteristics of silty clay. In *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, CA, USA, 21–28 July 1984; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1984; pp. 277–284.



Gradyan Güçlendirme Kullanarak Çelik Fiberli Geopolimerin Basınç Dayanımının Tahmini

Prediction of Compressive Strength of Geopolymers Reinforced with Steel Fiber Using Gradient Boosting

Necip Altay Eren^{1*}

¹ Gaziantep Üniversitesi, İslahiye MYO, İnşaat Bölümü, altayeren@gantep.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1421-4619>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Temmuz 2024
Revizyon 26 Ağustos 2024
Kabul 12 Eylül 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

*Geopolimer, Basınç dayanımı,
Makina öğrenme, Çelik fiber*

ÖZ

Bu makalenin amacı, çelik fiberli Geopolimer Betonların veya Harçların basınç dayanımını daha hızlı, doğru, ucuz ve zahmetsiz bir şekilde belirlemektir. Geleneksel laboratuvar testlerinin maliyetli olduğu ve zaman aldığı göz önüne alındığında, yapay zekâ uygulamalarının betonun basınç değerinin belirlenmesinde önemli alternatif yöntemlerinden birisi olabilir. Günümüzde yapay zekâ teknolojilerinin hızla gelişmesi, hassas ve hızlı sonuçlar elde edilmesine imkân tanımaktadır. Bu çalışmada, Makine Öğrenimi kullanılarak belirli bir veri seti üzerinden çelik fiberli geopolimer betonun basınç dayanımının tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Literatürde bu konuda yapılan önceki çalışmalar incelenerek 105 veriden oluşan bir veri seti hazırlanmış ve analiz için uygun hale getirilmiştir. Veri seti, Gradyan Güçlendirme yöntemi kullanılarak Python programlama diliyle modellenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda R² değeri 0,971 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Gradyan Güçlendirme modelinin çelik fiberli geopolimer betonun basınç dayanımını tahmin etmede oldukça başarılı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, yapay zekâ teknikleri basınç dayanım sonuçlarının daha hızlı tahmin edebilecek ve maliyetleri önemli ölçüde azaltacak imkânlar sunmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, inşaat sektöründe gelecekteki araştırma ve uygulamalar için umut verici bir yöntem sunmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 July 2024
Received in revised form 26 August 2024
Accepted 12 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

*Geopolymer, Compressive strength,
Machine learning, Steel fiber*

Doi: 10.24012/dumf.1511100

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

The aim of this article is to determine the compressive strength of Geopolymer Concrete or Mortar with steel fiber in a faster, accurate, cheaper and effortless way. Considering that traditional laboratory tests are costly and time-consuming, artificial intelligence applications can be one of the important alternative methods in determining the compressive strength of concrete. Today, the rapid development of artificial intelligence technologies allows obtaining precise and fast results. In this study, it is aimed to estimate the compressive strength of geopolymer concrete with steel fiber using a specific database using Machine Learning. By examining previous studies on this subject in the literature, a data set consisting of 105 data was prepared and made suitable for analysis. The data set was modeled and analyzed with the Python programming language using the Gradient Boosting method. As a result of the study, the R² value was obtained as 0.971. These results show that the Gradient Boosting model is quite successful in predicting the compressive strength of geopolymer concrete with steel fiber. As a result, artificial intelligence techniques offer opportunities to predict compressive strength results faster and significantly reduce costs. The findings of this study provide a promising method for future research and applications in the construction industry.

Giriş

Günümüzde çevre kirliliği sorunları, özellikle sera gazı salınımı gibi konular, ciddi endişelere neden olmaktadır. Çimento üretimi sürecindeki kireçtaşının dekarbürizasyonu, atmosfere önemli miktarda sera gazı emisyonuna sebep olmaktadır. Bu durum, çimento üretimi ile ilgili CO₂ salınımının yüksek olduğunu ve çevresel etkilerinin önemli olduğunu göstermektedir (%54 kalsinasyon ve %46 yakıt yakımı yoluyla) [1]. Dünya genelinde en fazla kullanılan malzemelerden biri betondur ve inşaat sektöründe kullanımı giderek artmaktadır [2]. Ancak beton üretimi de çimento kullanımıyla doğrudan ilişkilidir ve dolayısıyla CO₂ salınımının artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, inşaat sektöründe çevresel etkileri azaltmak için alternatif malzemelere yönelik arayışlar devam etmektedir. Geopolimer Beton (GB), bu bağlamda önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. GB, geleneksel çimentoya kıyasla daha az CO₂ salınımına neden olur. Alkali çözelti ile zenginleştirilmiş alümina silikat içeren metakaolin, cüruf, uçucu kül gibi malzemeler kullanılarak üretilen bir beton türüdür. Bu özellikleriyle hem çevre dostu hem de sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak dikkat çeker [3]-[5]. GB'nun kullanımı, inşaat ve beton endüstrisinde CO₂ salınımını %80 oranında azaltabileceği göz önünde bulundurulmaktadır [4]. Fiberli geopolimerler, dayanıklılık ve çevresel sürdürülebilirlik avantajları nedeniyle inşaat sektöründe artarak ilgi görmektedir. Bu malzemeler, doğal liflerin (cam, karbon, polipropilen gibi) geopolimer matrisine eklenmesiyle oluşturulur. Fiberler, malzemenin mekanik özelliklerini geliştirerek çatlak oluşumunu azaltır ve genellikle basınç dayanıklılığı artırır. Bu bağlamda, fiberli GB'ların basınç dayanımının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, mühendislik uygulamalarında önem arz etmektedir. Betonun temel mekanik özelliklerinden biri olan basınç dayanımı, yapıların güvenliği için kritik öneme sahiptir ve bu özellik laboratuvar testleri ile belirlenir. Ancak, laboratuvar testleri zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu nedenle, yapay zekâ teknikleri, betonun mekanik özelliklerini belirlemede alternatif bir yaklaşım sunabilir. Makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak geliştirilen tahmin modelleri, basınç dayanımını hızlı ve doğru bir şekilde tahmin etmede etkili olabilir [6]. Bu makalede, fiberli GB'un basınç dayanımını tahmin etmek için Gradyan Güçlendirme (GG) modeli kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım, GB'nun mühendislik uygulamalarında daha geniş bir kabul görmesine ve çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu katkılar sağlanmasına yardımcı olabilir.

İnşaat mühendisliği alanında yapay zekâ teknikleri, özellikle beton gibi malzemelerin davranışını ve performansını tahmin etmede önemli bir rol oynamaktadır. Bu alanda birçok makine öğrenimi tekniği, istenilen çıktıları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Örneğin, Karar Ağacı (KA), Yapay Sinir Ağı (YSA), Gen Ekspresyonu Programlama (GEP), Destek Vektör Makinesi (DVM) ve Rastgele Orman (RO) gibi yöntemler literatürde sıkça karşılaşılan teknikler arasındadır [7]-[10]. Ahmed ve ark. [11], geri dönüştürülmüş kaba agregalı betonun basınç dayanımını tahmin etmek için GEP algoritmasını kullanarak başarılı sonuçlar elde etmiştir. Song ve ark. [12] ise seramik atık bazlı beton için YSA modelinin yüksek performans gösterdiğini ve diğer Karar Ağacı

modellerine kıyasla daha iyi tahminler yaptığını belirtmiştir. Khan ve ark. [13] uçucu kül bazlı GB'un basınç dayanımını GEP modeli ile başarılı bir şekilde tahmin etmişlerdir. Aslam ve ark. [14] yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımını tahmin etmek için GEP modelinin doğruluğunu göstermiş ve makine öğrenimi yöntemlerinin yüksek performans sergilediğini vurgulamışlardır. Chu ve ark. [15] ise GB'un mukavemet özelliklerini tahmin etmek için GEP ve Çoklu İfade Programlamayı (ÇİP) kullanmışlar ve GEP modelinin daha doğru tahminler sağladığını bulmuşlardır. Ancak, literatürde fiberli GB'un basınç dayanımını tahmin etmek için çok az çalışma bulunmaktadır. Kumar ve ark. [16] yaptıkları çalışmada, YSA ve Destek Vektör Regresyonu (DVR) modelleri kullanarak fiber takviyeli GB'un basınç dayanımını tahmin etmişlerdir. Bu çalışma DVR modelinin, YSA modeline göre daha doğru tahminler yaptığını göstermiştir. Öte yandan, literatürde Gradyan Güçlendirme (GG) algoritması kullanılarak çelik fiberli (ÇF) GB'un basınç dayanımını tahmin etmek için yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. GG algoritması özellikle büyük ve karmaşık veri kümelerinde tahmin hızı ve doğruluğuyla öne çıkan ve başarılı sonuçlar veren bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, ÇF'li GB'un basınç dayanımını tahmin etmek için GG algoritması'nın potansiyelini araştıran yeni çalışmaların yapılması önem arz etmektedir. Bu tür çalışmalar, GB'un inşaat sektöründeki kullanımını daha sürdürülebilir hale getirme potansiyeline sahiptir.

GB'un basınç dayanımının doğru bir şekilde tahmin edilmesi zorlu bir süreçtir, ancak yapay zekâ ve makine öğrenimi bu alanda umut verici çözümler sunmaktadır. GG, Friedman [17] tarafından önerilen bir algoritmadır. GG algoritması, zayıf öğrenenlerin yinelenmeli bir dizi yoluyla daha iyi öğrenenlerle birleştirilmesiyle oluşturulmuştur [18]. Sonuç olarak, GG performansı güçlendirilebilir, bu da toplam hatanın azalmasına ve model kaybının azalmasına yol açabilir [19]. Önceki çalışmalar, GG algoritması aşırı uyum sorunlarını önlemede temel bir avantaja sahip olduğunu ve bu algoritmanın daha az hesaplama kaynağı kullandığını belirtmiştir [19]-[20]. Betonun basınç dayanımını tahmin etmek için birçok çalışmada GG algoritması kullanılmıştır [21]-[22]. Genomik üreme değerlerinin tahmin edilmesinde GG algoritması, DVR ve rastgele orman modelleri arasındaki tahmin performansını karşılaştırmak için daha önce bir çalışma yapılmış ve GG algoritmasının diğer algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır [23]. Bu özellikleri sayesinde, GG gibi karmaşık yapı malzemelerinin mekanik özelliklerini tahmin etme konusunda potansiyel göstermektedir. Sonuç olarak, yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin, GG'nın basınç dayanımının doğru tahmin edilmesinde önemli bir rol oynayabileceği ve inşaat sektöründe sürdürülebilir malzeme kullanımını teşvik edebileceği görülmektedir. Bu teknolojilerin kullanımı, laboratuvar testlerine olan bağımlılığı azaltabilir ve maliyetleri düşürebilirken, aynı zamanda doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olabilir.

Makine öğrenimi, yapay zekânın önemli bir alt dalıdır ve insan etkileşimi olmadan veri kalıplarını analiz eder ve yorumlar. ÇF'li GB'un basınç dayanımını daha hızlı bir şekilde tahmin etmek için yapay zekâ yöntemleri oldukça etkili olabilir. Bu yöntemler, GB'nin bileşimi (molaritesi), kullanılan ÇF miktarı, geometrik ve mekanik özellikler ile numunenin geometrisi gibi faktörleri analiz ederek basınç dayanımını tahmin etmeyi mümkün kılar. Bu çalışmada, GG kullanılarak ÇF'li GB'un basınç dayanımını tahmin etmenin

uygulanabilirliği araştırılmaktadır. GG, sınıflandırma, regresyon ve sıralama gibi çeşitli görevler için kullanılabilen bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Son yıllarda yapay zekâ çalışmalarında gösterdiği yüksek performansı ve hızlı yakınsama yeteneğiyle dikkat çekmektedir. Araştırmada GG modeli, Python programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Python, açık kaynaklı olması, kolay okunabilir olması ve yüksek performansı ile tercih edilen bir programlama dilidir [24]. Bu özellikleri sayesinde, makine öğrenimi modellerinin oluşturulması, veri analizi ve sonuçların değerlendirilmesi Python ile etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Sonuç olarak, yapay zekâ ve özellikle GG kullanılması, ÇF'li GB'un basınç dayanımının tahmin edilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışma, inşaat sektöründe daha sürdürülebilir ve verimli malzemelerin kullanımını teşvik etmeyi hedeflemektedir.

Literatürde fiberli GB'un basınç dayanımının tahmin edilmesine yönelik yapılan çalışmaların azlığına rağmen, Kumar ve ark. [16] tarafından yapılan çalışma önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, fiber takviyeli GB'un (ÇF ve PVA ile takviyeli) basınç dayanımının tahmin edilmesi için Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Destek Vektör Regresyonu (DVR) modelleri ile Olağanüstü Gradyan Güçlendirme (OGG) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada, farklı özelliklerin (kimyasal bileşim, aktivatör türü vb.) OGG modeli için kullanılarak başarılı bir şekilde eğitildiği ve elde edilen tahminlerin deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. YSA ve DVR gibi geleneksel makine öğrenimi modellerinin yanı sıra OGG algoritmasının da kullanılması, basınç dayanımı tahmininde doğruluğun artırılması açısından önemli bir adımdır. Bu çalışma, fiber takviyeli GB'un mekanik özelliklerinin tahmin edilmesinde yapay zekâ tekniklerinin potansiyelini göstermesi açısından değerlidir. Ancak, literatürde direkt GG'nin kullanımıyla çelik fiberli GB'un basınç dayanımının tahmin edilmesiyle ilgili yapılan bir çalışma bulunmamıştır. Literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen başarılı sonuçlar, GB gibi yenilikçi ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir katkı sağlayabilir.

Bu çalışmada, ÇF takviyeli GB'un basınç dayanımını GG kullanarak tahmin etmek amaçlanmaktadır. Literatürde bu konuda yapılan çalışmaların azlığına rağmen, özellikle ÇF takviyeli GB üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak 105 veriden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti üzerinde GG eğitilmiş ve bu model kullanılarak ÇF takviyeli GB'nun basınç dayanımı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen tahmin sonuçları, veri setindeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, ÇF'li GB'nun basınç dayanımını tahmin etmede makine öğrenimi algoritmalarının kullanımının potansiyelini göstermektir. Yapılan analizler ve karşılaştırmalar, makine öğrenimi algoritmalarının GB'nun basınç dayanımını doğru bir şekilde tahmin edebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, gelecekte standartların belirlenmesi ve GB kullanımının yaygınlaşması açısından önemli bir katkı sağlayabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, sürdürülebilir inşaat malzemeleri geliştirilmesinde yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin potansiyelini göstermek ve inşaat sektöründe doğru, ekonomik ve çevre dostu çözümler sunma yolunda bir adım olarak değerlendirilebilir.

Materyal ve Yöntem

Bu bölümde çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler açıklanmıştır. İlk olarak, bu çalışmada kullanılan makine öğrenimi algoritması anlatılmıştır. Daha sonra verilerin nasıl elde edildiği ve modellemeye hazır hale getirmek için kullanılan yöntemle ilgili bilgi verilmiştir. Son olarak, modelin nasıl oluşturulduğu ve elde edilen sonuçlar aktarılmıştır. Çalışmanın stratejisini gösteren grafik Şekil 1.'de aşağıda sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışma yönteminin akış şeması

Değerlendirme yöntemi

Makine öğrenmesi algoritmasının doğruluğunun değerlendirilmesinde ortalama hata (ortalama test/tahmin), kök ortalama kare hatası (RMSE), korelasyon katsayısı (R) ve belirleme katsayısı (R²) dikkate alındı.

Ortalama Hata (Ortalama Test/Tahmin)

Ortalama Hata modelleme ve tahmin süreçlerinde modelin tahminlerinin ne kadar doğru olduğunu ölçmek için kullanılan bir değerlendirme metriğidir. Bir modelin tahmin ettiği değerlerle (tahmin) gerçek değerler (test) arasındaki oranı ifade eder. Bu oran tahminlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu belirtir. 1'e ne kadar yakınsa, modelin performansının o kadar iyi olduğu anlamına gelir [25].

Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE)

Regresyonda genellikle kullanılan kayıp fonksiyonu, aşağıdaki Deklem (1)'de tanımlanan RMSE'dir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y' - y)^2} \quad (1)$$

burada y' tahmin edilen değer, y gerçek değer ve n veri örneklerinin sayısıdır. Hata ne kadar büyükse RMSE de o kadar büyüktür; böylece tahminlerin doğruluğu tahmin edilebilir. RMSE, model tarafından tahmin edilen değerler gerçek değerlerden farklı olduğunda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, RMSE değeri daha küçük olduğunda modelin performansı iyileştirilir [26].

Korelasyon Katsayısı (R)

Korelasyon katsayısı, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve kuvvetini ölçen bir istatistiksel değerdir. Korelasyon katsayısı, -1 ile 1 arasında bir değer alır. R değeri 1 ise; mükemmel pozitif korelasyon ve iki değişken arasında tam bir doğrusal pozitif ilişki vardır. Eğer R değeri -1 ise; mükemmel negatif korelasyon ve iki değişken arasında tam bir doğrusal negatif ilişki vardır. Eğer R değeri 0 ise; iki değişken arasında doğrusal bir ilişki yoktur [27].

Belirleme Katsayısı (R²)

Belirleme katsayısı, genellikle R² olarak ifade edilir ve bir regresyon modelinin bağımlı değişkenin Deklem (2)'de ki gibi toplam varyansını ne kadar açıkladığını gösteren bir istatistiksel ölçüdür. Başka bir deyişle, R², modelin veri noktalarının ne kadarını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini gösterir. R² 1'e eşit ise; model, bağımlı değişkendirdeki varyansın tamamını açıklar. Bu, modelin mükemmel bir uyum sağladığını gösterir. Eğer R² 0'a eşit ise; model, bağımlı değişkendirdeki varyansı hiç açıklamaz. Yani, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasında hiçbir ilişki yoktur. Eğer R² değeri 0 ile 1 arasında ise; 1'e yaklaştıkça modelin açıklayıcılığı artar, 0'a yaklaştıkça azalır ve R² değeri genellikle 0 ile 1 arasında yer alır [28].

$$R^2 = 1 - \frac{KKT}{TKT} \quad (2)$$

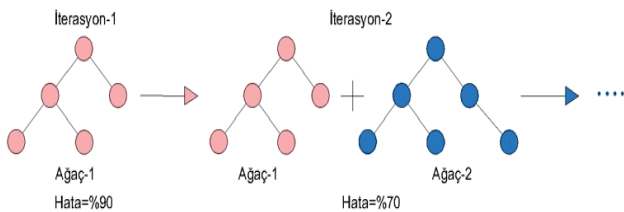
Burada;

TSS : Toplam kareler toplamı

RSS : Kalan kareler toplamı

Gradyan Güçlendirme (GG)

GG algoritması, boosting tekniğine dayanır ve zayıf öğrencileri yinelemeli bir şekilde birleştirerek daha güçlü bir öğrenci oluşturur [18]. Her bir iterasyonda yeni tahminçiler eklenmesi, modelin performansını artırabilir. Ayrıca, GG algoritması toplam hata ve model kaybını azaltmaya odaklanır [19], bu da aşırı uyum sorununu önemli ölçüde azaltır. GG tekniğinde, zayıf öğrenci olarak regresyon ağaçları kullanılır ve her iterasyonda model, hata azaltmak için yinelemeli gradyan tabanlı öğrenme algoritması kullanılarak eğitilir. İlk iterasyonda, genel eğitim hatasını azaltmak amacıyla ilk zayıf öğrenci (ilk ağaç) öğrenilir. Daha sonra Şekil 2.'de ki gibi her bir sonraki iterasyonda, önceki ağaçların yetersiz kaldığı alanlarda hataları düzeltmek için bir sonraki zayıf öğrenci eğitilir. Bu süreç, istenilen hata seviyesine ulaşıncaya kadar devam eder. Sonuç olarak, GG algoritması, zayıf öğrencilerin kademeli olarak birleştirilmesi ve her adımda modelin performansının artırılmasıyla güçlü bir tahminci oluşturur. Bu yöntem, özellikle karmaşık ilişkileri ve örüntüleri yakalamak için etkili bir makine öğrenimi tekniğidir.



Şekil 2. Gboost ağaçları

Ayrıca, GG modelinde başlangıçta model $F_0(x)$ tahmin yapar. Ardından, Deklem (3)'de ki gibi her yeni adımda şu şekilde bir iyileştirme yapılır:

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \alpha \cdot h_m(x) \quad (3)$$

Burada;

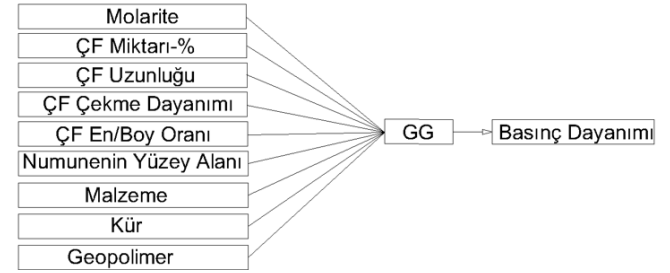
$F_{m-1}(x)$: önceki modelin tahmini

α : öğrenme oranı

$h_m(x)$: yeni zayıf öğrenci (genellikle bir karar ağacı)

$F_m(x)$: güncellenmiş modelin tahmini

Ayrıca, GG algoritmaları için giriş ve çıkış yol haritası Şekil 3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3. OGG algoritması için giriş ve çıkış yol haritası

Veri Hazırlanması

Makine öğrenimi modelleri için veri setinin kalitesi kritik önem taşır; bu nedenle veri toplama ve hazırlama süreçleri doğru ve titizlikle yapılmalıdır. Bu amaçla literatürde yapılan araştırmalar incelendikten sonra ÇF takviyeli GB numunelerinin basınç dayanımıyla ilgili 105 adet veriyi içeren bir veri seti oluşturulmuş ve bu veri setinde kullanılan basınç değerleri Tablo 1.'de verilmiştir.

Modelleme yapılmadan önce regresyon analizlerinde yanlış sonuçlar elde etmemek için veri setindeki kategorik değişkenlerin sayısal hale dönüştürülmesi gerekir. Bunun için veri setindeki kategorik değişkenlerin 1 ya da 0, var veya yok olarak kukla değişkenlere (dummy variable) dönüştürülerek kategorik değişkenler regresyon analizine dahil edilmiştir. İlk başta veri setinde toplam 9 tane değişken var iken, Python yardımı ile kategorik değişkenlerin kukla değişkenlere dönüşümü yapıldıktan sonra değişken sayısı 14 olmuştur. Kür çeşidi parametresi 2 adette, bağlayıcı Malzeme çeşidi parametresi 4 adette ve Geopolimer çeşidi parametresi 2 adette dönüştürülmüştür.

Veri setine ait frekans grafikleri Şekil 4.'te sunulmuştur. Ayrıca, veri setinde yer alan sayısal parametrelerin istatistiksel özellikleri Tablo 2.'de sunulmuştur. Veri setindeki eksik değerler, daha iyi sonuçlar elde etmek için eksik verilerin ortalamalarıyla doldurulmuştur. Buna ek olarak, veri setindeki bağımsız değişkenler arasındaki korelasyonlar Şekil 5.'te gösterilmiştir. Korelasyon katsayıları, değişkenler arasındaki ilişkileri analiz etmemize yardımcı olur. Pozitif korelasyon katsayıları değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğunu gösterirken, negatif korelasyon katsayıları ters ilişkiyi işaret eder. Korelasyon katsayısı 1 ise değişkenler arasında mükemmel bir ilişki olduğunu, katsayı 0 ise değişkenlerin bağımsız olduğunu gösterir. Sonuç olarak, doğru toplanmış ve hazırlanmış bir veri seti, makine öğrenimi modellerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmada temel bir rol oynar. Bu süreçlerin titizlikle yönetilmesi, modelin kalitesini önemli ölçüde etkiler.

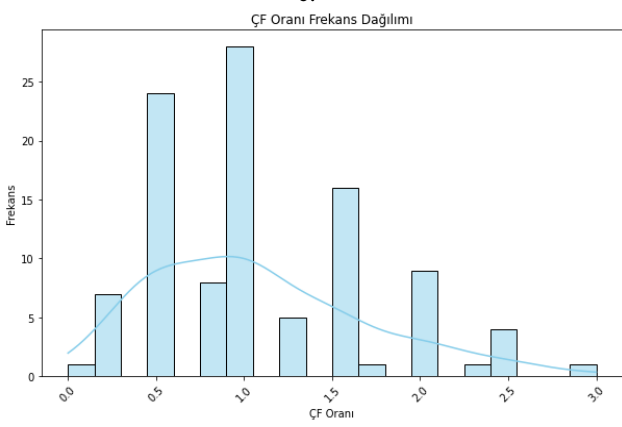
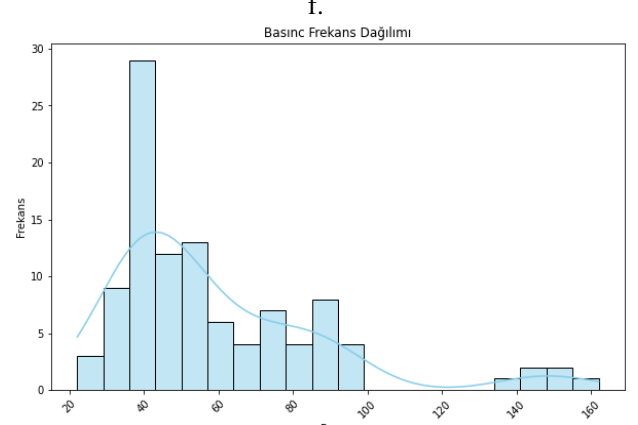
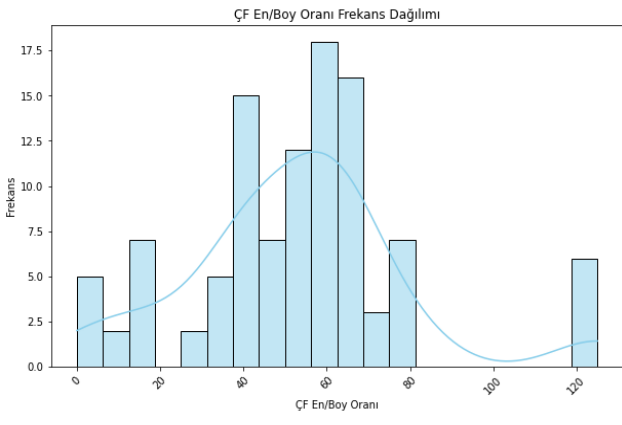
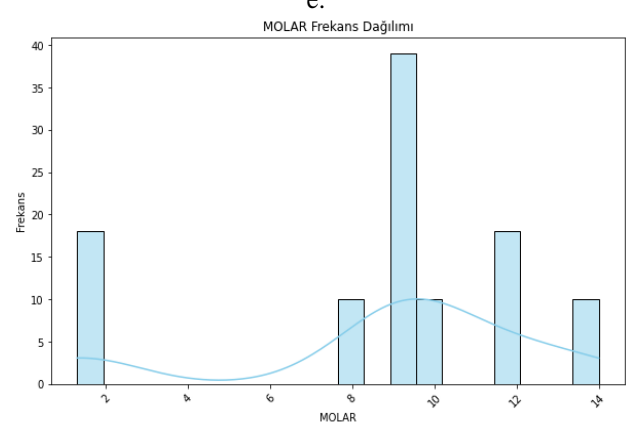
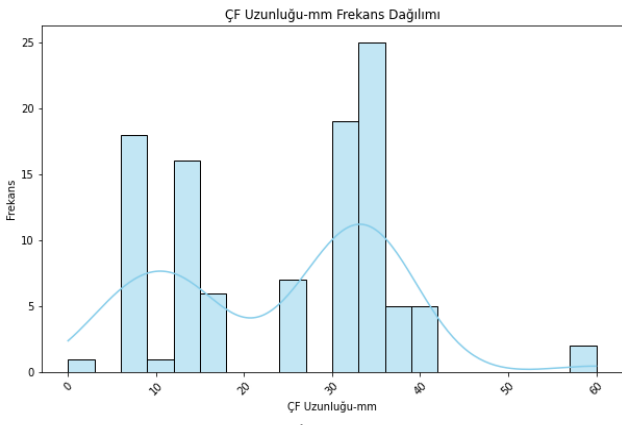
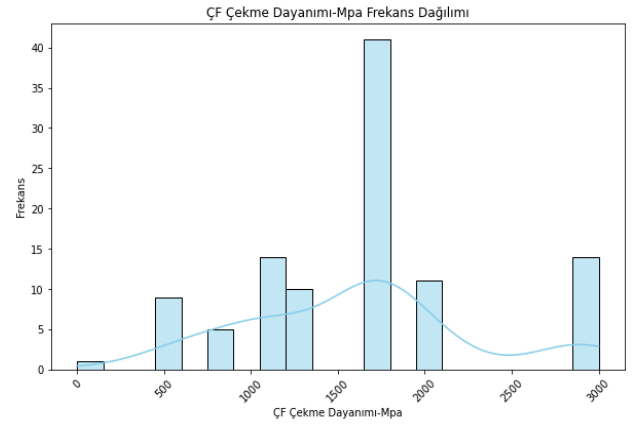
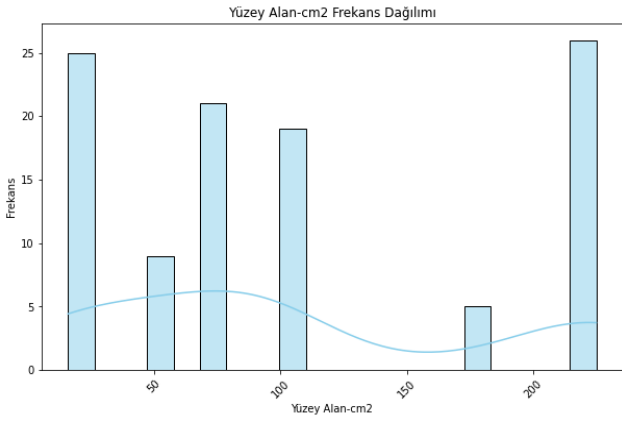
Tablo 1. Veri Seti'ni Oluşturulurken Kullanılan Basınç Dayanım Değerleri

Kaynaklar	Basınç Dayanımı - MPa
	43.3
	47.14
[29]	48.3
	51.21
	54.9
	53
	78
	78.2
[30]	84.6
	81.1
	85.6
	78.9
	140
	147
[31]	144
	152
	150
	162
	42.44
[32]	43.09
	47.46
	32
[33]	32.5
	28.5
	28.5
	55.2
[34]	56.47
	57.7
	59.64
	61.5
	67.02
[35]	73.56
	67.93
	74.97
	74.5
[36]	77.8
	70.5
	72
	38.59
	40.98
[37]	43.04
	40.41
	41.32
	44.25
[38]	53.45
	54.41
	33.6
[39]	35.1
	36.2
	86.5
[40]	99
	89
	78
	35.92
	37.6
[41]	34.73
	33.5
	31.5

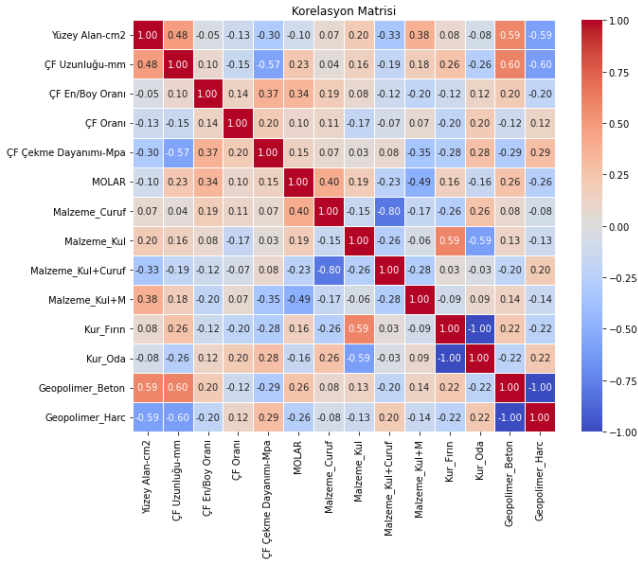
	38.1
[42]	39.8
	37.8
	44.69
	45.45
	48.12
[43]	52.65
	56.06
	58.41
	61.68
	62.15
	67.76
	37
[44]	37.46
	37.94
	38.46
[45]	42
	47
[46]	30.93
	22.13
	50.1
[47]	52.4
	42.3
	37.4
	36.6
[48]	38.46
	39.74
	40.77
	39.49
	45.62
[49]	51.24
	53.21
	54.32
	89.5
	93
	96
[50]	95
	86
	88
	90
	90.1

Tablo 2. Veri setinin istatistiksel değerleri

Değişkenler	Veri Sayısı	Min. Değer	Mak. Değer	Ortalama	Standard Sapma
ÇF Uzunluğu (mm)	105	6	60	24.38	12.66
ÇF En/Boy Oranı	105	1.25	125	53.25	26.12
ÇF Oranı (%)	105	0.25	3	1	0.61
ÇF Çekme Dayanımı (MPa)	105	577	3000	1580.4	651.75
Numunenin Yüzey Alanı (cm ²)	105	16	225	106.77	77.63
Molarite	105	1.3	14	9.45	3.78



Şekil 4. Veri setine ait frekans dağılımı grafikleri:(a) Yüzey Alanı, (b) ÇF Uzunluğu (c) ÇF En/Boy Oranı (d) ÇF Oranı, (e) ÇF Çekme Dayanımı, (f) Molar, (g) Basınc



Şekil 5. Veri setinin korelasyon katsayıları Isı Haritası

Bulgular ve Sonuçlar

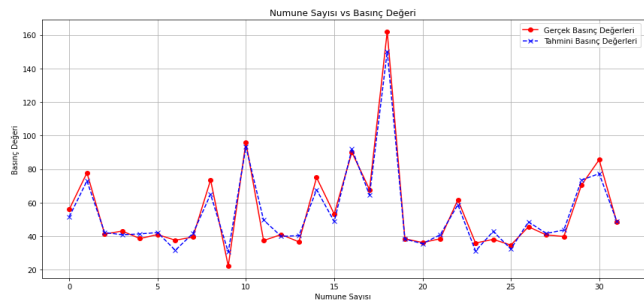
Bulgular

Bu bölümde, çalışmada kullanılan 105 veriden oluşan veri seti GG modeli kullanılarak ÇF'li kül, metakaolin veya cüruf tabanlı geopolimer beton ya da harçların basınç dayanım tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın performansını değerlendirmek için ortalama hata (ortalama test/tahmin), kök ortalama kare hatası (RMSE), korelasyon katsayısı (R) ve belirlenim katsayısı (R^2) metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler, modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar farklı olduğunu, doğruluğunu ve tahminler ile gerçek değerler arasındaki ilişkiyi gösterir. Tablo 3'te, eğitilen GG modeli için kullanılan metrik verilmektedir. Bu sonuçlara göre, GG modelinin performansı oldukça yüksektir. Düşük RMSE, yüksek R ve R^2 değerleri, modelin tahminlerinin genellikle doğru olduğunu ve gerçek değerlerle güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu gösterir. Bu durum, modelin veriyi iyi öğrendiğini ve yeni veriler üzerinde iyi sonuçlar verebileceğini işaret eder.

Tablo 3. GG Model değerlendirme metriklerine ait değerler

Model	Ortalama (Test/Tahmin)	RMSE	R	R^2
GG	0,99602	4,5428	0,9903	0,971

Ayrıca, GG tarafından yapılan tahminlerin ayrıntıları Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu grafikte mavi çizgi gerçek değerleri, kırmızı çizgi ise tahmin edilen değerleri gösterir. İki çizgi birbirine yakın olduğunda, GG modelinin doğru tahminler yaptığı ve güvenilir bir şekilde çalıştığı anlaşılır.



Şekil 6. GB'nun Basınç Dayanımı tahmin grafiği

Sonuç olarak, GG modeli, veri setindeki desenleri iyi anlayıp doğru tahminler yapabilen güvenilir bir model olarak değerlendirilebilir. Bu metriklerin sağladığı bilgiler, modelin performansının objektif bir şekilde değerlendirilmesini sağlar ve modelin genelleme yeteneğini doğrular.

Sonuçlar

Bu çalışma, ÇF takviyeli GB'un basınç dayanımının GG makine öğrenimi algoritması kullanılarak modellenmesi ve bu modellemelerin kullanılarak basınç dayanımının tahmin edilmesini amaçlamaktadır. GB, geleneksel çimentolu betonun yerini alabilecek çevre dostu bir yapı malzemesi olarak önem kazanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma bu yenilikçi malzemenin mukavemet özelliklerini daha hızlı ve etkin bir şekilde değerlendirmeyi hedeflemektedir. Çalışmanın ilk adımı literatürde kapsamlı bir inceleme yapmak ve uygun veri setini oluşturmaktır. GB'un basınç dayanımıyla ilgili mevcut araştırmalar ve veri setleri incelenerek modelleme için gerekli veriler toplanmıştır. Daha sonra, toplanan veri seti üzerinde GG makine öğrenimi algoritması kullanılarak bir model eğitilmiştir. GG algoritması, zayıf tahminçileri (genellikle regresyon ağaçları) birleştirerek güçlü bir tahminci oluşturur ve bu sayede karmaşık ilişkileri modelleyebilir. Elde edilen model çeşitli değerlendirme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde kullanılan bazı yöntemler ve elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Tahmin modelinin performansını değerlendirme yöntemlerinden biri modelin tanımlayıcılık katsayısıdır. R^2 değeri GG modeli için 0,971 olarak elde edilmiştir, yani GG modeli %97,1 doğrulukla tahmin yapmıştır. Buda, GG modelinin basınç dayanımının tahminlerinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüş ve kullanılabilirliği test edilmiştir.
- Tahmin modellerinin performansını değerlendirmede kullanılan bir diğer yöntemde ortalama hata (ortalama (test/tahmin)) değerleridir. Ortalama hata değeri GG modeli için 0,99602 olarak elde edilmiştir. Ortalama hata değeri 1 yaklaştıkça modelin daha doğru sonuç verdiği anlaşılır. GG modelinin ortalama hata değeri 1 yakın olduğu için model iyi performans göstermiştir.
- GG için RMSE değeri 4,5428'dır, bu da modelin tahminlerinin gerçek değerlere yakın olduğunu gösterirken, R değeriniz 0,9903'dir, bu da gerçek ve tahmin edilen değerler arasında güçlü bir pozitif ilişki olduğunu gösterir. Son olarak, ortalama (test/tahmin) oranı 0,99602'tür, bu da test değerlerinin tahmin değerlerinden yaklaşık % 0,398 daha büyük olduğunu gösterir.
- GG makine öğrenmesi algoritmasının gerçek değerlere yakın tahminler yaptığı gözlemlenmiştir, böylece GB ile yapılacak yapıların maliyetlerinin önceden tahminin yapılabileceği anlaşılmaktadır.

Kaynaklar

- [1] A. Karthik, K. Sudalaimani, and C. T. Vijaya Kumar, "Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self-curing bio-geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 338–349, Sep. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.139>.

- [2] M.A. Javeed, M.V. Kumar, H. Narendra, "Studies on mix design of sustainable geopolymer concrete", *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*, Volume-2: Issue-4, 2015.
- [3] S. A. Bernal, E. D. Rodríguez, R. Mejía de Gutiérrez, M. Gordillo, and J. L. Provis, "Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends," *Journal of Materials Science*, vol. 46, no. 16, pp. 5477–5486, Aug. 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5490-z>.
- [4] J. Davidovits, "Geopolymers and geopolymeric materials", *J. Therm. Anal.* 1989; 35: 429–441.
- [5] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, and J. S. J. van Deventer, "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete,'" *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 12, pp. 1590–1597, Dec. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>.
- [6] F. Deng, Y. He, S. Zhou, Y. Yu, H. Cheng, and X. Wu, "Compressive strength prediction of recycled concrete based on deep learning," *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 562–569, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.169>.
- [7] V.A. Chenarlogh, F. Razzazi, and N. Mohammadyahya, "A Multi-View Human Action Recognition System in Limited Data Case using Multi-Stream CNN," Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/icspis48872.2019.9066079>.
- [8] M. Roshani *et al.*, "Proposing a gamma radiation based intelligent system for simultaneous analyzing and detecting type and amount of petroleum by-products," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 53, no. 4, pp. 1277–1283, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.09.015>.
- [9] B. Pourghebleh, A. Aghaei Anvigh, A. R. Ramtin, and B. Mohammadi, "The importance of nature-inspired meta-heuristic algorithms for solving virtual machine consolidation problem in cloud environments," *Cluster Computing*, vol. 24, no. 3, pp. 2673–2696, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03294-4>.
- [10] A. Karbassi, B. Mohebi, S. Rezaee, and P. Lestuzzi, "Damage prediction for regular reinforced concrete buildings using the decision tree algorithm," *Computers & Structures*, vol. 130, pp. 46–56, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.10.006>.
- [11] A. Ahmad, K. Chaiyasarn, F. Farooq, W. Ahmad, S. Suparp, and F. Aslam, "Compressive Strength Prediction via Gene Expression Programming (GEP) and Artificial Neural Network (ANN) for Concrete Containing RCA," *Buildings*, vol. 11, no. 8, p. 324, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings11080324>.
- [12] H. Song, A. Ahmad, K. A. Ostrowski, and M. Dudek, "Analyzing the Compressive Strength of Ceramic Waste-Based Concrete Using Experiment and Artificial Neural Network (ANN) Approach," *Materials*, vol. 14, no. 16, p. 4518, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14164518>.
- [13] M. A. Khan, S. A. Memon, F. Farooq, M. F. Javed, F. Aslam, and R. Alyousef, "Compressive Strength of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete by Gene Expression Programming and Random Forest," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–17, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/6618407>.
- [14] F. Aslam *et al.*, "Applications of Gene Expression Programming for Estimating Compressive Strength of High-Strength Concrete," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, pp. 1–23, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1155/2020/8850535>.
- [15] H.-H. Chu, M.A. Khan, M. Javed, A. Zafar, H. Alabduljabbar, S. Qayyum, "Sustainable use of fly-ash: Use of gene-expression programming (GEP) and multi-expression programming (MEP) for forecasting the compressive strength geopolymer concrete," *Ain Shams Engineering Journal*, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.018>.
- [16] P. Kumar, S. Sharma, B. Pratap, "Prediction of Compressive Strength of Geopolymer Fiber Reinforced Concrete Using Machine Learning" *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 2024, doi: 10.22059/cej.2024.364871.1956
- [17] J. H. Friedman, "Greedy function approximation: a gradient boosting machine", *Annals of Statistics*, 2001, 1189–1232
- [18] C. Bente'jac, A. Cso'rg\Ho, G. Mart'nez-Mu'noz, "A comparative analysis of gradient boosting algorithms", *Artificial Intelligence Review*. 54, 1937–1967, 2021.
- [19] P. Bu'hlmann, T. Hothorn, "Boosting algorithms: Regularization, prediction and model fitting", 2007.
- [20] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: a Scalable Tree Boosting System," *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining - KDD '16*, pp. 785–794, 2016, doi: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- [21] V.Q. Tran, V.Q. Dang, L.S. Ho, "Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach", *Construction and Building Materials*, 323, 126578, 2022.
- [22] T.B. Redmond, M.H. Allen, "Compressive strength of composite brick and concrete masonry walls, MASONRY: Past and Present. Philadelphia: ASTM", 195–232, 1975.
- [23] J. O. Ogutu, H.-P. Piepho, and T. Schulz-Streeck, "A comparison of random forests, boosting and support vector machines for genomic selection," *BMC Proceedings*, vol. 5, no. S3, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1186/1753-6561-5-s3-s11>.
- [24] Y. Huang, Z. Huo, G. Ma, L. Zhang, F. Wang, and J. Zhang, "Multi-objective optimization of fly ash-slag based geopolymer considering strength, cost and CO2 emission: A new framework based on tree-based ensemble models and NSGA-II," *Journal of Building Engineering*, vol. 68, pp. 106070–106070, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2023.106070>.
- [25] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, "Scikit-learn: machine learning in python", *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825– 2830, 2011.
- [26] M. C. Kang, D. Y. Yoo, R. Gupta, "Machine learning-based prediction for compressive and flexural strengths of steel fiber-reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, 266, 121117, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121117>
- [27] <https://medium.com/machine-learning/t%C3%BCrkiye/korelasyon-katsay%C4%B1s%C4%B1-python-uygulamas%C4%B1-de83ea37ff23>
- [28] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, "The Elements of Statistical Learning", *Springer*, 2009. ISBN : 978-0-387-84857-0
- [29] P. Zhang, J. Wang, Q. Li, J. Wan, and Y. Ling, "Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 299–313, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1515/secm-2021-0030>.

- [30] Y. Ding and Y.-L. Bai, "Fracture Properties and Softening Curves of Steel Fiber-Reinforced Slag-Based Geopolymer Mortar and Concrete," *Materials*, vol. 11, no. 8, p. 1445, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11081445>.
- [31] Y. I. A. Aisheh, D. S. Atrushi, M. H. Akeed, S. Qaidi, and B. A. Tayeh, "Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01234, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01234>.
- [32] K. Vijai, R. Kumutha, B.G. Vishnuram, "Effect of inclusion of steel fibres on the properties of geopolymer concrete composites", *Asian Journal of Civil Engineering*, 13(3), 381-389, 2012.
- [33] S. F. A. Shah, B. Chen, S. Y. Oderji, M. Aminul Haque, and M. R. Ahmad, "Comparative study on the effect of fiber type and content on the performance of one-part alkali-activated mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 243, p. 118221, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118221>.
- [34] R. R. Bellum, "Influence of steel and PP fibers on mechanical and microstructural properties of fly ash-GGBFS based geopolymer composites", *Ceramics International*, 48(5), 6808-6818, 2022.
- [35] N. A. Eren, R. Alzebaree, A. Çevik, A. Niş, A. Mohammedameen, M. E. Gülşan, "Fresh and hardened state performance of self-compacting slag based alkali activated concrete using nanosilica and steel fiber," *Journal of composite materials*, vol. 55, no. 28, pp. 4125-4139, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/00219983211032390>.
- [36] K. Z. Farhan, M. A. M. Johari, R. Demirboğa, "Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments," *Construction and Building Materials*, vol. 345, p. 128339, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128339>.
- [37] A. Pham, K. T. Nguyen, T. A. Le, K. Lee, "Investigation of impact behavior of innovative non-curing steel fiber geopolymer composites," *Case studies in construction materials*, vol. 16, pp. e01011-e01011, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01011>
- [38] A. C. R. da Silva, B. M. Almedia, M. M. Lucas, V. S. Candido, K. S. P. da Cruz, M. S. Oliveira, A. R. G. de Azevedo, S. N. Monteiro, "Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, p. e00829, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00829>.
- [39] H. A. Goaz, H. A. Shamsaldeen, M. A. Abdulrehman, and T. S. Al-Gasham, "Evaluation of Steel Fiber Reinforced Geopolymer Concrete Made of Recycled Materials," *International Journal of Engineering*, vol. 35, no. 10, pp. 2018-2026, 2022, doi: <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.10a.19>.
- [40] W. Chen, J. Pan, B. Zhu, X. Ma, Y. Zhang, Y. Chen, X. Li, L. Meng, J. Cai, "Improving mechanical properties of 3D printable 'one-part' geopolymer concrete with steel fiber reinforcement," *Journal of Building Engineering*, vol. 75, pp. 107077-107077, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107077>.
- [41] L. Qin, Z. Xu, Q. Liu, Z. Bai, C. Wang, Q. Luo, Y. Yuan, "Experimental study on mechanical properties of coal gangue base geopolymer recycled aggregate concrete reinforced by steel fiber and nano- Al_2O_3 ," *Reviews on advanced materials science*, vol. 62, no. 1, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1515/rams-2023-0343>.
- [42] J. M. Their and M. Özakça, "Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 180, pp. 12-22, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.274>.
- [43] S. A. Elkholy, H. I. El-Hassan, "Mechanical and micro-structure characterization of steel fiber-reinforced geopolymer concrete", *In Proceedings of the ISEC*, 2019.
- [44] Z. Xu, Q. Liu, H. Long, H. Deng, Z. Chen, and D. Hui, "Influence of nano- SiO_2 and steel fiber on mechanical and microstructural properties of red mud-based geopolymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 364, p. 129990, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129990>
- [45] S. C. Moghaddam, R. Madandoust, M. Jamshidi, I. M. Nikbin, "Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 281, p. 122571, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122571>
- [46] M. Ibraheem, F. Butt, R. M. Waqas, K. Hussain, R. F. Tufail, N. Ahmad, K. Usanova, M. A. Musarat, "Mechanical and Microstructural Characterization of Quarry Rock Dust Incorporated Steel Fiber Reinforced Geopolymer Concrete and Residual Properties after Exposure to Elevated Temperatures," *Materials*, vol. 14, no. 22, pp. 6890-6890, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14226890>.
- [47] J. Zheng, L. Qi, Y. Zheng, and L. Zheng, "Mechanical properties and compressive constitutive model of steel fiber-reinforced geopolymer concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 80, pp. 108161-108161, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108161>.
- [48] A. K. Parashar, A. Kumar, P. Singh, N. Gupta, "Study on the mechanical properties of GGBS-based geopolymer concrete with steel fiber by cluster and regression analysis," *Asian journal of civil engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 2679-2686, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00937-2>.
- [49] C. P. Devika, R. N. Deepthi, "Study of Flexural Behavior of Hybrid Fibre Reinforced Geopolymer Concrete Beam," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, Issue 7, July 2015.
- [50] X. Gao, Q. L. Yu, H. J. H. Brouwers, "Evaluation of hybrid steel fiber reinforcement in high performance geopolymer composites," *Materials and Structures*, vol. 50, 165, 2017. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1030-x>



Estimating contract price using structural variables: a machine learning approach with data preprocessing

Semi Emrah ASLAY^{1*}

¹ Erzincan Binali Yildirim University, Department of Civil Engineering, seaslay@erzincan.edu.tr, Orcid No: 00000-0002-0127-5474

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 July 2024
Received in revised form 11 September 2024
Accepted 24 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

SVM, machine learning, structural parameters, data preprocessing, feature importance.

Doi: 10.24012/dumf.1515160

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Accurately estimating the construction contract price is a necessary step for correctly determining project budgets and ensuring efficient use of resources. In this study, contract price in public construction tenders are estimated using structural project variables. The variables applied in the study are created by adding the quantities of columns, shear walls, and beams to variables commonly used in the literature for cost estimations. Six different machine learning algorithms are employed as machine learning algorithms. These are Support Vector Machine (SVM), Decision Tree (DT), eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), k-Nearest Neighbors (KNN), Artificial Neural Network (ANN), and Random Forest (RF). Preprocessing methods and a series of hyperparameter optimizations are applied to enhance the predictive capability on datasets. These processes and the applied algorithms are evaluated with five different performance metrics. The Support Vector Machine (SVM) algorithm produced the best results, achieving a coefficient of determination (R^2) of 0.8966, a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 23.70, a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.8956, a Mean Absolute Error (MAE) of 0.4849, and a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.6989. This study contributes to the literature by developing machine learning models and data analysis processes for contract price approaches.

Introduction

In today's world, with the advancement of construction technology, the design of structures can be easily accomplished. Not only ordinary buildings, but also specialized engineering structures, can be designed and constructed. This situation is the result of a long process that has evolved over time. In the future, it is expected that construction activities will progress in a way that adapts to the digital world [1]. The effectiveness of artificial intelligence applications is increasing in the technological world, and its reflections can also be seen in construction activities. Machine learning models, one of the subfields of artificial intelligence, play an important role in the digitalization process in many areas related to construction works and have become one of the popular methods used in recent years [2].

Building cost estimation can take various forms, including contract price estimation, cost estimation, preliminary cost estimation, cost index estimation, and final cost estimation. Several popular machine learning models are used in cost estimation models [2], [3]. Artificial neural networks are fundamental algorithms for cost estimation [4] not only for cost estimation but also in studies where the final construction duration is predicted [5]. Saeidlou &

Ghadiminia [6] created a model using ANN on seven variables as part of a cost estimation framework, which includes a validation unit. Car-Pusic et al. [7] estimated the preliminary costs of buildings based on a neural network-based model. Pham et al. [8] preferred regression models along with cost optimization. Zhang and Fang [9] evaluated building properties and conducted kernel principal component analysis with popular algorithms (support vector machine, random forest). Badawy [10] used 174 residential projects in Egypt for early-stage cost estimation by developing a hybrid model. Coffie et al. [11] applied multiple regression to 911 construction projects in Ghana. Hassim et al. [12] and Sayed et al. [13] also used survey studies in predicting construction costs. Aslay and Dede [1] optimized construction costs using different algorithms. Dang-Trinh et al. [14] conducted preliminary cost estimation for 35 different factory projects using various learning algorithms. Uysal and Sonmez [15] calculated conceptual costs using a case-based reasoning method combined with bootstrap. Ali et al. [16] compared models used in their research by employing an integrated data intelligence model for 90 building projects in Iraq. Alfaggi & Naimi [17] sought solutions to construction projects using a fuzzy-AHP model. There are studies related to construction costs or contract prices with economic data or

inflation indicators [18]. XGBoost, neural networks, time series, and regression methods were employed to address cost issues by incorporating economic data into variables [19], [20]. In addition to superstructure projects, machine learning models are frequently used in various construction styles such as underground metro station cost-material estimation [21], public highways construction time and cost [22], tunnel projects [23], and prestressed bridges [24]. It is noteworthy that there are no studies in the literature where contract prices are estimated based on structural project parameters. Especially in the tender processes of public buildings, there is a need for more research on agreement prices. It is evident that both for construction engineers and contractor firms, it is possible to relate contract prices with all structural elements in the structural project by examining the rough construction.

In the past decade, construction firms in Turkey have been increasingly focusing on construction projects tendered by the public sector, particularly due to declining project profitability. Therefore, alongside the importance of rapid technical foresight and readability risks of construction contracts [25], understanding what constitutes the contract prices of construction projects has become crucial. Nowadays, firms participating in public tenders typically try to estimate contract prices by individually creating quantity take-offs and predicting contract amounts based on unit prices. However, this method is insufficient for contract price estimation because many bidding companies participate in public tenders, making it difficult to determine the contract amount agreed upon with the public administration. Especially civil engineers attempt to predict contract prices supported by structural project parameters, which can be described as rough construction. They make approximate estimates for the monetary value of the structure based on concrete-rebar-formwork costs [26]. However, it can be said that these estimates are not highly professional and are subject to market conditions. There is a need in the construction industry for contract price estimation models supported by building elements. Additionally, these models should be capable of being enhanced with parametric optimizations.

In this study, a model developed through a series of optimization methods is presented for estimating contract prices in public construction tenders by incorporating the characteristics of reinforced concrete structural elements into existing variables. The monetary agreement value is attempted to be predicted based on the distribution of variables and a structural model. Parameters and functions are established for the structural form to solve the problem. The variables constituting the datasets are obtained from various construction projects. Variable characteristics are determined by analyzing both similar studies in the literature and market needs. The machine learning model is developed to the extent possible through the preprocessing of data and optimization of certain parameters. Results pertaining to different performance metrics are obtained using six different machine learning algorithms. Both the building examples and the research on contract price estimation, along with the pros and cons of the prediction

model, are presented in this paper. In this study, efforts are undertaken to contribute to the construction sector by addressing these deficiencies through different machine learning algorithms, prediction models, and optimization processes in data correction stages.

Material and Method

Data Sets

There are various parameters used for predicting contract prices in construction works. The contract price is also a type of construction cost estimation, and many input parameters have been created for cost estimation in machine learning methods. The study conducted by Asuncion and Newman [27] is one of the primary works that generated these parameters. In other studies in the literature, some of these parameters have been used, and additional parameters have been added to create datasets [28], [29], [6]. In this study, data sets were constructed by reviewing existing literature and adding new parameters to improve the performance of machine learning models in predicting contract prices for building construction. The samples utilized for constructing the datasets are summarized in table 1. This table offers a comparative analysis of the samples provided in the literature and those examined in this study. A total of 15 different input examples are presented in the table. These are; Total floor area of the building, number of columns, number of shear walls, type of building, lot area, project location, duration of construction, number of building floors, type of footing, number of special facilities, soil type, cost of construction workers, building height, number of beams and number of elevator. In this study, six different input data are used: Total floor area of the building, number of columns, number of shear walls, lot area, number of building floors, building height, number of beams. Apart from the inputs presented in the table-1, 15 additional input samples were evaluated in the study. However, it was determined that 6 of these inputs performed well.

Data Features

In this study, data were obtained from structural projects of 353 different reinforced concrete buildings. The buildings are located in various provinces of Turkey. All projects are tendered on a "turnkey lump-sum contract" basis. This contract type entails a project where all stages, from start to finish, are carried out by the contractor firm for a single agreed-upon price. The data for the 353 projects awarded through this contract type are obtained from the official government website "Elektronik Kamu Alımları Platformu-EKAP" [30]. An expert civil engineer collected the data from the structural projects. These data represent datasets found only in structural projects. The variables created for the prediction model in the research are structural project parameters. Initially, 15 variables were calculated and used to create the dataset. Later, the relationships between the data were examined both among themselves and with the target variable. Correlation matrices, feature importance, and performance metrics were examined for each combination of variables, resulting in the initial 15 variables

being reduced to 6. The parameters used in the datasets building's foundation; average number of columns is the obtained by dividing the total number of columns by the

count obtained by dividing the total number of beams by the number of floors construction cost price is the agreement price between the administration and the contractor; total

Table 1

The parameters used in the datasets

Input Parameter	[27]	[28]	[31]	[32]	
	A.Asuncion,&D. Newman, 2007	A.Mohamed et al. 2015	Rafiei &Adeli, 2018	Saeidlou& Ghadimini a, 2023	This Study
Total floor area of the building (x1)	+	+	+	+	+
Number of columns (x2)	-	-	-	-	+
Number of shear walls (x3)	-	-	-	-	+
Type of building (x7)	-	+	-	+	-
Lot area (x4)	+	-	+	-	+
Project Location (x8)	-	+	-	-	-
Duration of construction (x9)	+	-	+	-	-
Number of building floors (x5)	-	+	-	+	+
Type of footing (x10)	-	+	-	-	-
Number of special facilities (x11)	-	-	-	+	-
Soil Type (x12)	-	+	-	-	-
Cost of construction workers (x13)	-	-	-	+	-
Building height (x14)	-	+	-	-	-
Number of beams (x6)	-	-	-	-	+
Number of elevator (x15)	-	+	-	-	-

floor area of the building is the sum of the areas of the structure across all floors; number of columns is the count of columns across all floors of the structure; number of shear walls is the count of shear walls across all floors of the structure; total number of structural elements is the sum of columns, shear walls, and beams in the building; lot area is the land area where the building is constructed; average number of structural elements is the count obtained by dividing the total number of structural elements by the number of floors; duration of construction refers to the completion time of the construction; number of building floors is the sum of basement, ground, and typical floors; total number of vertical elements is the sum of columns and shear walls in the building; average number of vertical elements is the count obtained by dividing the total number of columns and shear walls by the number of floors; average number of shear walls is the count obtained by dividing the total number of shear walls by the number of floors; number of beams is the count of beams across all floors of the building; foundation height denotes the concrete height of the count number of floors; average number of beams is the

Method

Machine learning is one of the subfields of artificial intelligence and is highly capable in interpreting data. Data analysis and prediction of target parameters are commonly used in all academic disciplines. Researchers use various algorithms to analyze the data and build forecasting values. These algorithms are used to develop models tailored to the problem type and objective. Machine learning algorithms used in the study; Support vector machine (SVM), Random forest (RF), Extreme gradient boosting (XGBoost), k Nearest neighbors (KNN), Artificial Neural Networks (ANN), and Decision tree (DT) algorithm.

Support vector machine (SVM)

Support Vector Machine (SVM) was developed by Vapnik [33]. The method is considered one of the regression modeling techniques, and its main goal is to find the optimal hyperplane for the best data prediction. The concept of a hyperplane can be described as an attempt to draw the most appropriate line between data points on any x-y plane. The

concept of margin refers to the lines parallel to the hyperplane that have the best range to model the data effectively [34]. In order to enhance the generalization capabilities of Support Vector Machine models, margins on the x-y plane are kept as wide as possible, with the main axis being the hyperplane line. Decision boundaries are used to partition data points and improve prediction accuracy. Decision boundaries are also referred to as support vectors. Support vectors aim to determine the best hyperplanes by methodologically distinguishing between data points, thereby enhancing the performance of predicting target values [35], [36]. The structure of the SVR model is indicated in Figure 1. SVM maps data into a high-dimensional space to create regression models. It identifies the optimal hyperplane, and the kernel functions used incorporate nonlinear relationships between the data into the model. This allows SVM to also create nonlinear regression model

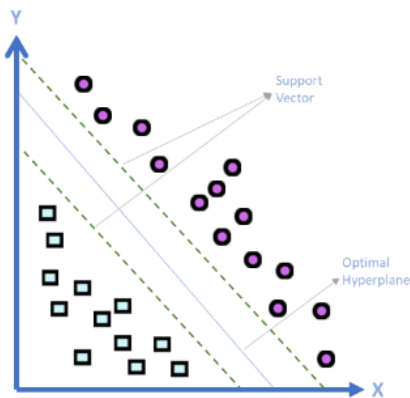


Fig. 1. Structure of SVM model

Decision tree (DT)

Decision trees (DT) [37] are inspired by the structure of a sample tree for solving problems. The information source is divided into many parts and subgroups. The splitting process can be performed using methods such as entropy or the sum of squared errors [38]. Model ranges are symbolized as three types of nodes: root nodes, internal nodes, and leaf nodes. Each node represents a decision rule and generates predictions. To make predictions on the training set, the mode or mean of the outcomes is taken, and the model is completed. Decision trees can often involve issues such as overfitting and are typically used alongside methods that allow for ensemble use, like random forests.

Random Forest (RF)

Random Forest (RF), developed by Breiman et al. [39], is created by combining a large number of decision tree models. Random Forest (RF) is formed by bringing together a large number of decision tree models. The algorithm randomly selects all the trees and trains the model by dividing each one into subsets to make the results more reliable. The Gini index within the “caret” package in R Studio is used for the splitting process. The main characteristic of the Random Forest algorithm is the

bagging method. This method attempts to reduce variance at each stage of data prediction by voting or averaging, thereby enhancing predictive ability. Random Forest provides a good option for modeling high-dimensional and complex datasets. It can achieve necessary accuracy, particularly in complex datasets with a high degree of disparities. It is resistant to overfitting and performs well even in such situations [40]. The structure of the RF model is presented in Fig.2.

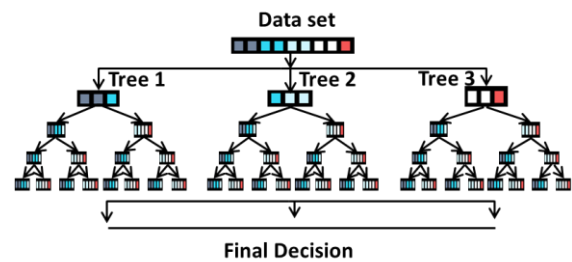


Fig. 2. Structure of RF model

Extreme gradient boosting (XGBoost)

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) has quickly become a popular method in machine learning in recent years, although it was developed relatively recently by Chen and Guestrin [41]. It is based on gradient boosting and constructs models by aggregating decision trees [42]. The algorithm's frequent usage stems from its scalability and fast execution. It handles sparse matrices efficiently and weights examples in tree learning with weighted quantile sketching. XGBoost performs cross-validation and automatically handles missing values. It is preferred for large datasets and high-dimensional feature spaces. In addition, it is resistant to overfitting and adjusting hyperparameters is quite easy. With all these features, it provides a functional algorithm example for users [43].

K Nearest neighbors (KNN)

K Nearest Neighbors (KNN) is a fundamental machine learning algorithm [44]. It is a non-parametric method that attempts to provide a solution through distance functions. The distance function is defined by the parameter k , which calculates the distance to the training set. Thus, the created dataset is evaluated within the class that is closest, attempting to reach a conclusion. The value of k is a hyperparameter within the KNN algorithm. This value is determined by the user and is not assigned randomly. It is typically determined through trial and error or methods like cross-validation. While the KNN algorithm is successful and effective in small datasets, it loses this advantage as the dataset grows [45].

Artificial Neural Networks (ANN)

Artificial neural networks (ANN) [46] is a machine learning algorithm created by simulating biological neural networks and cells. Just like in the nervous system, an architecture of layers, nodes, and connections is established, and an algorithm uses the values of observations (inputs) to

determine the weights within this network. In this way, they facilitate transmission and are referred to as nodes or neurons in the literature. Additionally, there are layers connecting this group of neurons. The data is weighted within the neurons using the backpropagation algorithm to determine the weights. These weights are then used to calculate various possibilities, and finally, output values are generated as a result of these operations. Outputs are then transmitted to other neurons and layers, striving to reach a conclusion. Artificial neural networks have 3 layers: input layer, hidden layer, and output layer. The input layer receives the data and transfers it to the hidden layer. It has neurons, and the number of neurons must not be less than the number of inputs. The layer in between is called the hidden layer, processing the inputs and forming the model design, teaching the data relationship to the model [47].

Model improvement techniques

There are many methods and techniques aimed at improving the predictive performance of the created models in machine learning. If changes made to the dataset or algorithm improve the performance of the output parameter of the model, each correction is defined as a model improvement technique. Some of these techniques include gathering more data, removing some outlier data, selecting the appropriate model, tuning procedures, cross-validation, and utilizing better metrics.

Machine learning models should be built using datasets that contain relevant relationships for accurate predictions. Additionally, having an adequate amount of data and removing irrelevant data are crucial for accurate model prediction. For this purpose, basic statistical methods, box plot, histogram, and clustering techniques can be used. In the accurate construction of prediction models, it is necessary to have a sufficient percentage of train-test data, apply tuning procedures, and evaluate cross-validation metrics. The application of these techniques is generally done through trial and error, and by evaluating the results of data analysis. For example, taking 70% of the entire data group for the train set and 30% for the test set, and comparing it with the second group where the same dataset is split into 80% train data and 20% test data, can be given as an example. Additionally, for cross-validation, results can be compared across different values of N-fold and hyperparameter optimizations performed for different models.

In this study, box plot graphs were preferred for detecting outlier values. By analyzing the graphs, outlier data points were removed from the datasets. The accuracy of the prediction model was evaluated based on improvement in metrics. Train-test groups with different percentages were compared for the datasets. Cross-validation parameters and hyperparameter optimization were conducted across various machine learning algorithms. As hyperparameter values, for SVM, the regularization parameter, sigma, degree, and scale are used. For Decision Trees (DT), the complexity parameter, minimum number of observations, and maximum depth of the tree are specified. Random Forest (RF) features key parameters such as the number of

variables, number of trees, and minimum size of terminal nodes. XGBoost involves important parameters including the number of boosting iterations, learning rate, maximum depth of a tree, and gamma. K-Nearest Neighbors (KNN) relies on the parameter k. Lastly, Artificial Neural Networks (ANN) require defining the number of units in the hidden layer, the regularization parameter, and the maximum number of iterations for training. The results were evaluated. The mentioned processes have yielded positive and negative results for the model's performance.

Performance Evaluation

Various performance metrics are utilized for prediction models in this study. Determination Coefficient (R^2), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), Mean Absolute Error (MAE), and Root Mean Square Error (RMSE) indicators are employed as performance metrics for the models. The R^2 value indicates how well the regression model fits the data and ranges between 0 and 1. Also known as the determination coefficient, R^2 closer to 1 suggests better prediction accuracy. MAPE, Mean Absolute Percentage Error, conveys error values as a percentage by comparing actual values with predicted values. A lower MAPE value signifies a better model, typically acceptable values range between 20% and 50%, though variations may occur depending on the data source. NSE, Nash-Sutcliffe Efficiency, is another accuracy measure that calculates the proportional variance of actual values to predicted values, ranging from $-\infty$ to 1, with values closer to 1 indicating higher success. MAE, Mean Absolute Error, represents the average of the absolute differences between actual and predicted values, where smaller values are preferable. RMSE (Root Mean Square Error) computes the square root of the average of the squared differences between actual and predicted values. A lower RMSE implies better

Table 2

The equations of performance criteria.

Term	Function	Equation
R^2	Determination Coefficient	$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$
RMSE	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2}$
MAE	Mean Absolute Error	$MAE = \frac{1}{n} \sum y_i - \hat{y}_i $
NSE	Nash–Sutcliffe Efficiency	$NSE = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$
MAPE	Mean Absolute Percentage Error	$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right $

performance of predicted values over actual values. Some articles or researchers may consider RMSE close to 0 as a criterion for low RMSE value, but it should be noted that in some studies, RMSE may be low but not close to 0. For instance, when the target variable is in the order of millions or billions, it is more appropriate to evaluate the RMSE value within the dataset or among algorithms. The mathematical expressions of the performance metrics are given in Figure 4. The numerical values and analyses of these metrics are shared in the "Results and Discussion" section of this study.

Data Preprocessing

In machine learning models, creating a correlation matrix is a popular data preprocessing method for examining relationships among variables. Although there are numerous methods for exploring relationships between variables, a correlation matrix is both simple and functional. In this study, during the data preparation stage, data with initially 15 variables were obtained from structural projects. Some of these variables were derived both individually and by aggregating with each other. For example, the numbers of columns, shear walls, and beams in a structure were calculated separately. Additionally, the sums of columns, shear walls, and beams were aggregated to create a new variable representing the total number of structural elements. Definitions of these variables are detailed in the

preceding section. The Pearson correlation coefficient was utilized to evaluate the relationship between the variables. Figure 3 shows the correlation matrix of the dataset created in the final stages. Accordingly, the correlation coefficients between the variables and the target variable range from a maximum of 0.75 to a minimum of 0.01. Generally, the author aims not to include variables with correlation coefficients below 0.50 but still explores different variable combinations. Variables take their final form through data analyses, including correlation matrix, feature importance, and model performance testing. These data analyses are presented in subsequent sections. The workflow of the study is given in Figure 4. According to this, in the correlation matrix, the variable with the highest correlation with the target variable is "construction area" at 0.71, and the variable with the lowest correlation is "Lot area" at 0.48. Furthermore, the relationship scores among the variables themselves range from 0.83 to 0.33. It can be said that the relationship distributions among all variables are approximately homogeneous when examining the relationships among them. The values in the dataset were also subjected to outlier detection and standardization procedures. Quartile analysis and box plot visuals were utilized to examine both the outliers and the variations among the numerical expressions of values in the dataset. In the analysis, it was observed that the "construction area" variable and the "lot area" variable had high scale dimensions. Therefore, standardization processes were applied to all variables to eliminate the scale problem among the variables. Data points that were identified as outliers were removed from the dataset. The initial dataset, which consisted of 359 records, decreased to 353 records after the removal of outliers. It is understood that this decrease in the number of data points resulted in a 5% increase in the performance metrics of the prediction model.

Machine Learning Model

In this study, machine learning algorithms such as Artificial Neural Networks (ANN), k-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest (RF), Decision Trees (DT), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Support Vector Machines

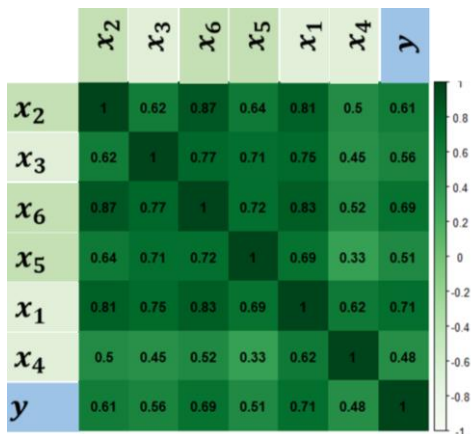


Fig. 3. Correlation matrix

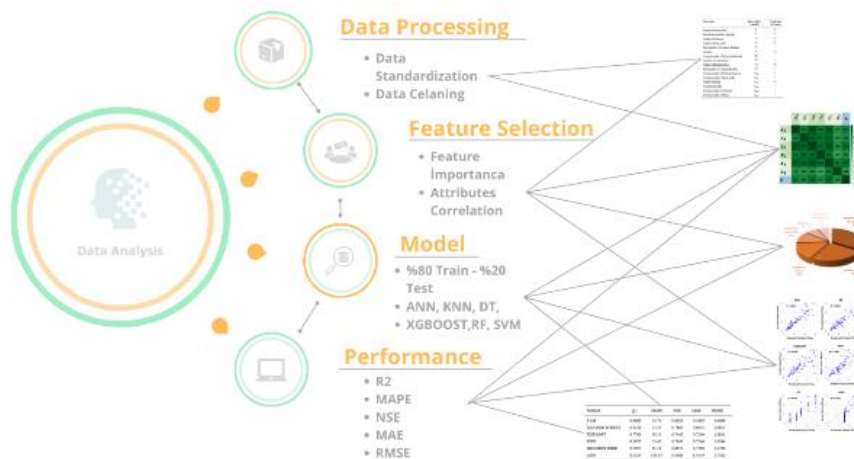


Fig. 4. Flowchart diagram of the predictions framework

(SVM) are applied for data analysis. The dataset consists of 6 independent variables and 1 dependent variable. There are 353 data points. All algorithms are implemented in the R Studio software program, and necessary checks are performed. Depending on the algorithm type, codes are updated accordingly. In the study, different seed values are tried with the algorithms to find the best prediction models. It is understood that the performance metric values converge at a certain point. The convergence of performance metric values indicates that the experiments are sufficient, demonstrating the adequacy of trials. Additionally, different n-fold values are experimented with for cross-validation, ranging from 5 to 10, aiming to achieve the most suitable outcome. The tuning parameter is optimized for the models, where various combinations are applied. Through all these processes, research is conducted to obtain the best results for the prediction models. The flowchart diagram of the prediction framework is presented in Figure 4.

Results and Discussion

Model Training and Evaluation

Machine learning prediction models involve one of the most crucial stages, which is the division of the dataset into test and train sets. The model should be sufficiently trained, and the trained model should be evaluated with the test data. In this study, for the test-train data, four different possibilities were explored across all models: 50% train - 50% test, 60% train - 40% test, 70% train - 30% test, and 80% train - 20% test. Sample sizes for each ratio were randomly generated from the total dataset. Among all algorithms, the 80% train - 20% test ratio was found to be functional. An example illustrating the efficiency of test-train data ratios relative to each other can be observed in the study where the Support Vector Machine (SVM) achieved the best result. In samples of structural project parameters in the dataset, it obtained an R-squared value of approximately 0.8966 with an 80-20 train-test ratio, while it yielded 0.8244 with a 70-30 train-test ratio. This difference represents a 9% variation in percentage terms. The success of the test-train ratio can vary across all datasets, and comparing these ratios within each

dataset can significantly contribute to the model effectiveness. In the research, efforts were made to improve the efficiency of the model by altering the Cross-validation parameters and trying different hyperparameter values. Cross-validation values ranging from 5 to 10 were applied. In terms of hyperparameter values, algorithm coefficients, number of layers, number of trees, learning rates, etc. were considered, and different trials were conducted. Differences in the model's efficiency were observed in both cross-validation scores and hyperparameter values. These values are providing good results depending on the characteristics of the datasets and the relationship between the dataset and the algorithm.

Modelling results

In this study, machine learning models such as SVM, Random Forest, XGBoost, KNN, Decision Tree, and ANN were employed. Performance metrics including R^2 , MAPE, NSE, MAE, and RMSE were applied. The dataset benefited from structural project parameters. Attempts have been made to reach the best prediction models for contract price estimation using variables such as column count, shear wall count, beam count, floor count, total floor area, and lot area. The primary objective is not to compare machine learning algorithms. However, while constructing prediction models, both the effectiveness of the best model and the analysis of how efficient the efficient model produces efficiency were aimed. Comparison among algorithms was performed as part of the data analysis process to understand which model performs better. The best models among the six different ones were determined as SVM, RF, XGBoost, KNN, Decision Tree, and ANN, respectively. For comparative purposes, five different performance metrics were used. Among these metrics, the best values were achieved by SVM and RF. SVM yielded the best result with a R^2 value of 0.8966 and a MAPE value of 23.70. Following closely, RF gave the second-best result with a R^2 value of 0.8258 and a MAPE value of 33.43. The performance metrics for other algorithms showed relatively poor results. The values for KNN, XGBoost, and DT were obtained 0.76. ANN, on the other hand, provided the worst

Table-3

Performance comparison of the models

Method	R^2	MAPE	NSE	MAE	RMSE
SVM	0.8966	23.70	0.8956	0.4849	0.6989
RANDOM FOREST	0.8258	33.43	0.7885	0.6942	0.9853
XGBOOST	0.7706	35.10	0.7445	0.7100	1.0831
KNN	0.7675	31.65	0.7647	0.7266	1.0394
DECISION TREE	0.7657	41.44	0.6972	0.7786	1.1790
ANN	0.7210	143.43	0.3586	1.4579	1.7162

value of 0.72. It was observed that the R^2 values among all algorithms ranged from 0.8966 to 0.7210. It can be said that the performance metrics also exhibit similar correlations amongst themselves, akin to those of R^2 and MAPE. This information is summarized in Table 5. The best models among the six different ones were determined as SVM, RF, XGBoost, KNN, Decision Tree, and ANN, respectively. For comparative purposes, five different performance metrics were used. Among these metrics, the best values were achieved by SVM and RF. SVM yielded the best result with a R^2 value of 0.8966 and a MAPE value of 23.70. Following closely, RF gave the second-best result with a R^2 value of 0.8258 and a MAPE value of 33.43. The performance metrics for other algorithms showed relatively poor results. The R^2 values for KNN, XGBoost, and DT were obtained around 0.76. ANN, on the other hand, provided the worst R^2 value of 0.72. It was observed that the R^2 values among all algorithms ranged from 0.8966 to 0.7210. It can be said that the performance metrics also exhibit similar correlations amongst themselves, akin to those of R^2 and MAPE. This information is summarized in Table 2.

One of the most notable findings observed from the performance metrics is the effectiveness demonstrated by the ANN algorithm. Despite generally outperforming other models in efficiency comparisons in various studies, ANN models exhibited the worst performance in this research dataset. While the determination coefficient value is at an acceptable level, the mean absolute percentage error and Nash-Sutcliffe efficiency values are notably poor. Tuning parameters were applied with different numerical values in all models, including the ANN model. Additionally, grid search and random search hyperparameter optimization were conducted for this algorithm. However, it still did not yield better prediction results compared to other models. The variable relationships and specific characteristics within the datasets have significantly impaired the metrics of the ANN algorithm. Nevertheless, efforts were made to achieve the best results with this model as well. In this research, the SVM model emerged as the most efficient model. The determination coefficient and Nash-Sutcliffe efficiency values are consistent and satisfactory. The algorithm produced mean absolute percentage error, mean absolute error, and root mean square error values at the lowest levels as expected. The performance of the RF model is also satisfactory. While its performance value is at an acceptable level, it ranks as the second-best model when the metric values are relatively compared. The XGBOOST, KNN, and DT models exhibit average efficiency levels and demonstrate approximately the same performance. The scatter plot graph with the test data of the models is presented in Figure 5. The graph displays the predicted values from the predicted data on the x-axis and the actual values on the y-axis, along with the corresponding R^2 -squared values. This visualization offers a visual analysis of how close the actual values are to the predicted values. In the SVM model, which has the best prediction performance, the data points on the scatter plot exhibit a certain pattern, indicating a mostly regular structure. Following this model, the RF, XGBOOST, and KNN models also demonstrate

relatively good data distributions. The DT model shows its algorithmic structure on the graph, while the ANN graph fails to achieve the desired uniformity. In the scatter plot of ANN, the data points tend to concentrate at certain points, often displaying uncertain distributions. This algorithm does not demonstrate the expected efficiency in this study and with this dataset. In the data preprocessing section, it was mentioned that initially there were 15 variables used in the study, but through various analyses, it was reduced to 6 variables. In the analysis of variables, correlation matrix, feature importance, and model results were found to be effective. In the correlation matrix (Fig.4), some data were found to be less relevant to the target variable, and the author emphasized the need for the correlation coefficient to be at least 0.50. Although the 0.50 threshold is not definitive criterion, it is generally preferred as an approach. Additionally, the feature importance of the dataset was also examined. Features may vary depending on the model type and dataset, but a balanced distribution is expected while paying attention to scales. In this study, feature importance plots, which are outputs of the RF method, were prepared for different scenarios that could be crucial in predictions and contribute to understanding their effects. Various combinations of correlation matrix and feature importance plots were tried. However, in determining the variables and obtaining the final results, the variables, which were reduced through correlation matrix-

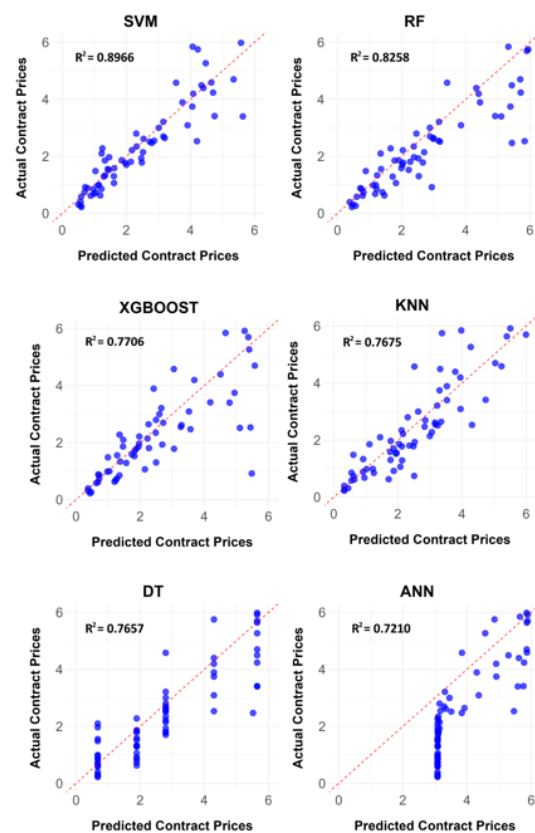


Fig 5. The scatter plots of the models

feature importance analyses, were analyzed individually and with different numbers of variables using machine

learning models. As a result, the feature importance presented in Figure 6 was obtained. According to this, the total floor area of the building and the number of beams are the most important variables, followed by the number of columns and shear walls. Although the lot area and number of building floors have the least impact, the analyses conducted showed that they contributed to the model's performance metrics to some extent.

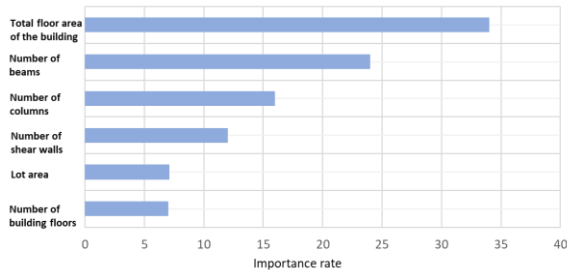


Fig. 6. Feature importance

Conclusion

This study aims to predict the contract prices signed between construction contractors and public authorities in construction tenders. Publicly owned reinforced concrete structures are being investigated for their potential cost in tender. For this purpose, 353 construction projects have been examined, and structural parameters have been collected. Structural parameters include the number of columns, shear walls, beams on all floors, number of building floors, lot area, and total floor area. Each of these parameters has been obtained individually from 353 previously tendered projects. The meaning of each input parameter, correlation matrix, feature importance, and model analyses have been explored. Initially, with 15 variables, the number of variables was reduced to 6 through various data analyses and relationship investigations. All variables have been addressed in the article, considering both samples in the literature and possibilities that could affect the contract price under market conditions.

The incorporation of variables like the number of columns, shear walls, and beams from structural project parameters can be regarded as an innovative illustration for machine learning models employed in public procurement, rendering this study distinctive in this regard. The impact of these variables on the model has been a focal point of the investigation. The quantities of structural elements and the total floor area emerge as dominant features in the machine learning model. Furthermore, it has been found that lot area and building coefficient contribute relatively less to enhancing the predictive model performance. Overall, the study achieves optimal efficiency with all variables considered.

The prediction of contract prices in public procurement utilized six popular algorithms from structural parameters: SVM, ANN, KNN, DT, RF, and XGBoost. When creating the models, a preliminary assessment of the data was conducted in the study background. Outliers were analyzed

using quartile-based analysis. Various data scenarios were explored to determine the most appropriate handling of outliers. The initial dataset of 359 entries was reduced to 353 after preprocessing. Different test-train ratios and parameter optimizations were investigated in the data preprocessing phase. Cleaning and filtering the data, as well as exploring different test-train applications, have improved the model performance in the research. Evaluation of the six prediction models utilized metrics such as R^2 , MAPE, NSE, MAE, and RMSE. Among the machine learning models, the SVM algorithm achieved an R^2 value of 0.8966, while the RF algorithm achieved an R^2 value of 0.8258, making them the most efficient algorithms. While other algorithms showed average performance, they still provided viable solutions. Detailed performance metrics and variable assessments are presented in the paper.

Finally, this study utilized original structural project parameters for contract price estimation in public procurement, which were evaluated and optimized through multiple stages. Different machine learning algorithms were employed and assessed at various stages, with SVM emerging as the most efficient algorithm. Satisfactory performance values were attained, and the model procedures were successfully executed.

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

References

- [1] S.E. Aslay, T. Dede, 3D cost optimization of 3 story RC constructional building using Jaya algorithm, Structures 40 (2022) 803–811. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.055>.
- [2] B. Wang, J. Yuan, K.Z. Ghafour, Research on Construction Cost Estimation Based on Artificial Intelligence Technology, Scalable Computing 22 (2021) 93–104. <https://doi.org/10.12694:/scpe.v22i2.1868>.
- [3] D. Chakraborty, H. Elhegazy, H. Elzarka, L. Gutierrez, A novel construction cost prediction model using hybrid natural and light gradient boosting, Advanced Engineering Informatics 46 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101201>.
- [4] J.A. Ujong, E.M. Mbadike, G.U. Alaneme, Prediction of cost and duration of building construction using artificial neural network, Asian Journal of Civil Engineering 23 (2022) 1117–1139. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00474-4>.

- [5] A.M. Alsugair, K.S. Al-Gahtani, N.M. Alsanabani, A.A. Alabduljabbar, A.S. Almohsen, Artificial Neural Network Model to Predict Final Construction Contract Duration, *Applied Sciences (Switzerland)* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13148078>.
- [6] S. Saeidlou, N. Ghadiminia, A construction cost estimation framework using DNN and validation unit, *Building Research and Information* (2023). <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2196388>.
- [7] D. Car-Pusic, S. Petruseva, V. Zileska Pancovska, Z. Zafirovski, Neural Network-Based Model for Predicting Preliminary Construction Cost as Part of Cost Predicting System, *Advances in Civil Engineering* 2020 (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/8886170>.
- [8] T.Q.D. Pham, T. Le-Hong, X. V. Tran, Efficient estimation and optimization of building costs using machine learning, *International Journal of Construction Management* 23 (2023) 909–921. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1943630>.
- [9] Y. Zhang, S. Fang, RSVRs based on Feature Extraction: A Novel Method for Prediction of Construction Projects' Costs, *KSCE Journal of Civil Engineering* 23 (2019) 1436–1441. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0336-3>.
- [10] M. Badawy, A hybrid approach for a cost estimate of residential buildings in Egypt at the early stage, *Asian Journal of Civil Engineering* 21 (2020) 763–774. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00237-z>.
- [11] G.H. Coffie, C.O. Aigbavboa, W.D. Thwala, Modelling construction completion cost in Ghana public sector building projects, *Asian Journal of Civil Engineering* 20 (2019) 1063–1070. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00165-7>.
- [12] S. Hassim, R. Muniandy, A.H. Alias, P. Abdullah, Construction tender price estimation standardization (TPES) in Malaysia: Modeling using fuzzy neural network, *Engineering, Construction and Architectural Management* 25 (2018) 443–457. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2016-0215>.
- [13] M. Sayed, M. Abdel-Hamid, K. El-Dash, Improving cost estimation in construction projects, *International Journal of Construction Management* 23 (2023) 135–143. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1853657>.
- [14] N. Dang-Trinh, P. Duc-Thang, T. Nguyen-Ngoc Cuong, T. Duc-Hoc, Machine learning models for estimating preliminary factory construction cost: case study in Southern Vietnam, *International Journal of Construction Management* 23 (2023) 2879–2887. <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2106043>.
- [15] F. Uysal, R. Sonmez, Bootstrap Aggregated Case-Based Reasoning Method for Conceptual Cost Estimation, *Buildings* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13030651>.
- [16] Z.H. Ali, A.M. Burhan, M. Kassim, Z. Al-Khafaji, Developing an Integrative Data Intelligence Model for Construction Cost Estimation, *Complexity* 2022 (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/4285328>.
- [17] W. Alfaggi, S. Naimi, An Optimal Cost Estimation Practices of Fuzzy AHP for Building Construction Projects in Libya, *Civil Engineering Journal (Iran)* 8 (2022) 1194–1204. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-06-08>.
- [18] R. Wang, V. Asghari, C.M. Cheung, S.C. Hsu, C.J. Lee, Assessing effects of economic factors on construction cost estimation using deep neural networks, *Autom Constr* 134 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104080>.
- [19] Z.H. Ali, A.M. Burhan, Hybrid machine learning approach for construction cost estimation: an evaluation of extreme gradient boosting model, *Asian Journal of Civil Engineering* 24 (2023) 2427–2442. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00651-z>.
- [20] Y. Elfahham, Estimation and prediction of construction cost index using neural networks, time series, and regression, *Alexandria Engineering Journal* 58 (2019) 499–506. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.002>.
- [21] F. Antoniou, G. Aretoulis, D. Giannoulakis, D. Konstantinidis, Cost and Material Quantities Prediction Models for the Construction of Underground Metro Stations, *Buildings* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13020382>.
- [22] B. Mohamed, O. Moselhi, Conceptual estimation of construction duration and cost of public highway project, *Journal of Information Technology in Construction* 27 (2022) 595–618. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.029>.
- [23] A. Mahmoodzadeh, H.R. Nejati, M. Mohammadi, Optimized machine learning modelling for predicting the construction cost and duration of tunnelling projects, *Autom Constr* 139 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104305>.
- [24] M. Kovacevic, N. Ivanišević, P. Petronijević, V. Despotovic, Construction cost estimation of reinforced and prestressed concrete bridges using machine learning, *Gradjevinar* 73 (2021) 1–13. <https://doi.org/10.14256/JCE.2738.2019>.
- [25] K. Koc, A.P. Gurgun, Causal Relationships of Readability Risks in Construction Contracts, *Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers* 33 (2022) 11823–11846. <https://doi.org/10.18400/tekderg.962928>.
- [26] S.E. Aslay, T. Dede, Reduce the construction cost of a 7-story RC public building with metaheuristic algorithms, *Architectural Engineering and Design Management*

- (2023).
<https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2195612>.
- [27] A. Asuncion, D. Newman, UCI machine learning repository, (2007).
- [28] A. Mohammed, B. Alshemosi, H. Saad, H. Alsaad, Cost Estimation Process for Construction Residential Projects by Using Multifactor Linear Regression Technique, *International Journal of Science and Research* 6 (2015) 2319–7064. <https://doi.org/10.21275/ART20174128>.
- [29] M.H. Rafiei, H. Adeli, Novel Machine-Learning Model for Estimating Construction Costs Considering Economic Variables and Indexes, *J Constr Eng Manag* 144 (2018). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001570](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001570).
- [30] Elektronik Kamu Alımları Platformu, <https://ekap.kik.gov.tr/EKAP/Ortak/IhaleArama/index.html>, (n.d.).
- [31] M.H. Rafiei, H. Adeli, Novel Machine-Learning Model for Estimating Construction Costs Considering Economic Variables and Indexes, *J Constr Eng Manag* 144 (2018). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001570](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001570).
- [32] S. Saeidlou, N. Ghadiminia, A construction cost estimation framework using DNN and validation unit, *Building Research and Information* 52 (2024) 38–48. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2196388>.
- [33] V.N. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer New York, New York, NY, 1995. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0>.
- [34] K. Koc, Ö. Ekmekcioğlu, A.P. Gurgun, Accident prediction in construction using hybrid wavelet-machine learning, *Autom Constr* 133 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103987>.
- [35] O.M. Katipoğlu, Predicting hydrological droughts using ERA 5 reanalysis data and wavelet-based soft computing techniques, *Environ Earth Sci* 82 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11280-9>.
- [36] Ş. Emeç, D. Tekin, Housing Demand Forecasting with Machine Learning Methods, *Erzincan University Journal of Science and Technology* 15 (2022) 36–52. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.1199535>.
- [37] L. Breiman, J.H. Friedman, R.A. Olshen, C.J. Stone, *Classification And Regression Trees*, Routledge, 1984. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>.
- [38] Emre Mumyakmaz, Prediction of reinforced concrete column capacities by machine learning, Master Thesis, ESKİŞEHİR TECHNICAL UNIVERSITY, INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS, 2023.
- [39] L. Breiman, Random Forests, *Mach Learn* 45 (2001) 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- [40] R. Özdemir, M. Turanlı, Comparison of machine learning classification algorithms for purchasing forecast, *Jouurnal of Life Economics* 8 (2021) 59–68. <https://doi.org/10.15637/jlecon.8.1.06>.
- [41] T. Chen, C. Guestrin, XGBoost, in: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, ACM, New York, NY, USA, 2016: pp. 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
- [42] E.E. Başakın, Ö. Ekmekcioğlu, M. Özger, Developing a novel approach for missing data imputation of solar radiation: A hybrid differential evolution algorithm based eXtreme gradient boosting model, *Energy Convers Manag* 280 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116780>.
- [43] Muhammet Emir Kılıç, Estimation and performance analysis of rough construction costs with machine learning methods at the pre-design stage of Industrial buildings, Master Thesis, 2021.
- [44] Evelyn Fix, Joseph Lawson Hodges, *Discriminatory Analysis, Nonparametric Discrimination: Consistency Properties*, Technical Report 4, USAF School of Aviation Medicine, Randolph Field. (1951).
- [45] Vehbi Hakan Sayan, *Football Player Performance Analysis Using Machine Learning Techniques*, Master Thesis, Burdur University, 2023.
- [46] W.S. McCulloch, W. Pitts, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bull Math Biophys* 5 (1943) 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>.
- [47] E.E. Başakın, Ö. Ekmekcioğlu, H. Çıtakoğlu, M. Özger, A new insight to the wind speed forecasting: robust multi-stage ensemble soft computing approach based on pre-processing uncertainty assessment, *Neural Comput Appl* 34 (2022) 783–812. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06424-6>.



Deprem yalıtımlı ve ankastre temelli betonarme yapıların performansının TBDY-2018 kapsamında kıyaslamalı olarak değerlendirmesi

Comparative evaluation of seismically isolated buildings and fixed base buildings in accordance with the TSDC-2018

Cem Yenidoğan^{1*}

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, cem.yenidoğan@yildiz.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0219-6302>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Temmuz 2024
Revizyon 8 Eylül 2024
Kabul 23 Eylül 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Deprem yalıtımı, TBDY-2018, Betonarme Yapılar, Kahramanmaraş Depremleri, Kayıt Seçimi ve Ölçeklendirmesi, LRB, Kayıcı Yalıtım Birimi.

ÖZ

Deprem yalıtımı, Türkiye'de yeni inşa edilecek ve mevcut binaların güçlendirilmesinde geleneksel yöntemlere alternatif olarak Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018 kapsamında sunulan yenilikçi bir teknolojidir. Bu çalışma kapsamında, konut tipi yapılarda kullanılacak olan deprem yalıtım sisteminin tasarım parametreleri deprem yer hareketinin özelliklerine bağlı olarak yarattığı etkiler zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan elastik ötesi analizler yardımıyla incelenmiştir. Taban yalıtım sisteminin üzerinde yer alan üst yapı aynı oturum planı düşünülerek ankastre temelli olarak tasarlanıp betonarme binalar için yönetmelikte öngörülen koşulların sağlandığı kabulü üzerinden kıyaslanmıştır. Zaman tanım alanında elastik ötesi analizlerde kullanılacak deprem kaydı sayısı, TBDY-2018'e göre belirlenen periyot aralığında ölçeklendirilmiştir. Analizlerde kullanılan taban yalıtımlı ve ankastre temelli binanın yapısal boyutlandırmasında birinci modun hakim olduğu düşünülerek tek serbestlik dereceli sistem için seçilen 11 çift deprem kaydı altında incelenmiştir. Deprem yalıtım sisteminin tasarımında kullanılan doğrusal olmayan yük-yerdeğiştirme çevrimlerinin zarfı nominal parametrelerine göre belirlenmiştir. Deprem yalıtımlı binanın üst yapısı rijit olarak kabul edilmiş ve tanımlanan diferansiyel denklem takımları çözümlenerek cihazların yerdeğiştirme kapasitesi ve üst yapının tasarımında kullanılacak olan taban kesme kuvveti belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre deprem yalıtım sisteminin üst yapıya etkilenen deprem kuvveti ve göreceli kat ötelemesi talebinde ciddi oranda bir azalış sağladığı gözlemlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 July 2024
Received in revised form 8 September 2024
Accepted 23 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Seismic Isolation, TSDC-2018, Reinforced Concrete Structures, Kahramanmaraş Earthquakes, Selection and Scaling of Earthquake Records, LRB, Sliding Isolation Unit

Doi: 10.24012/dumf.1522816

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Seismic isolation is an innovative design and retrofit method presented as an alternative to conventional design methods in Turkey per TSDC-2018. The effects of design parameters and the response characteristics of isolated and fixed-base residential buildings have been examined through nonlinear response history analysis. The superstructure of the base isolation system has the same plan layout as the fixed-base RC Moment-Resisting-Frame (MRF) structure. A comparison of the seismic performance of base-isolated and fixed-base MRF structures was done by assuming that the requirements stipulated in the seismic design code met for reinforced concrete buildings. The number of earthquake records for the nonlinear response history analysis is determined following TSDC-2018 provisions, and the selection and scaling procedure is applied within the specified period range. Considering that the base-isolated and fixed-base counterparts are first-mode dominated structures, the nonlinear Single-Degree-of-Freedom (SDOF) system is analyzed under a selected set of 11 pairs of earthquake records. The backbone curve of the seismic isolation system is established based on the nominal parameters of the isolation units in compliance with the practical applications. The superstructure of the seismically isolated building is assumed to be rigid, and the displacement capacity of the isolation devices and the base shear force were calculated by solving the suite of differential equations. Analysis results indicate that the seismic isolation system provides a considerable reduction in the transferred earthquake force acting on the superstructure and the deformation demands by concentrating it in the isolation interface.

Giriş

Dünya nüfusunun önemli bir oranı deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde yaşamaktadır. Her yıl farklı büyüklük ve özelliklerde meydana gelen doğal afetler arasında depremler yaratmış olduğu kayıplar açısından geniş bir etki alanıyla büyük can ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Türkiye aktif deprem kuşağında yer alan bir ülke olarak 1939 Erzincan depreminden 2023 Kahramanmaraş depremlerine kadar geçen süreçte büyük can kayıpları yaşamıştır[1],[2]. Deprem yönetmeliklerinin güncellenmesi ve revize edilmesinde bilimsel araştırma çıktılarının yanında, Türkiye’de meydana gelen 1999 Kocaeli, 2011 Van Depremi ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra gerçekleştirilen saha incelemelerinin katkısı önemli olmuştur [3]-[5]. Saha gözlemleri neticesinde depremlerden sonra uygulamada yaşanan sıkıntılar tanımlanması, tasarım ve analiz yöntemlerinin gözden geçirilerek yapısal güvenliğin hedeflenen seviyede olup olmadığının incelenmesi gerekli konu başlıkları arasında gelmektedir. Deprem yönetmelikleri 1940 yılından bu yana uzmanlardan oluşan komiteler tarafından günümüze kadar belirli aralıklarla gözden geçirilip güncellenerek farklı isimler altında yayınlanmıştır. Yönetmeliklerde ortaya çıkan değişimin nedenleri arasında bilgisayar teknolojisinde ve malzeme biliminde hızlı gelişim, inşaat endüstrinin üretim kapasitesinde ortaya çıkan artış ve deprem mühendisliğine yönelik bilgi birikimi ve yetişmiş eleman sayısının artması önemli rol oynamıştır. Dolayısıyla deprem yönetmelikleri artan bilgi birikimimiz ve teknolojinin yardımıyla deprem bölgesinde yaşayan yüzbinlerce kişinin hayatının kurtarılmasında etkin rol oynarken mühendislik muhakemesini temel alan yol gösterici bir araç olmuştur.

Yeni teknolojilerin inşaat endüstrisine başlıca yansımaları arasında deprem koruma sistemleriyle donatılmış yapılar, yapı-sağlığı izleme sistemleri, acil müdahale sistemleri ve erken uyarı sistemleri sayılabilir. Deprem riskinin azaltılmasına yönelik belirtilen stratejilerin geliştirilmesi ve afet yönetimi açısından bu teknolojilerin bütüncül kullanımı depreme dirençli şehirler oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Paylaşılan başlıklar arasında depreme dirençli şehirlerin oluşturulması ve bölge halkının can güvenliğinin temin edilmesinde konut tipi yapılarda yapısal performansın nesnel bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Mevcut yapı envanterinde yer alan binaların yaşlanması deprem riskine yönelik çözümler açısından karşımıza iki seçenek sunmaktadır. Bunlardan bir tanesi konutların yıkılarak kentsel dönüşüm yasasıyla uyumlu bir şekilde yenilenmesi diğeryse maliyet açısından uygun koşulların ortaya çıkması durumunda yapıların güçlendirilmesinin tercih edilmesidir. Kentsel dönüşüm sürecinde konutlarda yapı ömrü boyunca hedeflenen performans kriterleri yapı güvenliği ve maliyet açısından değerlendirilirken yenilikçi teknolojiler ve malzemelerle donatılmış binaların göreceli olarak getireceği ek maliyetlerin sağlayacağı üstün performans hem güçlendirme

düşünülen yapılarda hem de yeni inşa edilecek binalar için göz ardı edilemez.

Bu çalışma kapsamında deprem yalıtımlı konut tipi binalarının performansı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018[6] kapsamında değerlendirilmiştir. Yürütülen çalışmada öncelikle geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş konut tipi yapıların deprem sırasında göstereceği genel davranışı anlamak ve talep parametrelerini doğrusal olmayan analizler yardımıyla değerlendirilmiştir. yanında aynı yerde inşa edilmesi planlanan deprem yalıtım teknolojisiyle donatılmış bir binanın performansı kıyaslanmıştır.

Çalışmanın kapsamında depreme dayanıklı yapı tasarımı, Türk Deprem yönetmeliklerinde kronolojik olarak ortaya çıkan değişimler, yeni tasarım felsefesi ve son yönetmelikle uyumlu tasarlanan depreme dayanıklı geleneksel yapı sistemleri için performans düzeyleri paylaşılmıştır. Deprem yalıtım teknolojisi açıklandıktan sonra ankastre temelli geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş betonarme binalar ve deprem yalıtımlı binaların tasarım kuralları, ve sağlaması gerekli olan koşullar tanımlanmıştır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde en büyük deprem yer hareketi düzeyini aşan bir bölgede (AFAD-deprem izleme istasyonu kayıtları temel alınarak seçim gerçekleştirilmiştir) inşa edilecek olan konut tipi yapının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Kahramanmaraş depremleri altında araştırmada kullanılan inşaat alanı için deprem yalıtımlı sistemlerin göstermiş olduğu performans seçilen deprem kayıtlarına göre elde edilen yerdeğiştirme limitlerini aşmış olmadığı incelenmiştir.

Türk Bina Deprem Yönetmeliklerinin değişim süreci ve TBDY-2018

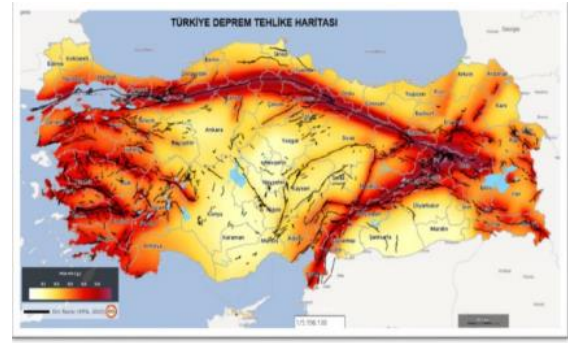
Son 60 yıllık süreçte Türk Bina Deprem Yönetmeliklerinde yapısal tasarım ilkeleri açısından önemli değişiklikler dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki 1971 San Fernando depreminden sonra betonarme binalar için can güvenliği hedeflerini sağlamak için sünek tasarımın uygulanmasıdır. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-75 (ABYYHY-75)[7] kapsamında, sünek tasarım ilkeleri yansıtılarak günümüzün modern yönetmeliklerinin ve araştırma projelerinin yer verdiği yapısal olmayan elemanlar dahil birçok önemli konuya kısaca değinilmiştir. 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremleri sonrasında dünyada referans alınan yönetmelikler arasında yer alan Amerikan[8],[9] ve Japon[10] yönetmeliklerinde saha gözlemlerinden elde edilen bulgular dahilinde çelik yapılar, ahşap yapılar ve betonarme yapıların tasarım ve analizinde ciddi değişikliklere gidilmiştir [11],[12]. Türkiye 1975 deprem yönetmeliğinde temel alınan toptan göçmenin engellenmesi hedeflerinin 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip deprem yer hareketi seviyesinde onarım maliyetinin ekonomik düzeylerde olmadığı, 1999 Gölcük depreminde toptan göçmenin önlenmesine rağmen birçok binanın can güvenliği performans hedeflerini aşarak ileri hasar seviyesine

ulaştığı saha gözlemlerinde belirlenmiştir. Sadece toptan göçmenin engellenmesi hedefi, deprem sonrasında ileri hasar seviyesine ulaşan yapıların yıkılmasıyla ekonomik açıdan olumsuzluklar yaratmıştır. 2000 yılında yayınlanan BSL-2000 Japon Bina Şartnamesinde[10] ve ATC-40[13] sonrasında kullanımda olan Amerikan yönetmeliklerinde [8],[9] bu durumu ortadan kaldırmak için ek önlemlerin alınması için çalışmalar yürütülmüştür. Diğer bir deyişle, betonarme binalar dahil farklı tipte birçok yapısal sistem için can güvenliği performans hedefi sağlanırken ekonomik kayıpları azaltmak amacıyla yapısal onarımın uygulanabilmesi bu ülkelerin yönetmeliklerinde hedeflenmiştir. Benzer şekilde Türkiye Bina Deprem yönetmeliklerinde dünyada meydana gelmiş önemli depremlerden sonra saha gözlemlerine dayalı alınan dersler ve bilimsel araştırmalar kapsamında can güvenliğinin sağlanması yanında 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip depremler altında hasarların onarılabilir seviyelerde olmasına yönelik koşulların yerine getirilmesi amacıyla bir dizi değişiklik yapılmıştır[14],[15]. Bu açıdan bakıldığında 1998 Deprem Yönetmeliğinin kullanıma girmesiyle birlikte yönetmelikte yer alan asgari tasarım koşullarının yerine getirilmesi, hazır beton kullanımının yaygınlaşması, ve doğru boyutlandırmanın geometriye uygun yürütüldüğü projelerin uygulanmasının yaygınlaşmasıyla birlikte bina performans beklentileri açısından hasargörebilirlik çalışmalarında ülkemizde birçok araştırmacı tarafından 2000 yılı depreme dayanıklı tasarım açısından milat olarak kabul edilmektedir.

Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de yapılan son revizyonlar düşünüldüğünde geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş yapılarda kapasite tasarım ilkelerine uygun tasarım yanında önemli değişiklikler hayata geçirilmiştir[16],[17]. Yapılan değişiklikler arasında deprem tehlike haritalarının güncellenip tasarımda kullanılan deprem yer hareketi seviyesine uygun parametrelerin bir web uygulaması üzerinden sunulması, dayanıma göre tasarım kuralları yanında şekil değiştirmeye göre tasarımın yeni inşa edilecek yapılar için de yönetmelikte alternatif kullanımı yer almaktadır. Farklı deprem yer hareketi seviyelerini dikkate alacak şekilde yapısal performansın değerlendirilmesi için ihtiyaç duyulan tasarım spektrumları, güncelenen diri fay haritalarıyla uyumlu[18] 2018 Deprem Tehlike Haritasından[19] elde edilmiştir (Şekil 1). Detaylı geoteknik incelemenin yapıldığı zemin sınıfları dışında deprem yer hareketi seviyelerine göre elde edilen spektrumlarda yerel zemin koşullarının etkisi Amerikan yönetmeliğinde[9] olduğu gibi büyütme katsayılarıyla bulunmaktadır. Ayrıca özel yapıların tasarımında ihtiyaç duyulabilecek sabit deplasman bölgesinin, tasarımda dikkate alınması ve düşey tasarım spektrumunun tanımlanarak hesaplara dahil edilmesi yönetmelik kapsamında olan değişiklikler arasındadır.

Yürürlükte olan TBDY-2018'de kullanılan tasarım spektrumu daha önce 1999 deprem tehlike haritasına [20] göre beş deprem bölgesi için sadece etkin en büyük

yer ivmesinin tanımlandığı ve zemin sınıfına bağlı değişen 50 yılda bir aşılma olasılığı %10 olan tek bir deprem yer hareketi seviyesi için oluşturulan tasarım spektrumuyla kıyaslandığında önemli farklılıklar içermektedir. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-2007(ABYYHY-2007)'de yer alan beş deprem bölgesinin tanımlanması ve uzun periyotlu yapılar için önemli olan sabit deplasman bölgesinin dikkate alınmaması ciddi sıkıntılar yaratmıştır. Bu tip özel durumlarda mühendisler yabancı yönetmeliklere veya sahaya özel spektrum elde edilmesi yöntemine başvurmuştur. TBDY-2018 yönetmeliğinde sabit hız bölgesine ek olarak sabit deplasman bölgesinin yer alması uzun periyotlu yapıların değerlendirilmesi ve yönetmelikte tasarım spektrumuyla uyumlu olduğu bölgeleri gözleme olanağı sunmuştur. En büyük yer ivmesi yerine spektral girdi parametreleri ve büyütme katsayıları yardımıyla üç farklı bölgenin tanımlandığı deprem yer hareketi düzeyine göre tasarım spektrumu elde edilmektedir.



Şekil 1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası [19]

TBDY-2018'de özel tasarım yaklaşımları altında değerlendirilmesi gerekli olan yüksek yapılar ve deprem yalıtımlı binalar için farklı deprem yer hareketi seviyelerini temsil eden dört farklı tekrar periyoduna sahip tasarımda kullanılacak spektrumlar tanımlanarak dayanıma göre tasarım ve şekil değiştirmeye göre tasarım ilkelerine göre ayrı ayrı performans hedefleri sunulmuştur.

Depreme dayanıklı yapıların inşa edilmesinde kapasite tasarım ilkelerinin yönetmelik kurallarına göre uygulanması gerekmektedir. Yönetmelikte tanımlanan düzensizliklerin mümkün olduğu en düşük seviyelerde tutulması için planda ve düşeyde uygun eleman düzenlemesine sahip bir tasarımın temel alınarak elemanların boyutlandırılması ve kapasite tasarım ilkeleriyle uyumlu ekonomik çözümler standartlarda yer alan asgari koşulların yerine getirilmesi sağlanabilmektedir. Geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş binalarda hafif şiddette sıklıkla meydana gelen depremlerde binaların yapısal ve yapısal olmayan elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, nadir görülen şiddetli depremlerde ise can güvenliği sağlanırken kalıcı yapısal hasarın onarılabilir düzeyde kalması için tasarımda hasarın sınırlandırılması hedeflenmektedir. Şekil değiştirmeye göre tasarım yaklaşımları arasında zaman tanım

alanında dinamik analizlerin tercih edilmesi durumunda, TBDY-2018'e göre ortalama değerlerin kullanılması koşulu için seçilen deprem kaydı sayısı onbire yükseltilecek kayıttan kayıta gözlemlenecek farklılıkların tasarıma yansıtılması amaçlanmıştır.

Yürürlükte olan TBDY-2018 kapsamında ilk defa uzun periyotlu yüksek yapılar ve deprem yalıtımlı yapıların ayrı bölümler olarak yer almıştır. Yüksek binaların deprem yalıtımlı yapıların tasarımı için sunulan yönetmelik şartları sırasıyla Bölüm 13 ve Bölüm 14'te tanımlanmıştır. Bu çalışmada incelenen deprem yalıtımlı konut binalarının tasarımı, analizi ve test protokollerine yönelik kurallar TBDY-2018'in 14. Bölümünde yer alan koşullar dikkate alınarak zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

Deprem yalıtım teknolojisi

Günümüzde mühendislik uygulamalarında kullanılan inşaat yapım teknikleri, malzeme bilimi ve bilgisayar teknolojisinde meydana gelen hızlı değişim sonrası daha önce yenilikçi bir teknoloji olarak nitelendirilen deprem yalıtımı olgun bir teknolojiye evrilmiştir. Deprem yalıtım teknolojisi ve enerji sönümleyici cihazlar teknolojinin getirmiş olduğu olanakları inşaat endüstrisinde etkin bir şekilde gözler önüne sermiştir. Konut, işyeri, okullar, hastane, veri merkezi, afet yönetim binaları, havalimanı terminalleri, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) depolama tankları, karayolu ve demiryolu köprüleri ve stadyumlar, gibi bir çok yeni inşa edilecek yapısal sisteminin deprem performansının artırılmasında ve performans değerlendirmesi sonucu güçlendirilmesine karar verilen binalarda deprem yalıtımı kullanılabilir [21]-[23]. Yüksek performans hedefinin koyulduğu hastane vb. özel yapılarda geleneksel inşa yöntemleriyle kıyaslandığında yalıtım teknolojisi uygulama kolaylığı ve yapısal güvenlik açısından tasarımcıya birçok avantaj sunmaktadır. Yapının servis ömrü boyunca Türkiye gibi yüzölçümünün %90'ından fazlasının aktif deprem kuşağında yer aldığı bir ülkede kayıpların azaltılması ve deprem dirençli mamur çevrenin yaratılmasında pasif kontrol sistemleri önemli ekonomik kazanımlar sağlamaktadır. 1960'lardan bu yana araştırma projelerinde farklı tipte deprem yalıtım sistemlerinin davranışı araştırmacılar tarafından ölçeklendirilmiş ve gerçek ölçekli testler yardımıyla gözlemlenmiş ve yapısal davranışı temsil eden sayısal modelleme yöntemleri geliştirilmiştir [24]-[28].

Deprem yalıtım teknolojisinin yapısal performans üzerinde olumlu etkileri Japonya, Amerika, İtalya ve Yeni Zelanda gibi yalıtım teknolojisinin geliştirildiği ve uygulamada öncü olan ülkelerde yürütülen araştırmalardan ve depremlerden sonra elde edilen saha bulguları çerçevesinde somut örneklerle ispatlanmıştır [29]-[31]. İnşaat endüstrisi 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerine kadar yalıtımlı bina sayıları incelendiğinde yenilikçi bir inşaat tasarım yöntemi olarak sunulan deprem yalıtım teknolojisine mesafeli bir duruş göstermiştir. Deprem mühendisliği açısından önemli etkileri olan bu iki depremden sonra yalıtım teknolojisinin üstün performansının

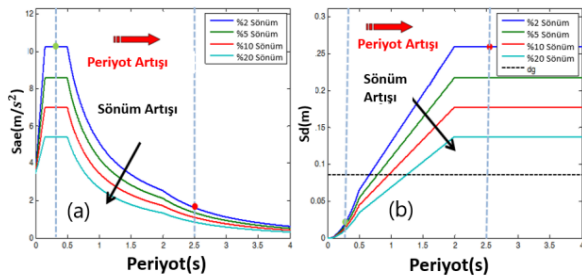
kanıtlanmasıyla yalıtımlı bina sayısı artmıştır. Deprem yalıtımlı bina sayısında benzer bir etki İtalya'da 2009 yılında meydana gelen Laquila depremi [32] ve Yeni Zelanda'da meydana gelen 2011 Christchurch depreminden [33] sonra gözlemlenmiştir. Yalıtım teknolojisinde öncü ülkeler arasında olan Japonya, deprem yalıtım sistemlerinin sadece özel tesislerde değil aynı zamanda konut tipi yapılarda da kullanımını teşvik etmek için hazırlanan onaylı kataloglar ve sıkı bir denetim mekanizmasıyla güvenlikten taviz vermeden prosedürleri hızlandırılması sonucunda artan konut uygulamalarıyla birlikte dünyada en çok deprem yalıtımlı konutun bulunduğu ülke haline dönüşmüştür.

Deprem yalıtım teknolojisi Türkiye'de ağırlıklı olarak yeni inşa edilen köprüler, havalimanı terminalleri, hastaneler, konutlar ve veri merkezlerinde kullanılmıştır. Türkiye'de ilk deprem yalıtımlı bina uygulaması 17 Ağustos 1999 Gölcük ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinden sonra bir hastane binasında uygulanmıştır. 2011 Van depremi sonrasında hastane tipi kritik yapıların sadece yapısal sistemlerinin hasar seviyesinin kısıtlı tutulmasının işlevselliğinin korunması için yeterli olmadığı anlaşılmıştır [34]. Sağlık Bakanlığının 2013 Genelgesi [35] sonrasında ise 100 yatak kapasitesi üzeri olan, 2007 Afet Bölgelerinde Yapılacak olan Yapılar Hakkında Yönetmelik kapsamında birinci ve ikinci deprem bölgesinde yer alan sağlık tesislerinin inşasında deprem yalıtımının kullanılması zorunlu hale getirilmiştir. TBDY-2018'in taslak çalışmaları sırasında Yenidoğan ve Erdik dünyada kabul gören dört farklı yönetmeliği kullanarak tek modlu statik analizler açısından bir karşılaştırma yapmıştır [22]. 2018 yılından sonra ise kat ivmeleriyle ilgili değişikliklerle birlikte deprem yalıtımlı binaların tasarımında referans kaynak olarak TBDY-2018 kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler ışığında dünyada yer alan sismik yalıtımlı binalar arasında Türkiye'de yer alan Dr. Asaf Ataseven ve İstanbul'da inşa edilen Başakşehir Çam ve Sakura Şehir Hastanesi Kompleksleri, dünyanın en büyük taban yalıtımlı güçlendirilmiş ve yeni inşa edilmiş deprem yalıtımlı yapılarıdır [21]. 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonrasında yer yer sınırlı sayıda konutlarda kullanımına yönelik bir talep oluşmuştur. Deprem yalıtım birimi ve yapısal elemanların boyutlarının değişimi, yalıtım cihazlarının mecburi testleri dikkate alındığında tasarımcının yetkinliği ve projenin kısıtlarına göre %3-%12 arasında değişen ek maliyetler ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca deprem yalıtımı konusunda yetişmiş mühendis sayısı, üniversitelerde deprem yalıtımı konusunda yetişmiş araştırmacı sayısının az olmasından dolayı Türkiye'de hastane binalarına göre konutlarda kullanımı kısıtlı kalmıştır [21].

2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrasında Afet Bölgesi ilan edilen 11 ilin sınırları içerisinde yer alan 12 deprem yalıtımlı hastanenin göstermiş olduğu yapısal performans ulusal ve uluslararası camida büyük bir merak uyandırmıştır. Afet bölgesinde yer alan ve 2019 yılından sonra inşa edilen 100 yatak üzerinde kapasiteye sahip belirtilen deprem yalıtımlı hastaneler

TBDY-2018'de yer alan asgari kriterleri sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu açıdan bakıldığında özel yapı sınıfına giren deprem yalıtımlı hastaneler kendine has özellikleri olan 2023 Kahramanmaraş depremlerinin kayıtları (Yönelim, atım, yüksek yatay ve düşey yer ivmesi vb.) altında test edilmiştir.

Deprem yalıtım sistemi genel olarak altyapı ve üst yapı arasında oluşturulan yalıtım katmanı yardımıyla yapısal sistemin dinamik davranışında meydana gelen değişikliklerle birlikte yapılara etkileyecek deprem kuvvetlerinin azaltılmasını ve yer değiştirme taleplerinin üst yapı yerine yalıtım birimleri tarafından karşılanmasını amaçlamaktadır. Diğer bir deyişle yapısal olmayan elemanlar için önemli olan parametrelerden göreceli kat ötelemeleri ve kat ivmeleri tasarım depremi seviyesinde azaltılmaktadır. Deprem yalıtım sistemi yardımıyla hedeflenen bu olumlu etki ivme ve deplasman tasarım spektrumları kullanılarak gösterilmiştir. Şekil 2a'da yer alan grafik farklı sönüm oranlarında spektral ivme (S_{ae}) değerlerinde ve Şekil 2b'de yer alan spektral deplasman (S_d) değerlerinde meydana gelen değişikliği göstermektedir. Ortaya çıkan değişim ivmelerde ve deplasman talep parametrelerinde azalma neden olmaktadır.



Şekil 2. Deprem yalıtımının dinamik davranış açısından kazanımlarının grafiksel gösterimi[21], [24]

Türk bina deprem yönetmeliğinde (TBDY-2018) yalıtım sistemi ve yalıtım birimlerinin binanın tabanında kullanımıyla ilgili asgari şartlar tanımlanmıştır. Deprem yalıtımlı alçak (1-3 kat) ve orta yüksekliğe (4-8 kat) sahip konut yapılarında geleneksel binalara göre yalıtım periyodu 2-4 katı aralığında değişimler gösterebilmekte ve taban kesme kuvvetinde ve kat ivmelerinde ortaya çıkacak büyütme oranlarında önemli azalmalara neden olmaktadır.

Deprem yalıtımlı bir yapının tasarımında en önemli unsurlardan bir tanesi hedeflenen performans seviyesi ve bu hedefe yönelik seçilecek olan yalıtım sisteminin yer değiştirme talepleri altında kararlı bir davranış göstermesidir. Tasarım sırasında hesaplanan yer değiştirme talepleri yapının sismik boşluk olarak ifade edilen ve serbestçe hareket etmesi için gerekli olan asgari mesafeden yola çıkılarak bulunmalıdır. Bu değer yalıtım biriminin altında kalan altyapı sisteminin elemanlarına aktarılacak kesme kuvveti ve yalıtım birimlerinin geometrisine göre değişmektedir. Bu bağlamda, deprem yalıtımlı yapılarda hata oranının en aza indirilmesi ve dinamik davranışın yalıtım birimleri açısından gözlemlenerek istenilen kaliteli üretim hedeflerinin sağlanması için geleneksel yöntemlere

göre daha farklı bir test prosedürü uygulanmaktadır. Taban yalıtımlı binaların analizi, tasarımı ve test protokollerinin yer verildiği TBDY-2018'in 14. Bölümü hazırlanırken EN-15129 [36], EN-1337[37] ve ASCE/SEI 7-10'da[8]yer alan kurallar Türkiye inşaat pratiğine göre uyarlanmıştır. Deprem yalıtımlı yapıların tasarımı ve analizinde kullanılan Eurocode 8[38]'de TBDY-2018 yönetmelik çalışmaları sırasından detaylı olarak incelenmiştir.

Yapısal analiz modelleri

Yapıların deprem risk durumlarının tespit edilmesi amacıyla, deprem tehlikesiyle uyumlu olacak şekilde yapıların deprem performansının doğrusal veya doğrusal olmayan yöntemlerle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında yapısal performansın artırılması için uygulanan deprem yalıtımlı bina ve geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş betonarme moment aktaran çerçeve olmak üzere iki farklı yapısal sistem yürütülen analizlerle kıyaslanmıştır. Bu tip bir kıyaslamaya gidilmesinin ana nedenlerinden bir tanesi 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra yazar tarafından gerçekleştirilen saha incelemelerinde perde duvar içermeyen moment aktaran betonarme çerçeve sistemlerin yüksek deprem talep parametreleri altında göçmesi veya göçmenin önlenmesi performans düzeyine erişmiş olmasından kaynaklanmaktadır[3]. Bu açıdan bakıldığında yeni inşa edilecek veya mevcut bir binanın güçlendirilmesinde yenilikçi teknolojilerin kullanımıyla deneyimlenecek kazanımlar doğrusal olmayan yöntemlerle araştırılmıştır.

Değerlendirilecek olan iki farklı tip konut yapısından betonarme ankastre temelli olarak tasarlanacak yapısal sistem betonarme moment aktaran çerçeve olarak seçilmiştir. İkinci yapıysa yenilikçi teknolojilerin yapısal performans üzerinde etkisini anlamak ve uygulama sayısının artışı teşvik etmek amacıyla konut yapılarında deprem yalıtımlı betonarme moment aktaran çerçeve sistem olması tercih edilmiştir. Binaların deprem sırasında düşey ve yatay yükler altında davranışını etkileyen birçok etken ve belirsizlikler (deprem kaynak mekanizması özellikleri, ivme değerlerinin değişimi, zemin büyütmesi, hasar dağılımı vb.) mevcuttur. Deprem sırasında deprem kayıtlarının içeriği üzerinde kaynak özelliklerinin yaratacağı etkiler, binanın lokasyonunda yer alan jeolojik formasyonlar ve geoteknik koşullar ve yapısal sistemin mimarisi sonucu dikte edilen özellikleri binanın yapısal sisteminin tasarımının karmaşıklık düzeyine bağlı olarak değişen oranlarda bu belirsizlikleri arttırmaktadır. Bu açıdan her iki sistemin temel özellikleri TBDY-2018'de yer alan koşullara göre simetrik, düzensizlik içermeyecek şekilde oluşturulmuştur. Her iki sistemin özellikleri kısaca aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

Betonarme moment aktaran çerçeve

Türkiye'de yer alan bina stoğunun büyük bir oranı geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş olan ankastre temelli yapılardan oluşmaktadır. Geleneksel inşaat

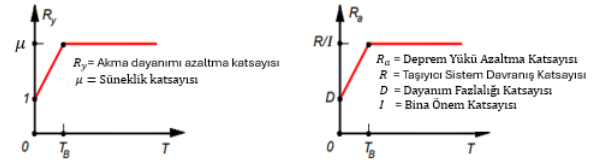
yapım tekniğinden kastedilen, yapı ve üst yapı yüklerinin zemine aktarıldığı temel sisteminin arasında herhangi bir ara yüzey elemanın yer almadığı ve sistem tarafından oluşturulan transfer mekanizması ile doğrudan bir yük aktarımının gerçekleştiği sistemlerden bahsedilmektedir. Yapılarda deprem talep parametreleri dikkate alınarak depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesine göre yapısal hasarın yapı elemanlarının belirlenen özel bölgelerinde oluşması hedeflenmektedir. Konut tipi yapılar geleneksel yöntemlere göre tasarlanarak analiz edilmesi durumunda 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ve 475 yıl dönüş periyoduna sahip Tasarım depremi yer hareketi düzeyine (DD-2) göre tasarlanmaktadır. Türk Bina Deprem Yönetmeliğinde yapısal performansın belirlenmesi için “Kesintisiz Kullanım”, “Sınırlı Hasar”, “Kontrollü Hasar” ve “Göçmenin Önlenmesi” olmak üzere dört farklı performans hedefi tanımlanmıştır. Geleneksel ankastre temelli binalar için DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde “Kontrollü Hasar” performans hedefinin sağlanması gerekmektedir. Diğer bir deyişle insanların can güvenliğinin sağlanması ve ortaya çıkacak hasarın öngörüldüğü şekilde onarılabilecek düzeylerde olması şartı sağlanmalıdır.

TBDY-2018’e göre depreme dayanıklı tasarlanan bir yapının büyük ve orta ölçekli depremlere maruz kalması durumunda elastik olmayan deformasyon yoluyla oluşacak hasarın kolon ve kirişlerin belirlenen özel bölgelerinde karşılanması amaçlanmaktadır. Bu nedenle, moment aktaran betonarme bir çerçevenin tasarımında süneklik ve kapasite tasarım ilkelerinin uygulanmasıyla elastik olmayan deformasyonlara direnme yeteneği ana değerlendirme kriteridir.

Bina yüksekliği 20 metre altında kalan orta yükseklikte veya birkaç kattan oluşan yapıların çok serbestlik dereceli bir sistem olarak doğrusal olmayan analizi sadece detaylı üstyapı tasarımıyla mümkün olabilir. Birinci modun hakim olduğu yapısal sistemlerde ise genel deprem davranışı (taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirme talepleri) doğrusal olmayan elastik ötesi modellere dayalı yöntemler yardımıyla elde edilmektedir.

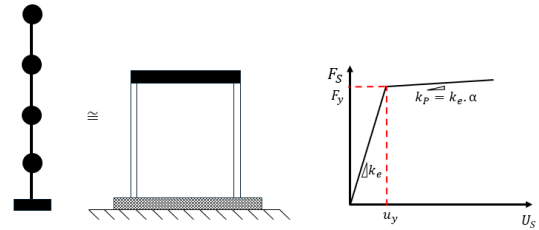
Bu kapsamda moment aktaran betonarme bir çerçeve olarak seçilen yapısal sistem elastik olmayan tek serbestlik dereceli bir betonarme bina olarak dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan analizler ön tasarım ve nihai tasarım aşamalarını kapsayacak şekilde differansiyel denklem takımlarının çözümüyle yapılmıştır. Tek serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışının tanımlanabilmesi için yapının kütlesi, elastik ötesi davranışını gösteren çift doğrusal bir kuvvet-yerdeğiştirme zarf eğrisiyle temsil edilmiştir. Ekonomik çözümlerin elde edilmesi amacıyla TBDY-2018’de yer alan dayanıma göre tasarım çerçevesinde, modal tek serbestlik dereceli sistemin öngörülen süneklik kapasitesi, dayanım talebi ilişkisi ve buna bağlı olarak belirlenen deprem yükü katsayıları Şekil 3’te sunulmuştur. Zaman tanım alanında yürütülecek çalışmada kullanılacak olan moment aktaran

çerçevelerde taşıyıcı sistem davranış katsayısı, $R=8$ ve bina önem katsayısı, $I=1$ olarak alınmış ve çift eğrili sistemin özellikleri bu bağlamda belirlenmiştir.



Şekil 3. Kapasite tasarım ilkelerine göre belirlenen katsayıların hakim periyotla değişimi (TBDY-2018)

Şekil 4’te kapasite tasarım ilkelerine göre tasarlanan yapının doğrusal olmayan elastoplastik davranışını gösteren tek serbestlik dereceli sistem ele alındığında, Denklem 1’de verilen m , yapının kütlesini, c viskoz sönüm sabitini, $F_R(t)$ yapının rijitliği kullanılarak yapısal merkezleme kuvvetini hareket denkleminin bir bileşeni olarak temsil etmektedir. Şekil 4’te verilen k_e ve k_p sırasıyla elastik ve elastik ötesi rijitliği, α katsayısıysa k_p ’nin k_e ’ye oranını ifade etmektedir. Ankastre temelli sistem için α katsayısı 0.1 olarak alınmıştır.



Şekil 4. Eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem ve çift doğrusal çevrim zarfı

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + F_R(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

Denklem sisteminde eşdeğer sönüm oranı ve radyan cinsinden açılmalık frekans kütleden bağımsız hale getirilirse Denklem 2’de yer alan forma dönüştürülmektedir. Denklem 1-2’de yer alan $\ddot{u}(t)$, $\ddot{u}_g(t)$, $\dot{u}(t)$ ve $u(t)$ tek serbestlik dereceli sistemin hareket denkleminde sırasıyla, göreceli ivme, yer hareketi ivmesi, göreceli hız ve yer değiştirmenin zamana göre değişimini göstermektedir. Denklem 2’de yer alan ξ ve ω parametreleri tek serbestlik dereceli sistemin eşdeğer sönüm oranı ve açılmalık frekans değerlerini ifade etmektedir.

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

Çözümlemede kullanılan Bouc-Wen modelinde [30-32] kullanılan parametreler ve detayları Bölüm 4.2’de deprem yalıtımlı bina için aktarılmıştır. Çözümlerde Matlab tarafından sunulan Sıradan Differansiyel Denklem (ODE) çözüm algoritması kullanılmıştır. Betonarme bina için sönüm oranı % 5 olarak alınmıştır.

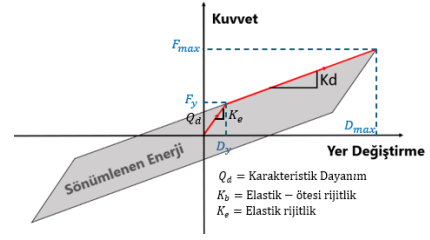
Deprem yalıtımlı bina modeli

Deprem yalıtımlı ve geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş yapıların performans hedefleri TBDY-2018’e göre birbirinden farklılıklar içermektedir. Deprem

yalıtımının kolaylıkla uygulanabildiği Moment Aktaran Çerçevelerde tipi taşıyıcı sistemlerde davranış katsayısı R parametresi 8 olarak alınırken deprem yalıtımlı binalarda performans hedefine göre 1.5 veya 1.2 alınarak sınırlı oranda bir süneklığe izin verilmektedir. Ayrıca bina önem katsayısı, I üst yapının özelliklerinden bağımsız olarak $I=1$ alınmaktadır. Ankastrre temelli yapılarda kullanılan yüksek R değerleri (Örneğin 6-8) DD-2 deprem yer hareketi seviyesinde kontrollü hasar veya diğer bir deyişle can güvenliği hedefini sağlayan kapasite tasarım ilkelerine bağlı olarak belirlenmiştir. Deprem yalıtımlı binalar içinse performans hedefleri TBDY-2018'de Tablo 3.5'te sunulmuştur.

Deprem yalıtımlı binaların tasarımında Etkin Deprem Yüğü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım alanında elastik olmayan yöntem adı altında toplamda üç yöntem kullanılabilir. Etkin deprem yükü yöntemi ve mod birleştirme yönteminin doğrudan kullanılabilmesi için yapısal sistemin belirli koşulları sağlaması gerekmektedir. Zaman tanım alanında yapılan analizlerdeyse etkin deprem yükü yöntemi sadece asgari koşulların sağlanması açısından ek bir kriter olarak kullanılmaktadır. Yazar tarafından serbestlik derecesi azaltılmış modeller zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde hem pratik bir yaklaşım sağlaması hem de hızlı bir değerlendirme aracı olarak kullanılmasından dolayı tercih edilmiştir. Bölüm 4.1'de aktarılan ankastrre temelli sistemde kullanılan denklemlerinde Bouc-Wen modelinde düzenlemeler yapılarak deprem yalıtımlı bina için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir (Denklemler 3-8). Deprem yalıtımlı konut binası için hareket denkleminin çözümü temel alınıp, deprem yalıtım sistemlerinin tasarımında kullanılan parametrelerin dikkate alındığı denklem takımları Matlab'te sıradan diferansiyel denklem(ODE) fonksiyonu kullanılarak hazırlanan yordamlar (rutinler) yardımıyla hızlı bir değerlendirme yöntemine dönüştürülmüştür.

Bu çalışma kapsamında herhangi bir yalıtım sistemine özel bir tasarım yapılmamasından dolayı TBDY-2018'de [6] tanımlanan alt ve üst sınır değerleri yerine örnek yapı olarak kullanılacak yapının kabul edilen nominal yalıtım sistemi tasarım parametreleri dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan kuvvet-yerdeğiştirme çevrimini idealize eden iki doğrulu zarf eğrisi yalıtım sisteminin nominal değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Eğri yüzeyli sürtünme tipi yalıtım birimlerinde rijit-plastik modeller kullanılmasına rağmen elasto-plastik modelleri için uygun akma yerdeğiştirme değerleriyle kauçuk elastomer ve eğri yüzeyli sürtünme tipi yalıtım birimleri içinde geçerli olacak bir modelleme yaklaşımı uygulanabilmektedir. Bu noktada sürtünme tipi yalıtım birimlerinin akma yerdeğiştirme değerinin yaklaşık olarak bir mertebeye daha düşük olacaktır. Çift-doğrudan oluşan elasto-plastik yalıtım sistemi tasarım parametreleriyle Şekil 5'te gösterilmektedir. İkincil rijitlik elastomerik ve eğri yüzeyli sürtünme tipi yalıtım birimlerinde Denklem 3'e göre hesaplanır.



Şekil 5. İdealize edilmiş deprem yalıtımlı bina çevrim zarfı [18]

Tek serbestlik dereceli sistemde üst yapı rijit kütle olarak idealize edilmektedir. Deprem yalıtım sistemi davranışının temsil edilmesi için elasto-plastik tek serbestlik dereceli (Şekil 6) Bouc-Wen çevrimsel salınım modeli kullanılmıştır [39]-[42]. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** Şekil 6'da gösterilen deprem yalıtımlı konut yapısının analizinde yalıtım sisteminin periyodu Denklem 4 yardımıyla bulunmaktadır. T_{is} yalıtım sisteminin periyodunu, m üst yapının kütlelerini, m_b yalıtım arayüzünün yük aktarımında kullanılan yalıtım döşemesi veya yapısal elemanların kütlelerini ve k_d yalıtım arayüzünün rijitliğini temsil etmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemin dinamik denge denklemleri Denklem 5-7 düzenlenerek çözülmüştür. Hareket denkleminin pratik çözümü için Matlab programında geliştiren altyordamlar yardımıyla yalıtım sistemlerinin tasarım parametreleri arasında olan karakteristik dayanım, Q_d akma yerdeğiştirmesi, u_y , deprem yalıtım sistemini temsil eden ikincil rijitlik, k_d kullanılmıştır. Denklem 3'te yer alan G elastomerin kayma modülünü, A yalıtım birimi alanı, t_r , kauçuk kalınlığı, W , yapı ağırlığını, R_{eff} etkin yarıçapı temsil etmektedir. Analiz sonuçlarında en büyük yerdeğiştirme ve en büyük taban kesme kuvveti katsayısı değerleri elde edilmektedir. Denklem takımlarında yer alan $u(t)$ görelî yer değıştirmenin zamana bağılı değışimini, $\ddot{u}(t)$ görelî yer ivmesini temsil etmektedir. Deprem yalıtımlı sistemde iç kuvvet hesaplanırken sadece çevrimsel davranışa bağılı ortaya çıkan sönüm dikkate alınmıştır. Deprem yalıtım sisteminin temel özelliklerinden biri olan karakteristik dayanımın toplam ağırlığa oranı Denklem-6'da yapılan düzenlemede gösterilmiştir. Yapılan düzenleme gereği $\frac{Q_d}{W}$ parametresinin kullanımı hareket denge denkleminde kullanılırken, yer çekimi ivmesi(g) ile çarpılarak, deprem yalıtım sisteminin doğal titreşim periyodu deprem yalıtım sisteminin rijitliğinin tanımında kullanılmaktadır. Denklem 6-7'de gösterilen $z(t)$ parametresi boyutsuz histerik niceliksel bir parametredir. $|z(t)| \leq 1$ olacak şekilde -1 ile 1 arasında değerler alırken Denklem 7 kullanılarak deprem kayıtları altında çevrim eğrisini verecek şekilde bir hesaplama yapılmıştır.

$$k_d = \frac{G \cdot A}{t_r}, \quad k_d = \frac{W}{R_{eff}} \quad (3)$$

$$T_{is} = 2\pi \sqrt{\frac{(m+m_b)}{k_d}} \quad (4)$$

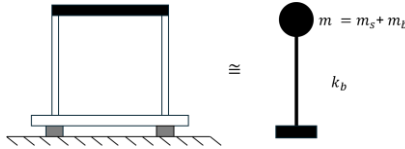
$$\ddot{u}(t) + \frac{F_R(t)}{m} = -\ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

$$\frac{F(t)}{m} = \left(\frac{2\pi}{T_{1s}}\right)^2 u(t) + \frac{Q_d}{W} gz(t) \quad (6)$$

$$m_y \ddot{z} + \gamma |\dot{u}(t)| z |z|^{n-1} + \beta \dot{u}(t) |z|^{n-1} - u(t) = 0 \quad (7)$$

Bouc-wen modelinde kullanılan β , γ ve n boyutsuz parametreleri çevrimlerin şeklini kontrol eden parametrelerdir [39]-[42] **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** Çift doğrulu zarf eğrisi ile uyumlu çevrimlerin elde edilmesi için gerekli düzenleme yansıtılmıştır.

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz 2475 ve 475 yıl dönüş periyoduna sahip sırasıyla DD-1 ve DD-2 deprem düzeyi için deprem yalıtımlı yapının TBDY-2018'de yer alan performans kriterleri dikkate alınarak araştırılmıştır. Yapısal performans taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirme talepleri üzerinden değerlendirilmiştir. Çok serbestlik dereceli sistemlerin benzer şekilde uygulanmasıyla katlar arası görece ötelenme oranı ve sismik performans seviyesinin kabulüne göre değerlendirilmesi mümkündür. Yerdeğiştirme talebinde ortaya çıkan artışlar yalıtım birimi maliyetlerini etkilerken, kat ivmelerinde ortaya çıkacak azalmalar çok serbestlik dereceli sistemin detaylı analizlerini içerdiğinden dolayı bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Analiz sonuçlarının ve yapısal performansın irdelenmesinde zaman tanım alanında yerdeğiştirme belirlenirken etkin periyot deprem yönetmeliğinin önerdiği şekilde toplam taban kesme kuvvetinin belirlenmesinden faydalanan İvme-Yerdeğiştirme-Davranış-Spektrumundan (İYDS) TBDY-2018 yönetmeliğiyle uyumlu hibrit bir yaklaşım olarak benimsenmiştir.



Şekil 6. Rijit kütleli deprem yalıtımlı bina

Deprem yalıtımlı sistemlerde kullanılan cihazların tasarımında yeterli merkezlemenin TBDY-2018 asgari koşullarıyla sağlandığı kabul edilmiştir. İstenen bu ön şart sadece deprem yalıtım sisteminin doğal titreşim periyodu değeri ve akma dayanımının değil aynı zamanda deprem kayıtlarının özelliğine de bağlı olarak değişmektedir.

Üst yapı tasarımında kullanılan taban kesme kuvveti DD-2 deprem yer hareketi seviyesi için Denklem-8 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 8'de yer alan $S_{ae}^{(DD-2)}$, tasarım deprem yer hareketi seviyesi olan DD-2 spektrumunun T_D deprem yalıtım periyodundaki spektral ivme, W binanın deprem sırasındaki toplam kütleyle karşı gelen ağırlığı, η_D tasarım deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısını ve R , deprem yükü azaltma katsayısını göstermektedir. DD-1 deprem yer hareketi seviyesine karşı gelen parametrelerin değiştirilmesiyle en büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın T_M

etkin titreşim periyodu için taban kesme kuvveti hesaplanabilmektedir.

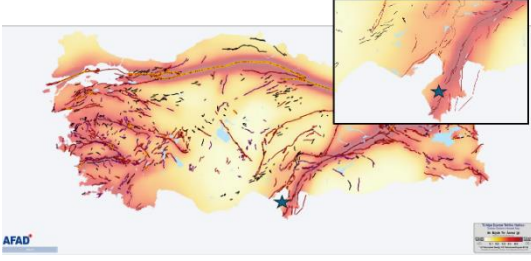
$$V_{D,M} = \frac{S_{ae}^{(DD-2)}(T_{D,M})W\eta_{D,M}}{R} \quad (8)$$

Sayısal analizlerde kullanılacak lokasyon seçimi ve afet bölgesinin depremselliği

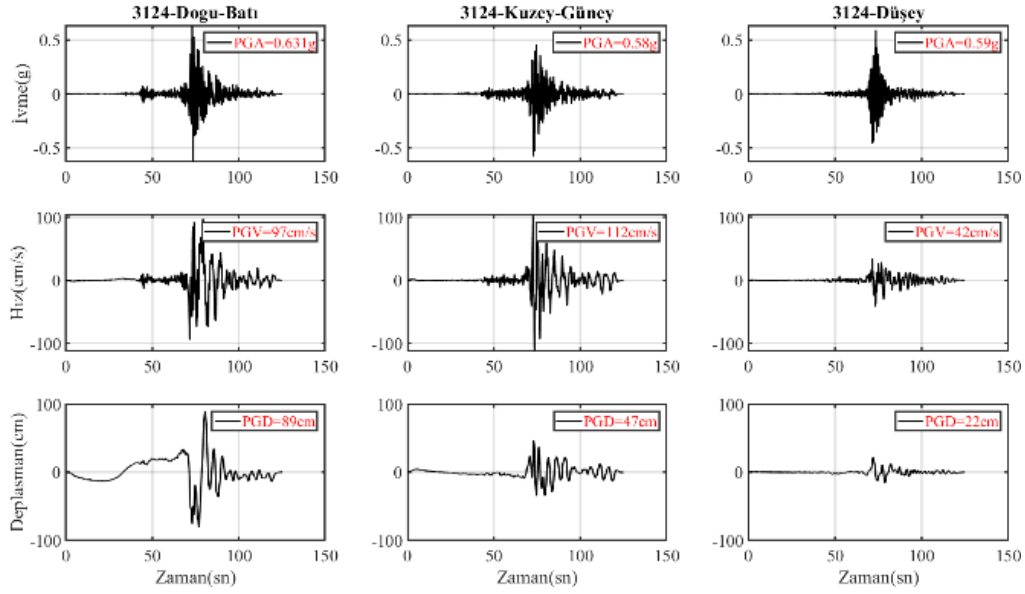
Türkiye'de son 30 yıllık süreçte yaşanan 1999 Gölçük ve Düzce depremleri, 2011 Van Depremleri, Doğu Anadolu fay hattında önemli kayıpların yaşandığı 2020 Elazığ ve Ege'de meydana gelen 2020 Bayraklı depremleri topluma deprem gerçeğini hatırlatmasına rağmen Kahramanmaraş depremleri son 124 yıllık süreçte Türkiye'yi etkileyen ve resmi istatistiklere dayalı olarak kayıplar açısından en büyük can ve ekonomik kaybın yaşandığı depremler olmuştur. Aynı gün içerisinde içinde gerçekleşen, AFAD tarafından merkez üssü Pazarcık, $M_w=7.7$ ve merkez üssü Elbistan, $M_w=7.6$ olarak açıklanan iki büyük deprem geniş bir coğrafyayı etkilemiş ve resmi rakamlara göre 53.347 kişinin ölümüne ve 107.213 kişinin yaralanmasına neden olmuştur. Beklenen senaryodan farklı bir durumun ortaya çıkaran bu iki deprem risk azaltımından afet yönetimine kadar eksiklerimizin gün yüzüne çıkmasına neden olmuştur. Ardı sıra gerçekleşen ana şoklar, büyük artçılar, depremlerin oluş mekanizmaları incelendiğinde kendine has kaynak özellikleri, deprem kayıtlarının yüksek ivme, hız ve spektral ivmelere ulaşması, afet bölgesinde yer alan bazı illerde yerel zemin koşullarının olumsuzlukları ve deprem kayıtlarının uzun güçlü yer hareketi sürelerine sahip olması yapısal sistemler üzerinde ciddi talep parametreleri ortaya çıkartarak bina hasarının artmasına neden olmuştur. Afet bölgesi ilan edilen 11 il arasında Kahramanmaraş, Hatay ve Gaziantep illeri deprem mühendisliğinin özel konularının birebir gözlemlendiği ve yıkımın en şiddetli olduğu iller olarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bölgede konumlanmış deprem yalıtımlı hastane binalarının olması ve oldukça fazla sayıda deprem kaydının afet bölgesi sınırlarında elde edilmesi, deprem yalıtımlı hastanelerde gözlemlenen yüksek yapısal performans, bu teknolojinin konutlarda kullanımının pratik yaklaşımlar sunularak standartlaştırılmasını gerektirmektedir. Çalışmalarda kullanılacak olan kayıtların seçimi ve ölçeklendirmesinde inşaat alanı olarak Hatay'da yer alan AFAD 3124 nolu güçlü yer hareketi istasyonu seçilmiştir (Şekil 7). Seçilen istasyondan elde edilen zaman tanım alanında İvme-Hız-Deplasman grafikleri, deprem kayıtlarının frekans içeriği ve deprem yalıtımlı yapıların tasarımında kullanılan tasarım spektrumlarıyla kıyaslanmış davranış spektrumları sırasıyla Şekil 8-10'da

gösterilmiştir.

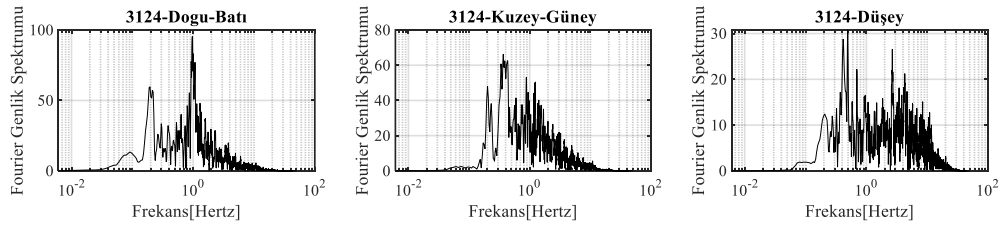
Şekil 7. Yapısal sistemler için seçilen konum [35]



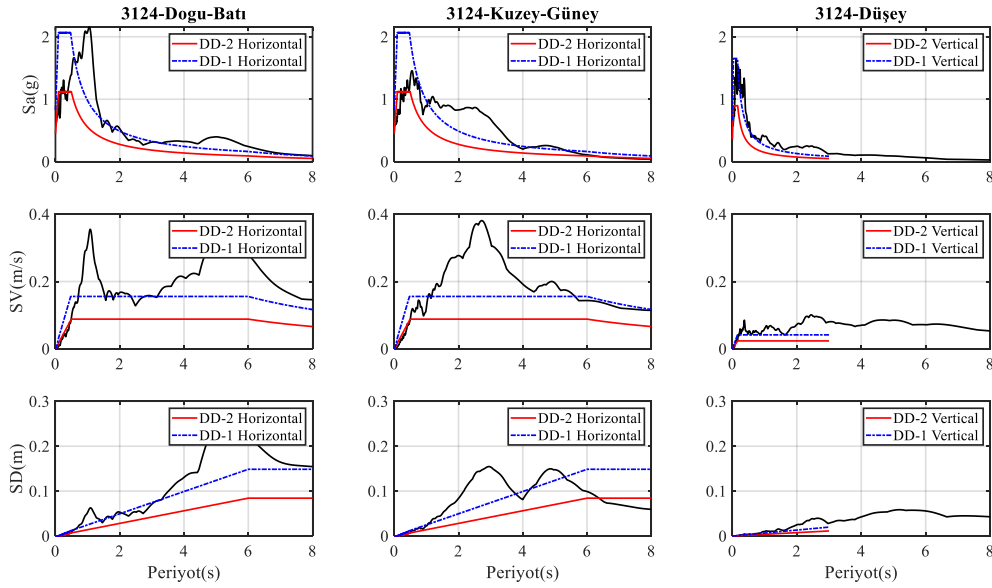
Şekil 8'de elde edilen yüksek ivme değerlerine ek olarak, Şekil 10'da AFAD-3124 istasyonundan alınan yatay ve düşey kayıtlarının spektral ivme, hız ve deplasman değerlerinin DD-2 ve DD-1 deprem yer hareketi düzeylerini aştığı görülmektedir[43].



Şekil 8. AFAD 3124 İstasyonundan elde edilen İvme-Hız-Deplasman grafikleri



Şekil 9. AFAD 3124 kayıtlarının frekans içerikleri



Şekil 10. TBDY-2018 DD-1 ve DD-2 Deprem yer hareketi seviyeleriyle AFAD-3124 kaydından elde edilen davranış spektrumunun kıyaslanması

Deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi

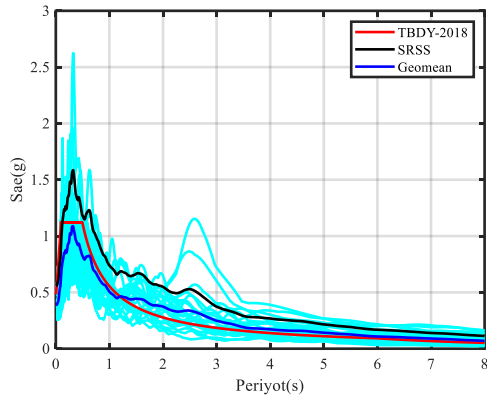
Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi sonrası zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Girdi dosyası olarak kullanılacak deprem kayıtları üç farklı şekilde elde edilebilir. Bunlardan birincisi spektrum uyumlu yapay girdi dosyaları oluşturmak ve ikinci yöntemse deprem kaynak özelliklerinin kullanıldığı benzeşim yöntemiyle kayıtların elde edilmesidir. Fakat bu iki yöntemin doğru bir şekilde kullanılması özel uzmanlık gerektirmesi ve endüstride çalışan mühendisler tarafından kullanımının zor olmasından dolayı çok tercih edilmemektedir. Üçüncü yöntem olarak veri tabanlarında yer alan ulusal veya uluslararası deprem izleme istasyonlarında kaydedilmiş kayıtların kullanılması mühendisler tarafından tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında da yapısal analizler açısından TBDY-2018'e göre herhangi bir kısıtlamanın olmaması ve özel bir uzmanlık gerektirmemesinden dolayı üçüncü yöntem tercih edilmiştir. Deprem kayıtlarının seçiminde spektral şekil dikkate alınarak doğrusal ölçekleme uygulanmıştır.

Hedef spektrum olarak seçilen inşaat alanı için 2475 ve 475 yıllık dönüş periyoduna sahip 50 yılda aşılma olasılığı %2 ve %10 olan en büyük deprem yer hareketi düzeyi(DD-1) ve tasarım deprem yer hareketi düzeyi(DD-2) için Türkiye Deprem Tehlike haritasından elde edilen kısa periyot spektral parametresi S_{DS} , bir saniye değerinde elde edilen spektral ivme S_{D1} , sabit deplasman bölgesinin başladığı sabit $T_L=6s$ değeri ve Z_D zemin sınıfı dikkate alınarak inşaat alanı olarak seçilen AFAD 3124 nolu güçlü yer hareketi istasyonunun konumu için Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterildiği gibi DD-1 ve DD-2 spektrumları hesaplanmıştır[43].

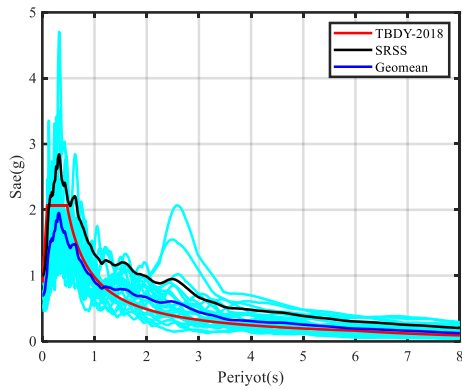
Deprem kayıtlarının seçiminde pratikte Türkiye'de sıklıkla başvurulan PEER yer hareketi veritabanı kullanılmıştır [44]. Kayıt seçimi ve ölçeklendirilmesi özel bir uzmanlık alanı olduğundan endüstride çalışan mühendislerin tercihen uyguladığı deprem büyüklüğü, zemin sınıfı ve faya veya yırtılmanın ortaya çıktığı mesafeye olan uzaklık baz alınarak kayıt çifti seçimi yapılmıştır. Diğer bir deyişle deprem yönetmeliğinde aranan deprem kayıtlarının seçiminde asgari koşulların sağlanması için herhangi bir özel ölçeklendirme ve seçim yöntemi uygulanmadan, sadece depremin büyüklüğü, zemin sınıfı ve uzaklık temelinde tanımlanan kriterleri sağlayacak, tasarım spektrumunun şekliyle uyumlu %5 sönüm oranı altında gerçekleştirilen lineer ölçeklendirme kullanılarak kayıt seçimi yapılmıştır. Diferansiyel denklem takımları kullanılarak zaman tanım alanında tek yönlü olarak uygulanacağından ve TBDY-2018'de etkin deprem yükü yönteminde kullanılan katsayılar değerlendirilerek, deprem kayıt çiftinin seçiminde geometrik ortalamalarına göre doğrusal ölçeklendirme tercih edilmiştir. Kayıtların seçimi ve ölçeklendirmesi yapılırken TBDY-2018'de yer alan periyot aralığında tanımlanan spektral değerler eşit ağırlıklı olarak atanmıştır.

Deprem kayıtlarının seçiminde TBDY-2018'e göre elde edilen tasarım spektrumuyla uyumlu 11 deprem kayıt çiftinin seçiminde, betonarme moment aktaran çerçeve sistemi için hakim titreşim periyodunun 0.2-1.5 katının ve deprem yalıtımlı konut yapısının hakim titreşim periyodunun 0.5-1.25 katının incelendiği periyot aralığı seçim yapılırken kullanılmıştır. Deprem yalıtımlı yapılar hakim titreşim periyotları karşılaştırıldığında geleneksel yapılara göre daha uzun periyotlu yapılar olmasından dolayı kayıtlar taranırken seçiminin yapılacağı periyot aralığı DD-1 seviyesinde daha geniş bir periyot aralığına sahiptir. Kayıt

seçiminde Kahramanmaraş ilinde meydana gelen depremlerden önce öngörülen senaryo depreminin büyüklüğü, zemin sınıflandırmasına göre kayma dalgası hızının 360 m/s-800 m/s aralığında değişimini dikkate alan hedef spektrumla uyumlu kayıtlar aranmıştır. DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyleri için spektral şeklin uyumlu olmasından dolayı aynı kayıt seti hedef spektrumla uyumlu olacak şekilde farklı katsayılarla lineer ölçeklendirme işlemine tabi tutulmuştur. Ölçeklendirme sonrası seçilen kayıt setinin tüm kayıtları, kayıt çiftlerinin geometrik ortalamaları (Geomean) ve karelerinin karekökünün (SRSS) ortalamalarıyla karşılaştırması Şekil 11-12’de gösterilmiştir.

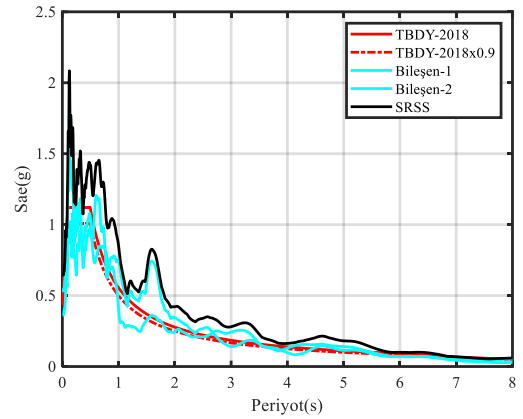


Şekil 11. DD2-Deprem yer hareketi düzeyi ve seçilen deprem kayıtlarının davranış spektrumu



Şekil 12. DD1-Deprem yer hareketi düzeyi ve seçilen deprem kayıtlarının davranış spektrumu

Örnek olması açısından yapılan ölçeklendirme prosedürüne göre Imperial Valley-06 Delta istasyonundan alınan kayıtlar Türkiye Sismik Tehlike Haritasından elde edilen parametrelere göre elde edilmiş DD-2 tasarım spektrumuyla kıyaslanmış hali Şekil 13’te gösterilmiştir.



Şekil 13. DD2-deprem yer hareketi düzeyine göre ölçeklendirilmiş Imperial Valley depremi yatay bileşenlerinin davranış spektrumu

Tablo 1. Doğrusal olmayan analizler için seçilen kayıtlar

Deprem	Mw	Deprem İstasyonu	Kayıt Bileşeni	Rjb (km)
Imperial Valley-06	6.53	Delta	DLT262	22.03
			DLT352	
Victoria Mexico	6.33	Chihuahua	CHI102	18.53
Superst. Hills-02	6.54	El Centro Imp. Co. C.	ICC000	18.2
			ICC090	
Landers	7.28	North Palm Springs	FHS000	26.84
			FHS090	
Chi-Chi_Taiw.-04	6.2	CHY030	CHY030N	30.46
			CHY030E	
Chi-Chi_Taiw.-04	6.2	CHY101	CHY101E	21.62
			CHY101N	
El Mayor-C. Mexico	7.2	Calexico Fire Station	CXO360	19.12
			CXO090	
El Mayor-C. Mexico	7.2	El Centro Array #11	E11360	15.36
			E11090	
Darfield_N.Z.	7	Christchurch C. College	CCCCN26W	19.89
			CCCCN64E	
Darfield_N.Z.	7	Christchurch Hospital	CHHCN01W	18.4
			CHHCS89W	
Darfield_N.Z.	7	Papanui High School	PPHSS33W	18.73
			PPHSS57E	

Veri tabanında yer alan kayıtlar arasından seçim yapılırken, kayıtların özellikle herhangi bir hız itkisi içermemesi ve belirli bir depremin özelliklerinin kayıt setinde hakim etkiye sahip olmamasına özen gösterilmiştir. Hız itkisinin depremin kaynak özelliklerine göre farklılıklar içereceği ve sahaya özel tehlike analizlerinde dikkate alınması özel bir durum olduğundan dolayı bu çalışmanın dışında bırakılmıştır.

Sayısal analiz sonuçları

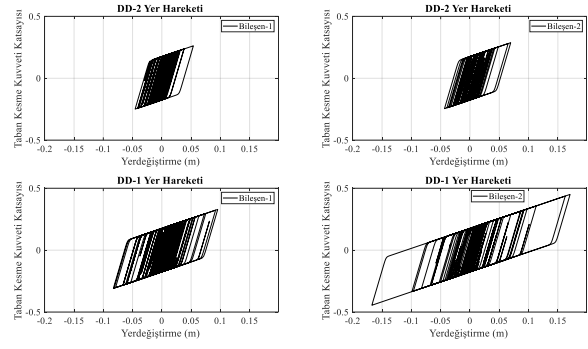
Yürütülen bu çalışma kapsamında, iki farklı yapısal sistemin performansları kıyaslanmış ve en doğru sonuçları verdiği kabul edilen doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılırken girdi dosyası olarak bir önceki bölümde kayıt seçimi ve ölçeklendirme detayları paylaşılan depremler altında hazırlanan diferansiyel denklem düzenlemeleriyle pratik ve hızlı bir değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Performans değerlendirme yöntemleri arasında doğrusal olmayan dinamik analizlerin tek serbestlik dereceli modellerle araştırıldığı birinci modun hakim olduğu geleneksel

moment aktaran çerçevelerden oluşan konut tipi, simetrik, düzenli yapılar ve deprem yalıtımlı sistemler için doğru sonuçlar vermektedir. Doğrusal olmayan statik analizlere göre uygulamada mühendisler tarafından uygulanan doğrusal olmayan dinamik analizlerin kullanımının sınırlı kalmasının ana nedenleri arasında zaman tanım alanında analizlerin yapılmasının zaman alıcı, maliyetli ve zor olması algısıdır. Fakat, bu çalışmada aktarıldığı gibi herhangi bir paket program veya ticari uygulamaların kısıtlarından bağımsız bir yaklaşımla belirli yapısal sistemlerin performansına dair önemli öngörüler sunan hızlı çözümler elde edilmiştir. Doğrusal olmayan statik yöntemlerle kıyaslandığında deprem kayıtlarının frekans içerikleri, yapının göstereceği çevrimsel dinamik davranış ve kayıttan kayda değişen davranış özelliklerini yansıtmaması açısından çıktılar sunan hızlı yöntemdir.

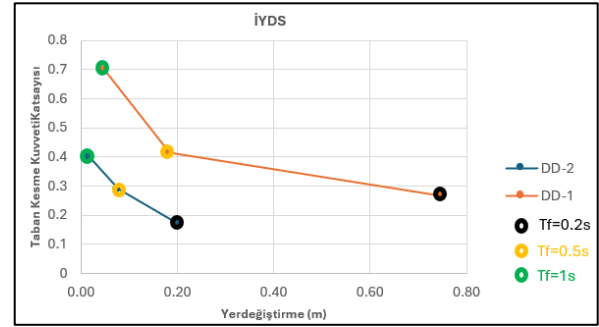
Betonarme moment aktaran çerçeve sistem

Betonarme moment aktaran çerçevenin tasarımı TBDY-2018'e göre DD-2 deprem yer hareketi seviyesi dikkate alınarak Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı, $R=8$, Dayanım fazlalığı katsayısı, $D=3$ ve elastik ötesi rijitliğin elastik rijitliğine oranı 0.1 alınarak zaman tanım alanında gerçekleştirilmiştir. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde DD-2 tasarım depremi seviyesinin üzerinde birçok kaydın elde edilmesinin avantajıyla zaman tanım alanında analizler için seçilen deprem kaydı çiftleri DD-1 deprem yer hareketi seviyesine göre ölçeklendirilerek, yer değiştirme talepleri incelenip, sahada kaydedilen AFAD-3124 istasyonu kayıtlarının sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yapısal sistem için referans olarak doğal titreşim periyodu $T=0.2, 0.5, \text{ ve } 1s$ alınarak ortaya çıkacak davranış farklılıkları moment aktaran betonarme çerçeve sistemler için hesaplanmıştır. İkincil rijitliğin birinci rijitliğe oranı 0.1 kabul edilmiştir. $T=0.5s$ doğal titreşim periyoduna sahip betonarme moment aktaran çerçevenin DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi seviyesinde kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 14'te gösterilmiştir. Toplamda 132 zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sunulan pratik model yardımıyla göreceli olarak kısa bir sürede tamamlanmıştır. Yerdeğiştirme taleplerinin değerlendirmesinde her bir bileşenden elde edilen sonucun karelerinin karekökü alınarak hesaplanmıştır.

Moment aktaran betonarme çerçeve sistem ve deprem yalıtımlı betonarme moment aktaran çerçeveler için gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerden elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ve yapısal sistem tasarımında kullanılan taban kesme kuvvetleri sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 18'de gösterilmiştir. Seçilen deprem kayıtları altında elde edilen eğriler mühendislere ön tasarım ve nihai tasarım aşamasında grafiksel olarak kıyaslanacak veriler sunmaktadır.



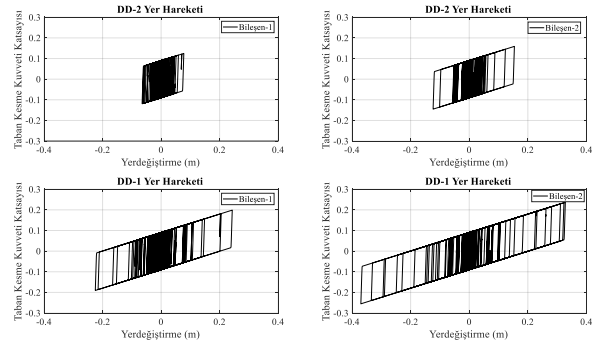
Şekil 14. DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde yalıtımlı yapının Landers kaydının iki bileşeni altında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri



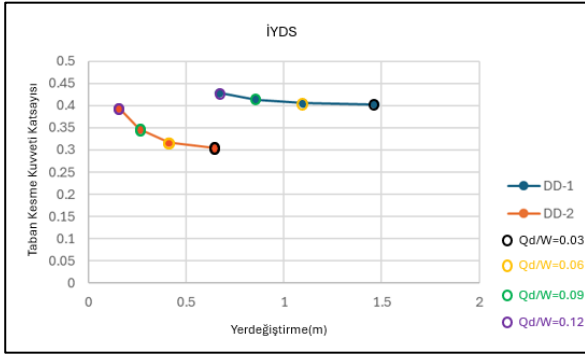
Şekil 15. Zaman tanım alanında ankastre temelli moment aktaran çerçeve için elde edilen talep parametrelerinin ortalamaları

Deprem yalıtımlı betonarme çerçeve sistem

Deprem yalıtımlı betonarme çerçeve için yalıtım sisteminin periyodu 3s olarak tasarlanırken karakteristik dayanımının yapının toplam ağırlığına oranı dört farklı yalıtım sistemi için göz önüne alınmıştır. Deprem yalıtım sistemi için Qd/W oranı 0.03, 0.06, 0.09 ve 0.12 alınıp, zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde kullanılmıştır. Bu dört sistem için DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde toplamda 176 kayıt altında yapılan analizler değerlendirilmiştir. DD-2 ve DD-1 seviyelerinde kullanılan doğrusal olmayan tek serbestlik dereceli sistemin davranışı Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde yalıtımlı yapının Landers kaydının iki bileşeni altında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri



Şekil 17. Deprem yalıtımlı yapının DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde İYDS yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçları

Ankastre temelli yapısal sistemler için elde edilen değerler arasında özellikle $T=1s$ periyoda sahip bir binada geleneksel yöntemlere göre boyutlandırma ve tasarımı açısından zorlayıcı olacaktır. Deprem yalıtımı sayesinde ankastre temelli yapılar için yüksek olan yerdeğiştirme talepleri yalıtım sistemi tarafından karşılanarak aynı zamanda üst yapının tasarımında kullanılacak kesme kuvveti %40-42 arasında sınırlandırılmıştır. Ölçeklendirilmiş olan 11 kayıt çifti dikkate alınarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde en büyük deprem yer hareketi seviyesinde $T=0.2s$ periyoda sahip ankastre temelli sistemin taban kesme kuvveti DD-1 deprem yer hareketi seviyesinde yaklaşık olarak % 38-42 oranında azalmıştır.

2023 Kahramanmaraş depremlerinde Hatay ilinde seçilen konumdan alınan kayıtlar altında gerçekleştirilen analizlerin sonuçları, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan itki içermeyen kayıtlardan elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında dört farklı deprem yalıtım sistemi için DD-1 seviyesinde seçimi yapılan kayıtların ortalama yerdeğiştirme değerlerini Qd/W değerlerinin 0.09,0.06, 0.03 arasında değişmesi durumunda sırasıyla yaklaşık olarak %7-18.5 oranında aştığı gözlemlenmiştir. Qd/W oranının en yüksek olduğu yalıtım sistemi için yerdeğiştirme değerleri %14 daha düşük değerler vermiştir. Benzer şekilde üst yapının tasarımında kullanılacak olan kesme kuvvetinde Qd/W değerinin 0.09'dan 0.03'e değişiminde kayıt setinden elde edilen değere göre %20-98 arasında değişen daha yüksek değerler elde edilirken en yüksek orana sahip sistem için yaklaşık % 12 daha düşük değer elde edilmiştir.

Sonuç

Son 80 yıllık süreçte 1939 Erzincan depreminden başlayarak önemli kayıpların yaşanması sonrasında deprem yönetmelikleri değişen aralıklarla güncellenmiştir. Depreme dirençli kentlerin oluşturulmasında yenilikçi teknolojilerin kullanımı ve rasyonel yaklaşımların niceliksel tespiti göreceli olarak büyük avantajlar sunmaktadır. Yapısal sistemlerin işlevsellikleri dikkate alındığında, toparlanma periyodu olarak tanımlanan sürecin kısaltılması ve bir binaya

uygulanacak bakım veya onarım masraflarının azaltılması için gerekli olan yapısal performans iyileştirilmelerini amaçlayan yaklaşımlar dünyada kabul görmüş modern yönetmeliklerde halen standartlaştırılmamıştır. Sağlık Bakanlığının 2013 yılında yayınlanan genelgesinden sonra ülkemizde kullanımı artan pasif kontrol sistemleri arasında bulunan deprem yalıtım teknolojisi için TBDY-2018'te gerekli olan tasarım ve analiz şartları açıklanmıştır.

Bu çalışma kapsamında deprem yalıtımlı sistemlerin tasarım hedeflerinin ve değerlendirmesini hızlandıracak pratik ve hızlı bir değerlendirme yöntemi okuyucuya sunulmuştur. TBDY-2018'e göre seçimi ve ölçeklendirmesi gerçekleştirilen kayıt seti altında ortaya çıkan deprem talebi, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde Hatay ili sınırlarında bulunan DD-1 tasarım deprem yer hareketi seviyesini aşan inşaat alanı için hesaplanan deprem talepleriyle yapısal güvenlik ve performan açısından kıyaslanmıştır.

Ankastre temelli yapıya ve deprem yalıtımlı üst yapıya etkileyen taban kesme kuvveti katsayısı ve yerdeğiştirme talepleri zaman tanım alanında seçilen deprem yer hareketlerine göre değerlendirilmiştir. Deprem yalıtımlı yapılarda güvenli sınırdan kalmak amacıyla zaman tanım alanında yerdeğiştirme değerleri hesaplanırken taban kesme kuvvetinin İvme-Yerdeğiştirme-Davranış-Spektrumuyla belirlenmiştir. Zaman tanım alanında toplamda 316 doğrusal olmayan analiz deprem yalıtımlı ve ankastre temelli konut tipi yapıların genel davranışlarını kıyaslamak için gerçekleştirilmiştir. Kahramanmaraş depremlerinde yüksek depremselliğin gözlemlendiği bir konumda elde edilen deprem kayıtları altında sahaya özel durumların dikkate alınmaması durumunda ortaya çıkacak olumsuzluklar ise kullanılacak tasarım parametreleri ve analiz yöntemlerinin kullanımının gerekliliğiyle gösterilmiştir.

Analiz sonuçları deprem kayıtlarının seçiminden ölçeklendirilmesine, sayısal modellemede kullanılan modellerin yetkinliğini sorgulatmıştır. Çalışma kapsamında deprem yalıtımlı sistemler için hızla dayalı çevrimsel yükleme koşulları ve deprem kayıtlarının ortogonal yönlerde etkileşimli plastisite modelleri dikkate alınmamıştır. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hız etkisi içeren yakın saha depremlerinin ilerleyen süreçte araştırmacılar tarafından deprem yalıtımlı sistemler açısından daha detaylı bir şekilde ve farklı istasyonların dahil edilerek incelenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada analizlerde kullanılan konum için AFAD sismik tehlike harita verileri ve belirtilen konumdan AFAD veritabanı tarafından sağlanan deprem kayıtları kullanılmıştır. Çalışmanın yazar tarafından çalışmanın akışı ve kavramlarının geliştirilmesi aşamasında değerli yorumlarıyla destek olan Dr. Jones'a şükranlarımı sunar. Makalenin değerlendirme sürecinde yorumlarıyla çalışmanın zenginleştirilmesine

katkı sağlayan ve değerli zamanlarını ayıran hakemlere ayrıca teşekkür ederim.

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 yer alan tüm analizler ve sayısal analizler için geliştirilen yazılımlar yazar tarafından hazırlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu (2023). Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı
- [2] [Büyük Depremler - B.Ü. KRDAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi \(boun.edu.tr\)](http://boun.edu.tr)
- [3] C. Yenidoğan, "6 Şubat 2023 Depremleri ve Saha Gözlemlerine Dayalı Bina Hasarları Hakkında Ön Değerlendirme", tjce, vol. 35, no. 5, 2024, doi: 10.18400/tjce.1335742.
- [4] Di Sarno, L.; Yenidogan, C.; Erdik, M. Field evidence and numerical investigation of the Mw = 7.1 October 23 Van, Tabanlı and the Mw > 5.7 November Earthquakes of 2011. Bull. Earthq. Eng. 2013, 11, 313–346.
- [5] Hancılar, U., C.Tüzün, C.Yenidoğan, M.Erdik, 2010. ELER Software-A new tool for urban loss assessment, Natural Hazards and Earth System Sciences, December 2010
- [6] Afet ve Acil Durum Başkanlığı,(2018). TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. Resmi Gazete; 30364, 2018.
- [7] İmar ve İskan Bakanlığı (1975). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- [8] ASCE-07, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, 2010.
- [9] Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures(ASCE 7-16), (2017). American Society of Civil Engineers.
- [10] BSL. Building Standard Law of Japan, 2000.
- [11] Midorikawa, Mitsumasa, et al. "Development of seismic performance evaluation procedures in Building Code of Japan." Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, Paper. No. 2215. 2000.
- [12] Yenidogan, C.; Yokoyama, R.; Nagae, T.; Tahara, K.; Tosauchi, Y.; Kajiwara, K.; Ghannoum, W. Shake table test of a full-scale four-story reinforced concrete structure and numerical representation of overall response with modified IMK model. Bull. Earthq. Eng. 2018, 16.
- [13] ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Applied Technology Council, Redwood City (1996)
- [14] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (1997). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- [15] Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik-2007(DBYBHY-2007), (2007).
- [16] Aydınoglu, N.M., Celep, Z., Özer, E., Özyayın, K., (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Eğitim Sunumları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- [17] Sucuoğlu H., "New improvements in the 2019 building earthquake code of Turkey", Turk. J. Earthq. Res. 1(1), 63-75. 2019
- [18] Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu F., 2013. 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, Ankara-Türkiye.
- [19] AFAD (2018) Türkiye Deprem Tehlike Haritası. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-1>
- [20] TDBH, 1996. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [21] Yenidogan, C., 2021. Earthquake-resilient design of seismically isolated buildings: A review of technology. Vibration, 4(3), 602-647.
- [22] Yenidogan, C., & Erdik, M. (2016). A comparative evaluation of design provisions for seismically isolated buildings. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90, 265-286.
- [23] Yenidogan, C.; Erdik, M. The State of art in seismic isolation and energy dissipation devices, Vol. 83, No.2, pp. 49–59. J. Jpn. Soc. Seism. Isol. (Menshin) 2014,83, 49–59.
- [24] Yenidogan, C. Karma Deprem Yalıtım Sistemlerinin Deneysel Performans Değerlendirmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 23(69), 767-779.
- [25] Yenidogan, C.; Uckan, E.; Erdik, M. Shake Table Tests of a Passive-Hybrid Isolation System. In Proceedings of the Second Conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Istanbul, Turkey, 9–11 September 2013.
- [26] Takaya K, Ota K, Yenidogan C, et al. Comprehensive wood dwelling tests for Post-and-Beam and Shear-Wall structures reflecting

- foundation boundaries. *Earthq Eng Resil.* 2024; 3: 5-32. doi:10.1002/eer2.66
- [27] Nagae T, Uwadán S, Yenidogan C, et al. The 2019 full-scale shake table test program of wood dwellings. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, September 27-October 2, 2021.
- [28] Takahashi T, Nagae T, Uwadán S, et al. Stiffness, ultimate strength capacity and cyclic loading deterioration characteristics of two different wood-structure dwellings following the current Japanese practice. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, September 27-October 2, 2021.
- [29] AIJ, Preliminary Reconnaissance Report of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (English edition), Architectural Institute of Japan, Tokyo, 1995.
- [30] Stewart, J. P., Conte, J. P., & Aiken, I. D. (1999). Observed behavior of seismically isolated buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 955-964.
- [31] Pan, P., Zamfirescu, D. A. N., Nakashima, M., Nakayasu, N., & Kashiwa, H. (2005). Base-isolation design practice in Japan: introduction to the post-Kobe approach. *Journal of Earthquake Engineering*, 9(01), 147-171.
- [32] Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M., Salvatori, A. (2014). Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use. In: Ansal, A. (eds) *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, vol 34. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3_14
- [33] Whittaker, D. (2015, September). Recent developments in seismic isolation in New Zealand (2015). In *14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*.
- [34] Di Sarno, L., Yenidogan, C. & Erdik, M. Field evidence and numerical investigation of the Mw=7.1 October 23 Van, Tabanlı and the MW>5.7 November earthquakes of 2011. *Bull Earthquake Eng* 11, 313–346 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9417-0>.
- [35] Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı 2013, 3 Sayılı Genelgesi. Deprem Yalıtımlı olarak İnşa Edilecek Yapılara Ait Proje ve Yapım İşlerinde Uyulması Gereken Asgari Standartlar, 2013.
- [36] European Standard EN 15129:2010 for Anti-seismic Devices, European Committee for Standardization, November 2010.
- [37] EN, BS. "1337-3; Structural Bearings-Part3: Elastomeric Bearings." British Standards Institution: London, UK (2005).
- [38] Eurocode, 2004. EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, European Committee for Standardization.
- [39] Bouc R (1967) Forced vibrations of a mechanical system with hysteresis. In: Proc 4th conf on nonlinear oscillations, Prague, Czechoslovakia
- [40] Bouc R (1971) Modèle mathématique d'hystérésis. *Acustica* 21:16–25. (A mathematical model for hysteresis)
- [41] Wen YK. Approximate method for nonlinear random vibration. *Journal of Engineering Mechanics Division (ASCE)* 1975; 102(4): 389–401.
- [42] Kikuchi, M., Black, C. J., and Aiken, I. D. 2008. "On the response of yielding seismically isolated structures." *Earthquake Eng. Struct.Dyn.*, 37(5), 659–679.
- [43] AFAD – Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2023). Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi, AFAD-TADAS, <https://tadas.afad.gov.tr>
- [44] Ancheta, T., et al., [2013], "PEER NGA-West2 Database," Report No. PEER 2013/03, University of California, Berkeley, May.