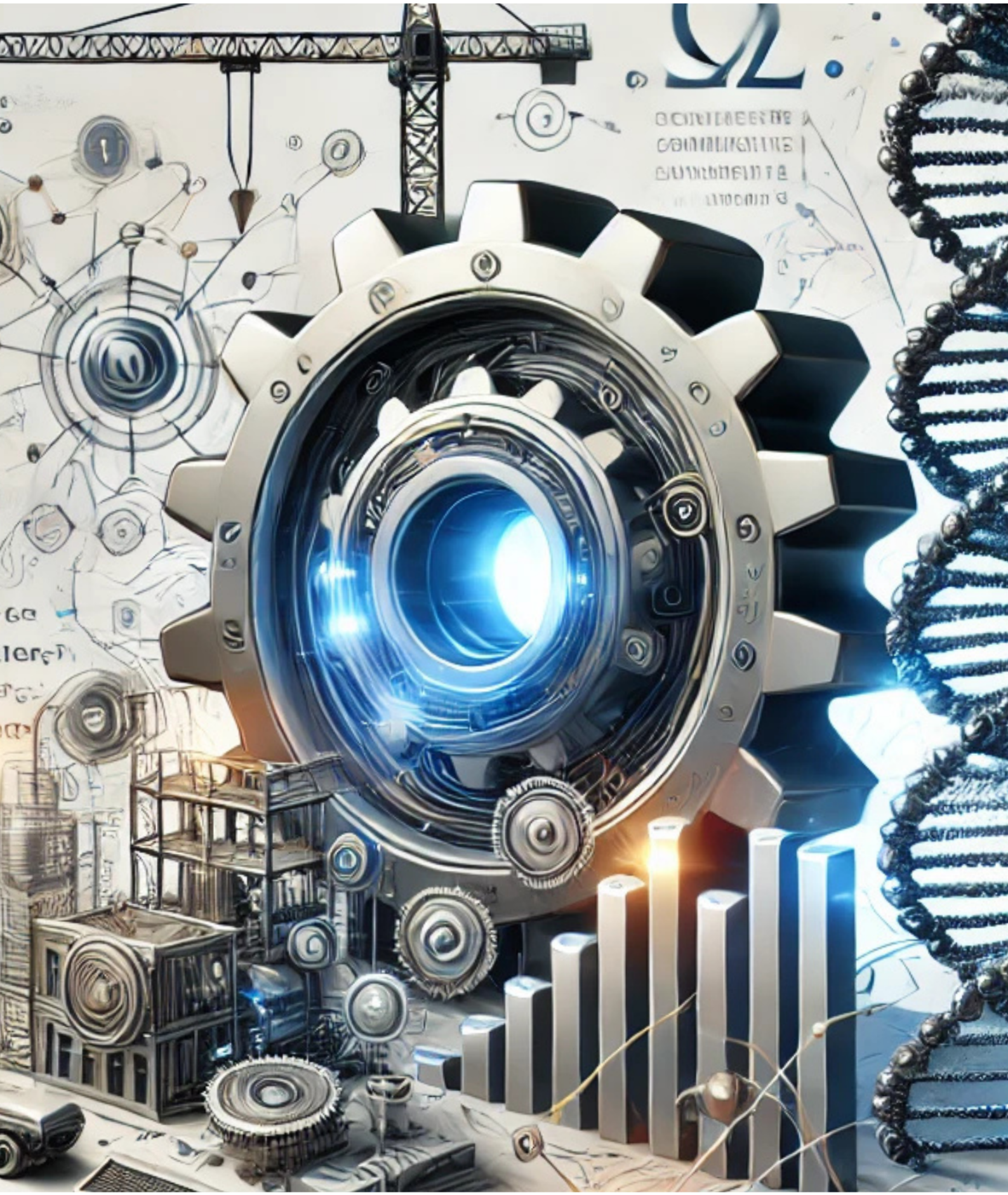
Enginoscope
ISSN: 3062-2360 enginoscope.org
January 2025
Volume: 1
Issue: 1



Erciyes University Faculty of Engineering Publications
mf.erciyes.edu.tr

Enginoscope

Volume:1, Issue:1, January 2025

Masthead of the Issue

Privileged Ownership:

- Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER – Dean of Erciyes University Faculty of Engineering

Editor In Chief:

- Assoc. Prof. Dr. Mehmet Çağrı SOYLU – Erciyes University

Associate Editors

- Assoc. Prof. Dr. Munise Didem DEMİRBAŞ, Mechanical Engineering - Erciyes University
- Assoc. Prof. Dr. Rüştü AKAY,Mechatronics Engineering – Erciyes University
- Assoc. Prof. Dr. Levent LATİFOĞLU, Civil Engineering - Erciyes University
- Assoc. Prof. Dr. Murat PEKER, Mechatronics Engineering - Bursa Technical University
- Asst. Prof. Dr. Sümeyye ÜSTÜNTAĞ, Textile Engineering Erciyes University
- Res. Asst. Dr. Derya DİNÇYÜREK EKİCİ, Nanotechnology Engineering - Abdullah Gül University

Section/Subject Editors

Energy Systems Engineering

- Prof. Dr. Gamze GENÇ – Erciyes University

Mechatronics Engineering

- Assoc. Prof. Dr. Muzaffer KANAAN – Erciyes University
- Prof. Dr. Marek KUBALCIK (Zlin Tamas Bata University / CZECH)
- Prof. Dr. Eurico SEABRA (University of Minho / PORTUGAL)

Textile Engineering

- Assoc. Prof. Dr. Gülhan GÜLER – Erciyes University
- Prof. Dr. Simon HARLOCK (University of Leeds)

Materials and Metallurgical Engineering

- Asst. Prof. Dr. Selda TOPÇU ŞENDOĞDULAR – Erciyes University

Electrical and Electronics Engineering

- Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA – Erciyes University

Biomedical Engineering

- Prof. Dr. Semra İÇER – Erciyes University

Food Engineering

- Prof. Dr. Mustafa ÇAM – Erciyes University

Geomatic Engineering

- Assoc. Prof. Dr. Ümit Haluk ATASEVER – Erciyes University
- Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif GÜNEN (Gümüşhane University)

Software Engineering

- Asst. Prof. Dr.Murat AKPULAT – Erciyes University
- Asst. Prof. Dr.Sibel ARSLAN (Sivas Cumhuriyet University)

Industrial Engineering

- Prof. Dr. Lale ÖZBAKIR – Erciyes University
- Prof. Dr. Erkan KÖSE (Nuh Naci Yazgan University)

Environmental Engineering

- Assoc. Prof. Dr. Kadir ULUTAŞ (Istanbul Medeniyet University)
- Asst. Prof. Dr. Dilşad ÖZTÜRK – Erciyes University

Civil Engineering

- Prof. Dr Zülküf KAYA – Erciyes University
- Prof. Dr. Murat ÖRNEK (İskenderun Technical University)

Mechanical Engineering

- Assoc. Prof. Dr Toygun DAĞDEVİR – Erciyes University

Industrial Design Engineering

- Asst. Prof. Dr. Esra AKGÜL – Erciyes University

Computer Engineering

- Prof. Dr Bahriye AKAY – Erciyes University
- Prof. Dr. Fatih ÖZKAYNAK (Fırat University)

Editorial Secretary:

Res. Ass. Mehmet SARITAŞ – Erciyes University

Language Editors:

Turkish:

Asst. Prof. Dr.Merve TEMİZYÜREK ARSLAN – Erciyes University

Asst. Prof. Dr.Fatma Özge ÖZKÖK – Erciyes University

Asst. Prof. Dr. Nazlı TEKİN – Erciyes University

English:

Asst. Prof. Dr. Fatih YILMAZ – Erciyes University

Asst. Prof. Dr. Mehmet ÇELİK – Erciyes University

Layout Editors:

Res. Asst. Hüseyin Hilmi ASLANBAY (Chairman of the Board of Layout Editors) – Erciyes University

Res. Asst. Erdemhan ÖZDİN – Erciyes University

Res. Asst. Berfin İlayda ÖZTÜRK – Erciyes University

Res. Asst. Hacer Merve TAÇGÜN – Erciyes University

Technical Support:

Res. Asst. Fuat TÖRE – Erciyes University

Res. Asst. Furkan BAĞIRGAN – Erciyes University

Reviewers of the Issue:

Asst. Prof. Fatih YILMAZ – Erciyes University

Res. Asst. Melis TOKMAK – Erciyes University

Res. Asst. Dr. Derya DİNÇYÜREK EKİCİ - Abdullah Gül University

Asst. Prof. Yusuf Şahin – Niğde Ömer Halisdemir University

Assoc. Prof. İsmail İsa ATABEY – Nevşehir Hacı Bektaş Veli University

Res. Asst. Mehmet SARITAŞ – Erciyes University

Assoc. Prof. Umut ÇALIŞKAN – Erciyes University

Table of Contents

Pages	Title	Article Type
1-12	AI-Assisted Fungal Infection Detection Using Impedimetric Odour Biosensors	Research
13-23	Kol-Kızak Mekanizmasında 3B Yazıcı ile Farklı Üretim Parametrelerine Sahip Krankların Dinamik Performansa Etkisi: YSA Tabanlı Bir Analiz	Research
24-43	Takviyeli Hibrit Kompozit Levhaların Termomekanik Davranışının Sayısal Olarak Araştırılması	Research
44-59	Sürdürülebilir Geopolimer Harçların Yaşam Döngüsü ve Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi: Farklı Senaryolar Üzerine Bir Çalışma	Research
60-75	Design of A Novel Device Measuring Testicular Consistency, Size and Temperature and Classification Algorithm Analysis of Data Compared to Urologist Examinations	Research

Erciyes Üniversitesi
Enginoscope Dergisi
Cilt 1, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Enginoscope Journal
Volume 1, Issue 1, 2025

AI-Assisted Fungal Infection Detection Using Impedimetric Odour Biosensors

Efe Kayra Soylu[1], Soukaina Safi[2], Mustafa Altay Atalay[3], Murat Peker[*4]

[1] Doğa Schools Kayseri Science High School, Kayseri, 38150, Türkiye
[2] Erciyes University Department of Biomedical Engineering, Kayseri, 38140, Türkiye
[3] Erciyes University Faculty of Medicine, Kayseri, 38140, Türkiye
[*4] Bursa Technical University Department of Mechatronics Engineering, Bursa, 16310, Türkiye
*Corresponding Author: Murat Peker

(Alınış / Received: 11.12.2024, Kabul / Accepted: 02.01.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 31.01.2025)

Keywords
Fungal Infection,
Impedimetric Biosensor,
Electronic Nose,
Artificial Intelligence

Abstract: Yeast infections have been widely recognized and if no quick and accurate treatment method is applied, they can be very dangerous and might even turn into death. In comparison with old-fashioned diagnostic solutions such as Culturing, which takes around one to three days to reveal yeast infections, rapid and effective treatment is often not initiated. In the current study a novel method is offered involving the extraction of yeast fungal strain identification in a rapid, cost-effective, and accurate way. Through the application of a gelatin-based hydrogel coating that represents the way in which odor receptors attach to cells a sensing concept for impedimetric odor was constructed. The hydrogel was further improved by adding glycerol for its structural stability and graphite powder for its better conductivity. The process of making a sensor involved applying the modified hydrogel to wires made of copper. The sensor was then exposed to the odor molecules from culture tests of *Candida albicans, Candida glabrata, and Candida tropicalis*, which were placed in a controlled environment. Changes in impedance took place, and these measurements were analyzed using a Random Forest machine learning algorithm that helped to get 94% classification success. This new testing process may lead to a revolution in the era of clinical diagnostics. It will enable speediness, simplicity, as well as precision in the detection of yeast fungal infections, which, in turn, will decrease health risks leading to unnecessary treatment costs by approved drug companies.

İmpedimetrik Koku Biyosensörü ile Yapay Zekâ Destekli Mantar Enfeksiyonu Tespiti

Anahtar Kelimeler
Mantar Enfeksiyonu,
İmpedimetrik Biyosensör,
Elektronik Burun,
Yapay Zeka

Öz: Mantar enfeksiyonları oldukça yaygın olmakla birlikte, hızlı ve doğru bir tedavi yöntemi uygulanmazsa çok tehlikeli sonuçlara ve hatta ölüme bile yol açabilmektedir. Mantar enfeksiyonunu teşhis etmek için günümüzde kullanılan, yaklaşık bir ila üç gün sürebilen kültürleme gibi eski moda teşhis çözümleri hızlı ve etkili tedavi imkanını kısıtlamaktadır. Çalışmamızda hızlı, uygun maliyetli ve doğru bir şekilde mantar suşlarının tespit ve sınıflandırılmasını içeren yeni bir yöntem sunulmaktadır. Koku reseptörlerinin, koku molekülleri ile bağlanmasını taklit eden jelatin bazlı bir hidrojel kaplamanın iletken bir bakır tele uygulanmasıyla, koku tespiti için impedimetrik bir algılama konsepti oluşturulmuştur. Hidrojel elektrolit, yapısal kararlılığı için gliserol ve daha iyi iletkenliği için grafit tozu eklenerek daha da geliştirilmiştir. Sensör fabrikasyonu ise modifiye edilmiş hidrojelin, bakırdan yapılmış tellere uygulanması ile yapılmıştır. Sensör yapısı kontrollü bir ortama yerleştirilen *Candida albicans, Candida glabrata ve Candida tropicalis* kültür testlerinden gelen koku moleküllerine maruz bırakılmıştır. Hidrojel yapısında meydana gelen empedans değişikliklerinin Random Forest makine öğrenme algoritmasıyla sınıflandırılmasıyla %94 sınıflandırma başarısı ile enfeksiyonlar

tespit edildi. Bu yeni koku biyosensörü, yerinde teşhis çağında bir devrime yol açabilecek potansiyele sahiptir. Mantar enfeksiyonlarının hızlı, basit ve hassas şekilde tespiti ve sınıflandırılması ile gereksiz tedavi maliyetleri düşürülecek ve sağlık riskleri azaltılacaktır.

1. Introduction

A fungal infection is a health problem caused by fungal species such as Candida and Aspergillus. In individuals with weakened immune systems, these infections can be more serious and have a systemic effect. For instance, HIV/AIDS patients, cancer patients receiving chemotherapy and individuals exposed to long-term antibiotic use are particularly at risk [8].Furthermore, Fungal infections have become a major health problem worldwide [11]. with a significant prevalence reported in immunocompromised individuals [11]. reported that HIV/AIDS patients, organ transplant recipients and individuals exposed to long-term steroid use are at a higher risk of fungal infections. A study from developing countries shows that fungal infections due to Candida species are particularly high [1]. Candida is a common fungus that can cause infections of the skin, mouth, nails and genitals [1]. Such infections are more common in individuals with weakened immune systems and can lead to serious complications [11].

A number of methods are used in the diagnosis of fungal infections and this process involves several challenges. Diagnosis Typically includes an accurate assessment of symptoms, examination of the clinical picture and the use of laboratory tests [15] . Especially in immunocompromised patients, symptoms can often be vague, making diagnosis difficult [15]. Clinical assessments include taking the patient's history and physical examination, as well as identifying symptoms, which vary depending on the specific type of fungus [22] . However, these methods alone are not sufficient and laboratory tests are often added to the diagnostic process.

Laboratory diagnosis of fungal infections usually involves microscopy, culture and molecular methods [22]. In some cases, extra methods such as microscopy and culture are time-consuming and the results are sometimes uncertain [23]. Furthermore, the specific diagnosis can be further complicated by the more serious nature of the infection, especially in immunocompromised patients [23]. Despite these challenges, accurate and rapid diagnosis of fungal infections is important for effective treatment and disease control. Research is focusing on improving diagnostic methods and developing new diagnostic tools, which could lead to the development of more effective control strategies against fungal infections.

In recent years, there have been significant developments in the methods used in the diagnosis of fungal infections and innovative approaches in this field have come to the forefront [5]. In particular, molecular biology and genetics-based diagnostic methods have emerged as an alternative to traditional microbiological methods [7]. Molecular diagnostic methods are usually based on the identification of fungal DNA and allow for a faster and more accurate recognition of the disease[5]. PCR (Polymerase Chain Reaction) based methods provide high sensitivity in identifying specific causes of disease [17]However, these methods often have challenges, such as being expensive and requiring expertise[7]. Furthermore, rapid diagnostic tests developed as an alternative to culture-based methods have also made significant progress[18]. These tests allow for faster diagnosis of the infection, but may have some limitations in identifying specific fungal species [27]. Challenges of new diagnostic methods include factors such as lack of standardization, cost, and widespread applicability [25]. Therefore, further research and development is needed before these techniques can be used effectively in clinical practice.

In addition to traditional methods for diagnosing fungal infections, electronic nose technologies have gained attention for their potential to provide rapid and accurate diagnoses [28]. These artificial sensory systems detect specific odor profiles of biological materials. A major challenge in this field is the cost of applying a bio-sensing surface specific to odor molecules to simulate the olfactory mechanism. Gelatin, an amino acid-rich protein, can simulate the amino acid content of olfactory receptors, making it a suitable artificial odor receptor [12]. Studies indicate that odor molecules bind to odor receptors via ionic and hydrogen bonds, mediated by functional groups on amino acids at the binding site [2].

Electronic noses can identify specific markers of fungal infections by detecting metabolic products or volatile organic compounds, offering faster results than traditional microbiological culture techniques [24, 20]. However, these methods face limitations in detecting a broad spectrum of fungi, lack standardization, and are costly, hindering widespread adoption [20, 16]. Further research is needed to improve standards, specificity, and cost-effectiveness.

Electronic nose (eNose) technologies offer non-invasive, rapid, and real-time diagnostics by analyzing complex odor profiles, making them ideal for disease detection and monitoring. Unlike traditional tools, eNoses utilize sensor arrays and pattern recognition algorithms to identify a wide range of volatile organic compounds (VOCs) and physiological indicators. Their applications span food quality, environmental monitoring, and medical diagnostics. While challenges like selectivity, humidity sensitivity, and achieving human-nose-level sensitivity remain, advancements in sensor technology and intelligent algorithms promise broader clinical integration and enhanced diagnostic precision[30].

AI integration has advanced electronic nose methods for fungal infection diagnosis, addressing specificity issues in distinguishing similar odors [29]. AI algorithms enhance the ability of electronic noses to identify characteristic odors of specific fungal infections, increasing diagnostic sensitivity [26, 11]. For instance, machine learning algorithms have demonstrated improved discrimination of *Candida* species compared to other microorganisms [3]. Although promising, this field requires further development to address challenges such as standardization, scalability, and differentiating between fungal types.

Building on the potential of AI in enhancing electronic nose specificity, recent research highlights the efficiency of classification algorithms like Random Forest (RFC) in handling imbalanced datasets. RFC has demonstrated superior performance in classifying binary and multi-class datasets, particularly in mushroom classification tasks. Studies reveal that RFC outperforms other decision tree-based algorithms, such as Reduced Error Pruning (REP) Tree, in terms of accuracy, precision, and sensitivity [19, 22]. Ensemble methods, including Bagging, Boosting, and RFC, also show that RFC consistently delivers the highest accuracy in determining mushroom edibility and toxicity [23].

The focus of this project is to classify these different environments with machine learning algorithms (Random Forest and K-Nearest Neighbor), using as data the impedance differences caused by three different yeast fungi and air environments in the impedimetric odor sensor. This classification focuses on the detailed analysis of the features of the samples and the accurate discrimination between different classes. It is also aimed to compare the performance of these two algorithms to determine which one performs better in classification[4].

The aim of the project is to diagnose fungal infection by measuring the sensor impedance change caused by the interaction of odor molecules, which occur as a result of fungal infection and exhibit different molecular structure according to the type of fungus causing the infection, with the impedimetric odor sensor created with copper wires coated with gelatin-based coating, and classifying these data with artificial intelligence.

Since different odor molecules bind to the gelatin-based layer in different ways, the electrical properties and therefore the impedance of the copper wire and the gelatin-based layer on it were different. Taking advantage of these differences, the impedance of the copper wire with the gelatin layer was measured with an impedance analyzer capable of applying oscillatory signals with different frequencies in the range of 0.1–1 MHz, and the data were classified by artificial intelligence to classify the type of mushrooms with different odors.

2. Material and Methods

This study aims to develop an impedance-based method for the classification of yeast species (*Candida albicans, Candida tropicalis, Candida glabrata*, and air) By using AI Tools and machine learning models. The methodology involves the preparation of gelatin-based hydrogel coatings, impedance measurement using an AIM4300 impedance analyzer, feature extraction and selection, and the setup of machine learning models (k-NN and Random forest) for classification.

2.1. Gelatin-Based Hydrogel BioSensor Preparation

The gelatin-based hydrogel coating was prepared using a simple method. 1 g gelatin (Dr. Oetker, 100% Bovine Gelatin), 1 ml glycerol (Merck, Vegetable origin) and 0.5 g graphite powder were mixed in 10 ml distilled water at 40°C and 70 wires cut from copper wires with a copper diameter of 0.25 mm and a length of 10 cm were soaked in the gelatin-based mixture for 2 minutes. After this process, the gelatin-based coated wires were suspended to dry at room temperature and dried for 1 day.

2.2. Yeast Fungus Samples

The study utilized yeast samples from the Candida genus, including *Candida albicans (CA), Candida tropicalis (CT) and Candida glabrata* (CG) strains. The samples were obtained from Erciyes University Medical Faculty Medical Microbiology Laboratory in culture medium in petri dishes. The relevance of these strains lies in their clinical significance as pathogens, making them suitable for developing diagnostic techniques through impedance spectroscopy.

2.3. Impedance Measurement:

We used the AIM4300 impedance analyzer for impedance measurements. In each petri dish, copper wires with gelatin-based coating suspended in air were exposed to this environment for 5 minutes, provided that they did not touch the yeast fungi culture and the petri dish was closed. A total of 67 impedance measurements were then made, 26 for CA, 13 for CT, 13 for CG and 15 measurements in the empty petri dish. Impedance measurements were performed with an impedance analyzer generating a 1 V oscillatory AC signal with a frequency increment of 1 kHz in the frequency range of 100 kHz - 1 MHz. In each impedance measurement, resistance, reactance and phase angle values were recorded for 1000 different frequency values. In total, 67 different impedance measurements were made with 67 different wires. Figure 1 shows the measurement system.

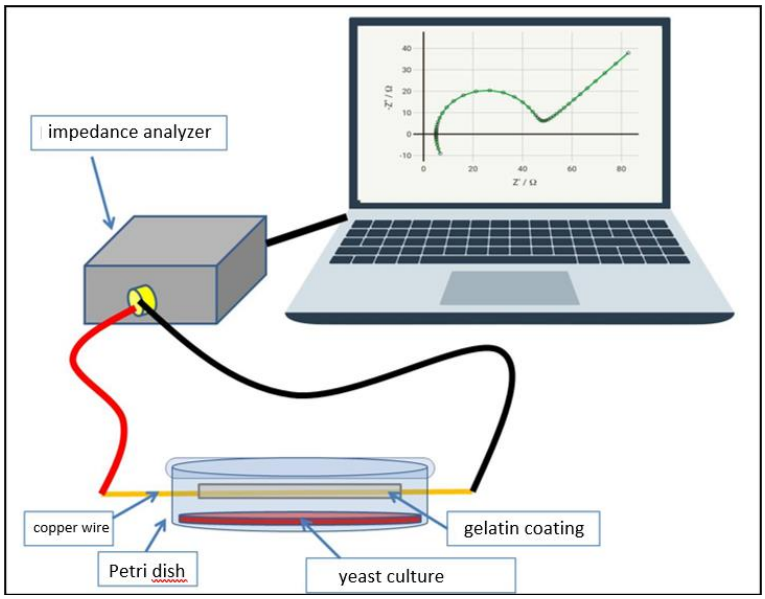


Figure 1. Impedance measurement system of copper wire with gelatin-based coating

Environmental conditions such as temperature and humidity are critical factors that can interfere with impedance measurements by altering the sensor's electrical properties and the behavior of odor molecules. In our study, since it was conducted in a controlled laboratory setting, temperature and humidity were maintained at stable levels to minimize any potential interference. This controlled environment ensures that the results primarily reflect the sensor's interaction with the target molecules rather than environmental variability.

However, for clinical or field applications, where environmental factors cannot always be controlled, it is

essential to characterize and understand their impact on impedance measurements. Before transitioning to clinical applications, further studies should be conducted to evaluate the sensor's performance under varying environmental conditions and to develop methods to compensate for or mitigate such interferences. For this study, the focus remained on demonstrating the sensor's performance under ideal, controlled conditions rather than addressing these environmental challenges.

2.4. Feature Extraction and Selection

The Impedance data collected from yeast fungus samples and air was processed to find important features needed for classification. Each .csv file held 1000 data points. These data points matched different frequency values. They included parameters like phase angle, resistance and reactance. These features represent the basic resistance properties of the fungus types and the air samples.

The raw data files were read sequently using Python's pandas library. The data then converted into DataFrames for preprocessing. to ensure consistency, numbers with commas as decimal separators were standardized to dots. They converted into floating-point numbers. Subsequently, the data from each species (*Candida albicans, Candida glabrata, Candida tropicalis, and air*) were merged into distinct NumPy arrays for efficient processing. These arrays were combined into a single dataset (X) to enable comparative analysis of impedance features across classes.

Feature selection was implicitly applied by focusing on the most relevant impedance parameters: phase angle, resistance, and reactance. This approach ensured that only the critical attributes required for machine learning were retained while reducing redundancy. Additionally, a label vector (Y) was generated, categorizing the samples into four classes: *Candida albicans, Candida glabrata, Candida tropicalis, and air*. This step organized the dataset for subsequent classification and analysis, facilitating the effective application of machine learning algorithms.

This streamlined approach to feature extraction and selection enabled the creation of a structured dataset that encapsulated the distinguishing characteristics of the fungal species and air, forming the foundation for the classification task.

SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique): The data augmentation method creates synthetic samples to increase the number of samples in the minority class. Instead of randomly copying minority instances, this technique generates new instances using the neighborhoods found between minority class instances. SMOTE is a frequently used balancing method with different studies and modifications. Traditional SMOTE creates synthetic samples by generating random samples between minority class instances and their nearest neighbors (Liu et al., 2024). As can be seen in Figure 2, the dataset is balanced with the SMOTE technique. [23].

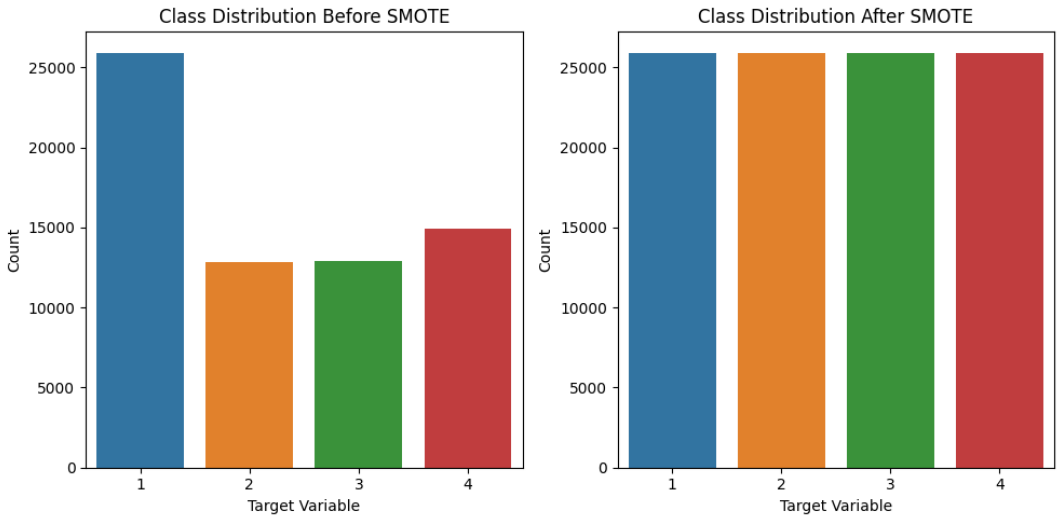


Figure 2. Equalizing the data distribution of classes, before and after SMOTE

2.5. Proposed Methods:

The classification model selection focused on using Random Forest and K-Nearest Neighbor (K-NN) classifiers because of their effectiveness with high-dimensional data and their robust handling of noise and overfitting. Here's a detailed explanation of each of the used models:

2.5.1. Random Forest Classifier:

Random Forest is a learning method that builds many decision trees during training. It then chooses the class that appears most often for classification or the average prediction for regression from these trees. Each tree uses different parts of the data and different features are picked randomly at each decision point.[4]

Experts selected the Random Forest model for its strong ability to work with large and complex datasets. Our impedance data fits this description. This model works well with high-dimensional data. It reliably classifies information even when there is noise or many unnecessary features. The model reduces overfitting by averaging predictions from various trees. Overfitting becomes less of an issue through this process[14].

2.5.2. K-Nearest Neighbor (K-NN) Classifier:

K-NN uses simple rules to learn by examples. It guesses the group of a new item by checking nearby data points. The algorithm finds its k nearest neighbors, where k is a number set by users. The new item gets the group that most of these neighbors belong to[10].

K-NN is often picked because of its simplicity and strength in recognizing patterns. It does not need any special modeling rules. This is very helpful with data that have tricky boundaries that are hard to separate using straight lines. In our study, the dataset is small. K-NN probably is a straightforward choice for grouping samples by likeness[10].

2.6. Set-up the Models:

Two classification models, Random Forest and K-Nearest Neighbor (K-NN), were used for the task. The dataset split into training and testing sets with a stratified 80-20 ratio. The class proportions stayed consistent across both sets.

Random Forest Model:

The Random Forest classifier used 100 estimators. Hyperparameter tuning happened with Grid Search Cross-Validation to find the best settings like the number of estimators and the maximum depth of decision trees. This method was chosen for its ability to work with high-dimensional data and very effectively deal with noise. It really helps stop overfitting with its ensemble method.

K-NN Model:

The K-NN algorithm checked how well it worked by testing different values of K, which is the number of neighbors it looks at for sorting. First, k=1 was used. Cross-validation then helped find the best K value. Confusion matrices showed how many correct and incorrect guesses the model made for each type. To improve the KNN model's performance, hyperparameter tuning was implemented by testing a range of k values, to determine the optimal number of neighbors for the model. This process involved iteratively training the KNN model with different k values, predicting outcomes on the test set, and calculating the accuracy for each configuration. The k value that produced the highest accuracy was selected as the optimal parameter, ensuring the model's performance was maximized. [32].

Training Process:

The models went through training and checking many times to improve their performance and get better accuracy on the test group. Metrics like accuracy, precision, recall, F1-score and confusion matrix used to judge

how well the model told different fungal species apart using the impedance data. It really gave a full look at how the classifiers worked.

3. Results

3.1. Random Forest Classification Results

The classification report shows the accuracy, precision, recall and F1-score of the model for each class. In this case, the weighted average accuracy was 0.94 (94%), indicating a very high accuracy of classification. Precision indicates how accurate the prediction of a particular class is in the cases where it is predicted. For example, the precision for class 0, CA, is 97%. 97% of the instances predicted by the model in class 0 actually belong to class 0 (CA). This report shows that our model performs well overall, with high precision, sensitivity and F1-score, especially in classes 0 (CA) and 2 (CT). However, there is some accuracy degradation in the 1st (CG) and 3rd (Air) classes, and these classes show lower performance.

Table 1 shows the classification report of the Random Forest model and Figure 3 shows the confusion matrix.

Table 1. Classification report obtained from random forest model

	Precision	recall	F1-score	support
Class 0	0.971445	0.969549	0.970496	5123
Class 1	0.863402	0.907157	0.884739	2585
Class 2	0.975126	0.971727	0.973424	2582
Class 3	0.926511	0.892196	0.909030	3024
Accuracy			0.94	13314
Macro avg	0.93	0.94	0.93	13314
Macro avg	0.94	0.94	0.94	13314

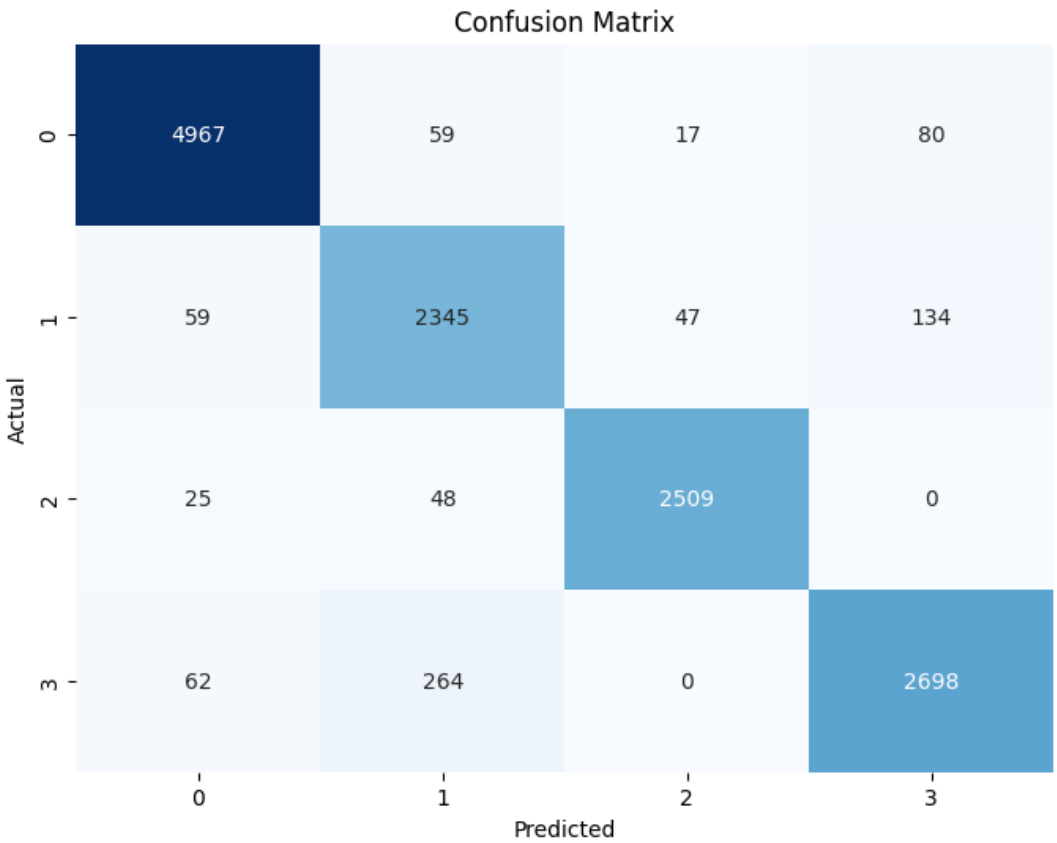


Figure 3. Confusion matrix in the random forest classification model

After hyperparameter tuning with the Grid research method, we also observed some small improvements. In particular, we can see slight changes in the precision and recall values for some classes. For example, for class 1 (CG), we observe an increase in recall and a decrease in precision (Table 2).

Table 2. Random Forest classification report after Grid search method

	Precision	recall	F1-score	support
Class 0	0.97	0.97	0.97	5123
Class 1	0.85	0.93	0.89	2585
Class 2	0.98	0.97	0.97	2582
Class 3	0.94	0.88	0.91	3024
Accuracy			0.94	13314
Macro avg	0.94	0.94	0.94	13314
Macro avg	0.94	0.94	0.94	13314

From these findings, we conclude that the base case of our Random Forest classification model performs reasonably well and can be slightly improved by hyperparameter tuning, but that these improvements do not make a significant difference.

3.2. K-NN Classification Results:

Table 3. Classification report obtained from the K-NN model

	Precision	recall	F1-score	support
Class 0	0.89	0.90	0.90	5123
Class 1	0.75	0.79	0.77	2585
Class 2	0.94	0.97	0.97	2582
Class 3	0.83	0.79	0.81	3024
Accuracy			0.86	13314
Macro avg	0.85	0.85	0.85	13314
Macro avg	0.86	0.86	0.86	13314

Considering the weighted average accuracy in Table 3, 0.86 (or 86%) seems to be a high accuracy, but it is low compared to Random Forest. Although it performs particularly well for class 0 (CA) and class 2 (CT), it performs relatively poorly for class 1 (CG) and class 3 (Air).

When the confusion matrix in Figure 4 is examined, it is seen that misclassifications increase.

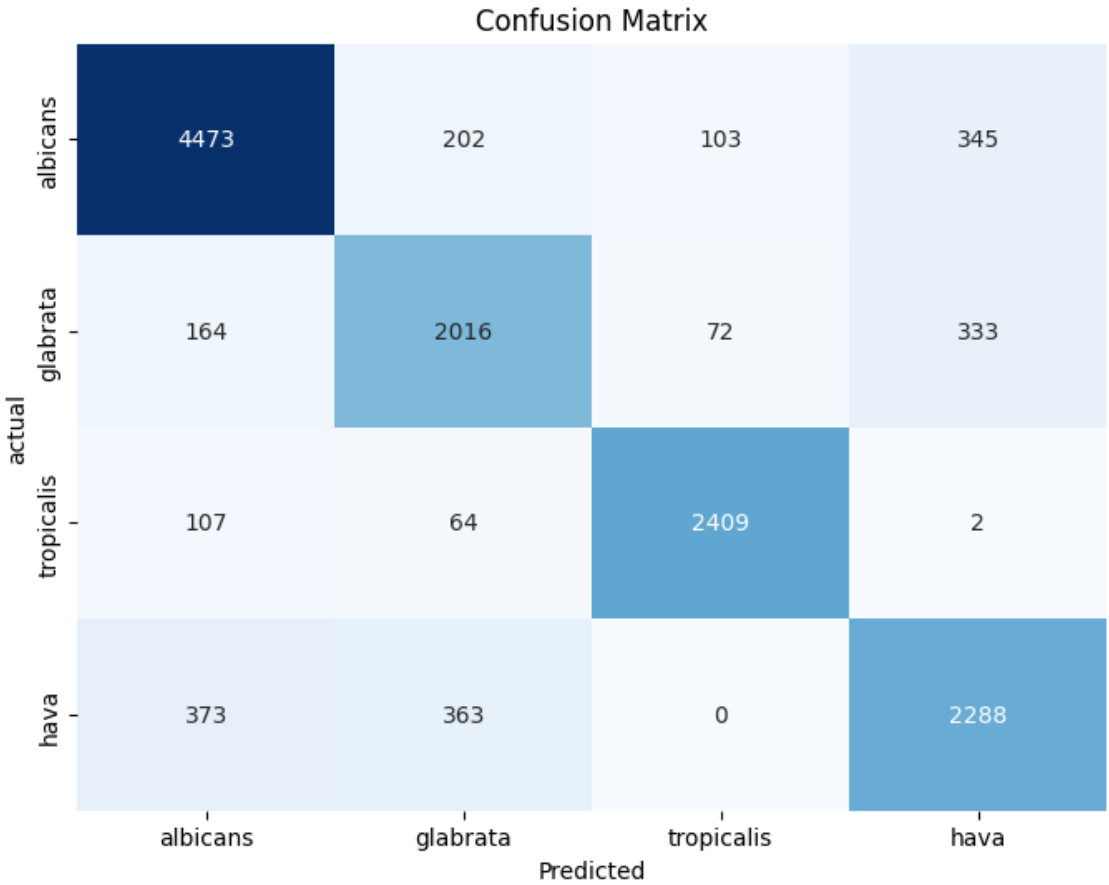


Figure4. Confusion matrix of the KNN classification model

Again, after hyperparameter tuning with the Grid Search method, we couldn't observe any significant improvements beyond small and statistically insignificant differences. Here, we can conclude that the k-nearest neighbor (KNN) algorithm struggled to enhance classification performance due to its inherent limitations, particularly with imbalanced or complex datasets [31].

4. Discussion and Conclusion

The results obtained show promise for predicting which strain of yeast fungus is responsible for infections caused by yeast fungi and for making accurate diagnoses. Considering the simplicity, cheapness, implementation time and speed of the sensor, as well as the accuracy of the classification system, it is thought to have the potential to be used in determining the type of yeast fungal infections and even in other applications where similar electronic nose applications would be advantageous[14,30]. The results obtained for the performance of Random Forest and KNN models reflect the different advantages and disadvantages of each model.

Random Forest:

- Random Forest is a powerful model that generally gives very good results when configured correctly and is resistant to overfitting in many cases.
- Our results show that the Random Forest model has high accuracy and good performance in general. In particular, the high precision and sensitivity values for class 0 (CA) and class 2 (CT) demonstrate the model's ability to accurately predict these classes.
- However, it is also observed that the performance for class 1 (CG) and class 3 (Air) is relatively poor compared to the other classes. However, given the limited number of training data sets, the model can be improved.

KNN:

- KNN is a model characterized by its simple structure and easy comprehension. However, these advantages apply to large data sets.
- The performance of KNN is lower than that of Random Forest. In particular, the low precision and sensitivity values for class 1 (CG) and class 3 (Air) indicate that the model tends to mispredict these classes.

A complex model like Random Forest performed quite well. This is because Random Forest is generally a model that can give good results in large datasets by taking into account the interactions of different features and is resistant to overfitting. In general, our results emphasize that the Random Forest model has high accuracy rates and good performance and show that with this sensor system and classification model, fungal strains that cause yeast infection in humans can be diagnosed by odor[04].

Optimization of the sensor system was not performed within the scope of this project. With optimization, electronic nose biosensors can be developed to obtain more accurate and sensitive results by increasing the type and size of the conductive material as well as the quality and specificity of the gelatin-based coating.

By increasing and diversifying the volume of the data set, the accuracy and precision in the classification phase can be increased. In addition, testing with different classification models will be beneficial in determining the most appropriate result.

To adapt this sensor and modeling system for clinical use, several enhancements are essential. First, the sensor requires optimization to achieve clinical-grade performance by improving the specificity and sensitivity of the gelatin-based hydrogel coating, potentially through advanced conductive materials or hybrid biocompatible coatings tailored for fungal detection. The system must also be miniaturized and integrated into portable devices for point-of-care diagnostics[34]. Adherence to clinical regulatory standards, such as ISO 13485, is crucial to ensure safety, efficacy, and reproducibility[33]. Expanding the dataset to include diverse patient samples and fungal strain variants will enhance the model's robustness and generalizability. Furthermore, the classification models should undergo rigorous validation on large, independent clinical datasets to ensure reliable performance. The system interface should be user-friendly, with automated reporting for clinicians, and it should integrate seamlessly with hospital electronic health records (EHR) for efficient data logging and management. Finally, ensuring cost-effectiveness in manufacturing and operation is vital for widespread adoption in healthcare settings. Addressing these aspects will enable this biosensor and modeling system to become a viable clinical tool for diagnosing yeast fungal infections and other applications.

References

[1] Benedict, K., Richardson, M., Vallabhaneni, S., Jackson, B. R., & Chiller, T. (2017). Emerging issues, challenges, and changing epidemiology of fungal disease outbreaks. The Lancet Infectious Diseases, 17(12), e403-e411. doi: 10.1016/S1473-3099(17)30443-7

[2] Billesbølle, C. B., de March, C. A., van der Velden, W. J. C., Ma, N., Tewari, J., del Torrent, C. L., . . . Manglik, A. (2023). Structural basis of odorant recognition by a human odorant receptor. Nature, 615(7953), 742-749. doi: 10.1038/s41586-023-05798-y

[3] Borowik, P., Adamowicz, L., Tarakowski, R., Wacławik, P., Oszako, T., Ślusarski, S., & Tkaczyk, M. (2021). Development of a low-cost electronic nose for detection of pathogenic fungi and applying it to Fusarium oxysporum and Rhizoctonia solani. Sensors, 21(17), 5868.

[4] Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45, 5-32.

[5] Bretagne, S. (2010). Advances and prospects for molecular diagnostics of fungal infections. Current infectious disease reports, 12(6), 430-436.

[6] Brown, G. D., Denning, D. W., Gow, N. A., Levitz, S. M., Netea, M. G., & White, T. C. (2012). Hidden killers: human fungal infections. Sci Transl Med, 4(165), 165rv113. doi: 10.1126/scitranslmed.3004404

[7] Fang, W., Wu, J., Cheng, M., Zhu, X., Du, M., Chen, C., . . . Pan, W. (2023). Diagnosis of invasive fungal infections: challenges and recent developments. Journal of Biomedical Science, 30(1), 42.

[8] Garber, G. (2001). An overview of fungal infections. Drugs, 61 Suppl 1, 1-12. doi: 10.2165/00003495-200161001-00001

[9] Gupta, A. K., Chakroborty, S., Ghosh, S. K., & Ganguly, S. (2023). A machine learning model for multi-class classification of quenched and partitioned steel microstructure type by the k-nearest neighbor algorithm. Computational Materials Science, 228, 112321.

[10] Gupta, A. K., Versteeg, S. G., & Shear, N. H. (2017). Onychomycosis in the 21st Century: An Update on Diagnosis, Epidemiology, and Treatment. J Cutan Med Surg, 21(6), 525-539. doi: 10.1177/1203475417716362.

[11] Haghbin, N., Bakhshipour, A., Mousanejad, S., & Zareiforoush, H. (2023). Monitoring Botrytis cinerea infection in kiwifruit using electronic nose and machine learning techniques. Food and Bioprocess Technology, 16(4), 749-767.

[12] Hermanto, S., Sumarlin, L., & Fatimah, W. (2013). Differentiation of Bovine and Porcine Gelatin Based on Spectroscopic and Electrophoretic Analysis. Journal of Food and Pharmacetical Science 1 (2013) 68-73, 1, 68-73.

[13] Josso, P., Hall, A., Williams, C., Le Bas, T., Lusty, P., & Murton, B. (2023). Application of random-forest machine learning algorithm for mineral predictive mapping of Fe-Mn crusts in the World Ocean. Ore Geology Reviews, 105671.

[14] Lass-Flörl, C. (2017). Current challenges in the diagnosis of fungal infections. Human Fungal Pathogen Identification: Methods and Protocols, 3-15.

[15] Liu, D., Zhong, S., Lin, L., Zhao, M., Fu, X., & Liu, X. (2024). Feature-level SMOTE: Augmenting fault samples in learnable feature space for imbalanced fault diagnosis of gas turbines. Expert Systems with Applications, 238, 122023.

[16] Makarichian, A., Chayjan, R. A., Ahmadi, E., & Zafari, D. (2022). Early detection and classification of fungal infection in garlic (A. sativum) using electronic nose. Computers and Electronics in Agriculture, 192, 106575.

[17] McCarthy, M. W., & Walsh, T. J. (2016). PCR methodology and applications for the detection of human fungal pathogens. Expert Review of Molecular Diagnostics, 16(9), 1025-1036.

[18] Mendonca, A., Santos, H., Franco-Duarte, R., & Sampaio, P. (2022). Fungal infections diagnosis-past, present and future. Research in Microbiology, 173(3), 103915.

[19] More, A. S., & Rana, D. P. (2022). Performance enrichment through parameter tuning of random forest classification for imbalanced data applications. Materials Today: Proceedings, 56, 3585-3593.

[20] Mota, I., Teixeira-Santos, R., & Rufo, J. C. (2021). Detection and identification of fungal species by electronic nose technology: A systematic review. Fungal Biology Reviews, 37, 59-70.

[21] Pappas, P. G., Kauffman, C. A., Andes, D. R., Clancy, C. J., Marr, K. A., Ostrosky-Zeichner, L., . . . Walsh, T. J. (2016). Clinical practice guideline for the management of candidiasis: 2016 update by the Infectious Diseases Society of America. Clinical Infectious Diseases, 62(4), e1-e50.

[22] Paudel, N., & Bhatta, J. (2022). Mushroom Classification using Random Forest and REP Tree Classifiers. Nepal Journal of Mathematical Sciences, 3(1), 111-116. Perfect, J. R. (2017). The antifungal pipeline: a reality check. Nature reviews Drug discovery, 16(9), 603-616.

[23] inky, N. J., Islam, S., & Alice, R. S. (2019). Edibility detection of mushroom using ensemble methods. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, 11, 55-62.

[24] Tan, J. Y., Zhang, Z., Izzah, H. J., Fong, Y. K., Lee, D., Mutwil, M., & Hong, Y. (2023). Volatile-Based Diagnosis for Pathogenic Wood-Rot Fungus Fulvifomes siamensis by Electronic Nose (E-Nose) and Solid-Phase Microextraction/Gas Chromatography/Mass Spectrometry. Sensors, 23(9), 4538.

[25] Terrero-Salcedo, D., & Powers-Fletcher, M. V. (2020). Updates in laboratory diagnostics for invasive fungal infections. Journal of Clinical Microbiology, 58(6), 10.1128/jcm. 01487-01419.

[26] Viejo, C. G., Fuentes, S., Godbole, A., Widdicombe, B., & Unnithan, R. R. (2020). Development of a low-cost e-nose to assess aroma profiles: An artificial intelligence application to assess beer quality. Sensors and Actuators B: Chemical, 308, 127688.

[27] White, P. L. (2023). Developments in fungal serology. Current Fungal Infection Reports, 1-12.

[28] Wilson, A. D. (2023). Developments of Recent Applications for Early Diagnosis of Diseases Using Electronic-Nose and Other VOC-Detection Devices (Vol. 23, pp. 7885): MDPI.

[29] Ye, Z., Liu, Y., & Li, Q. (2021). Recent progress in smart electronic nose technologies enabled with machine learning methods. Sensors, 21(22), 7620.

[30] Ying Li, Xiangyang Wei, Yumeng Zhou, Jing Wang & Rui You, Research progress of electronic nose technology in exhaled breath disease analysis, Review Article, Microsystems & Nanoengineering (2023) 9:12.

[31] SenPeng Chen , Jia Wu , XiYuan Liu, EMORL: Effective multi-objective reinforcement learning method for hyperparameter optimization, Engineering Applications of Artificial Intelligence Volume 104, September 2021, 104315

[32] Binghui Si a , Zhenyu Ni a , Jiacheng Xu a , Yanxia Li b , Feng Liu a, Interactive effects of hyperparameter optimization techniques and data characteristics on the performance of machine learning algorithms for building energy metamodeling, Case Studies in Thermal Engineering Volume 55, March 2024, 104124

[33] L. Beuzelin a , A. Desgranges a , Q. Émile a , J.-M. Prot a , G. Farges b. ; Accompagnement à la certification ISO 13485 : 2016, IRBM News Volume 39, Issue 2, April 2018, Pages 57-61

[34] Mohammad , Portable biosensing devices for point-of-care diagnostics: Recent developments and applications, TrAC Trends in Analytical Chemistry Volume 91, June 2017, Pages 26-41

Erciyes Üniversitesi
Enginoscope Dergisi
Cilt 1, Sayı 1 , 2025

Erciyes University
Enginoscope Journal
Volume 1, Issue 1, 2025

Kol-Kızak Mekanizmasında 3B Yazıcı ile Farklı Üretim Parametrelerine Sahip Krankların Dinamik Performansa Etkisi: YSA Tabanlı Bir Analiz

Çağlar Sevim*[1] , İbrahim Uzmay[2],

[1]Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, NİĞDE
[2]Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ
*Sorumlu Yazar: Çağlar Sevim

(Alınış / Received: 20.12.2024, Kabul / Accepted: 30.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online:31.01.2025)

Anahtar Kelimeler
Eklemeli imalat,
Makine dinamiği,
Üretim parametreleri,
Yapay sinir ağları,
Dinamik analiz

Öz: Kol-kızak mekanizması, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan temel mekanizmalardandır. Bu çalışmada, kol-kızak mekanizmasında, çeşitli üretim parametrelerine sahip 3B yazdırılmış krank uzuvlarının dinamik etkilerini analiz etmek amacıyla Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır. Farklı üretim parametrelerine sahip uzuvların 3B yazıcı ile üretilerek bu uzuvların mekanizmanın performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yapay sinir ağı modeli, Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization ve Scaled Conjugate Gradient eğitim algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. Modelin performansı, çift katmanlı yapılandırma ile önemli ölçüde iyileştirilmiş, en iyi tahmin sonuçları logsig ve tansig aktivasyon fonksiyonları ile elde edilmiştir. Sonuçlar, 4212 farklı ağ kombinasyonu üzerinden değerlendirilmiş, en iyi tahmin sonuçları iki gizli katmana sahip yapay sinir ağı yapısında 0,999906 R^2, 0,118938 RMSE ve 0,081985 MAE değerleri ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar, mekanizma çıktılarını yüksek doğrulukla modelleyebilen bir YSA'nın geliştirilmesini sağlamıştır.

The Effect of Cranks with Different Printing Parameters in the Arm-Slider Mechanism Using 3D Printing on Dynamic Performance: An ANN-Based Analysis

Keywords
Additive manufacturing,
Machine dynamics,
Production parameters,
Artificial neural networks,
Dynamic analysis

Abstract: The inverted slider-crank mechanism is a fundamental mechanism commonly used in industrial applications. This study employs Artificial Neural Networks to analyze the dynamic effects of three-dimensional printed crank components with various production parameters on the inverted slider-crank mechanism. Specimens produced with different production parameters were experimentally examined to determine their impact on the mechanism's performance. The Artificial Neural Network model was optimized using Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, and Scaled Conjugate Gradient training algorithms. The model's performance was significantly improved with a dual-layer configuration, achieving the best prediction results with logistic sigmoid and hyperbolic tangent activation functions. The results were evaluated across 4212 different network combinations, with the best predictive outcomes obtained in an artificial neural network structure with two hidden layers, achieving an R^2 of 0.999906, a Root Mean Square Error of 0.118938, and a Mean Absolute Error of 0.081985. These results have facilitated the development of an Artificial Neural Network capable of modeling the mechanism outputs with high accuracy.

1. Giriş

Krank-biyel mekanizmaları içten yanmalı motorlardan endüstriyel makinelere kadar çok sayıda mekanik sistemde yaygın olarak kullanılmaktadır. Krank-biyel mekanizmasının bir türevi olan ve literatürde hızlı dönüş mekanizması veya ters krank-biyel mekanizması (quick-return mechanism or inverted slider-crank mechanism)

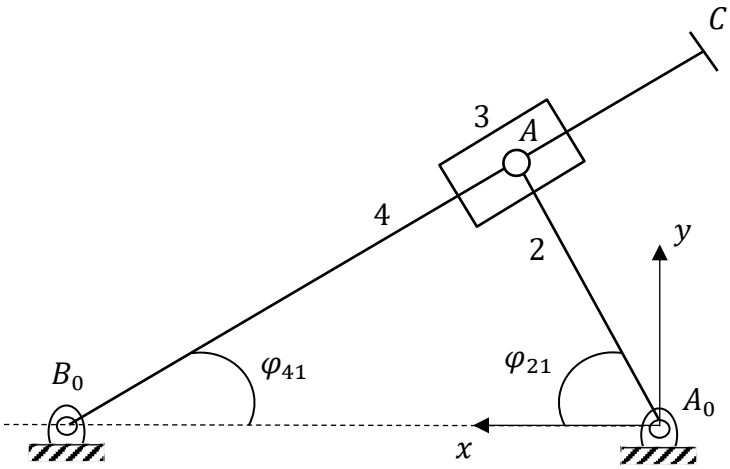
[1,2] olarak da adlandırılan kol-kızak mekanizması, döner hareket gerçekleştiren bir krank uzvu ve ona bağlı kayar bir uzuv ile, bu kayar uzvun üzerinde hareket ettiği ve salınım hareketi yapan çıkış uzvuna sahiptir. Çıkış uzvuna farklı mekanizma eklentileri ile var-gel tezgâhları, testere tezgâhları gibi farklı makinelerde kullanılan temel tahrik mekanizmalarındandır. Üç boyutlu (3B) yazdırma gibi eklemeli imalat (Eİ) teknolojilerinin günümüzde hızla gelişmesi ile birlikte bu tür mekanizmaların bileşenlerinin farklı üretim parametreleri ile tasarlanıp üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla, hızlı prototipleme, karmaşık geometri yapıları kolayca elde edebilme imkânı ve malzeme kullanımını optimize etme gibi önemli avantajlara sahiptir. Böylece uygulamada kullanılan mekanizmaların uzuvları farklı üretim parametreleri ile üretilebilmektedir. Bu parametre değişimleri, uzuvların rijitlik, dayanım, kütle ve esneklik özelliklerini etkileyerek mekanizmanın dinamik davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Sevim ve ark. [3] farklı yazdırma parametreleri ile üretilmiş krank uzuvlarının, krank biyel mekanizmasının dinamiği üzerine etkilerini araştırmışlardır. Literatürde aynı zamanda farklı yazdırma parametrelerinin mekanik etkilerine yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur [4]. Ayrıca eklemeli imalat yöntemi ile farklı amaçlar için kullanılan birçok mekanizma çalışmaları mevcuttur. Bunlar arasında, 3B yazdırılmış kavrama mekanizmaları [5], yapay el ve parmak mekanizmaları [6-9], esnek aktüatörler [10,11], robot mekanizmaları [12-13], rehabilitasyon araçları [14-16] ve daha farklı esnek ve yenilikçi mekanizmalar [17,18] uygulamalar mevcuttur.

Mekanizmaların dinamiklerine etki eden çok sayıda değişken bulunmaktadır ve bu değişkenlerin analitik yöntemlerle tam olarak modellenmesi zordur. Bu problemi aşmak amacıyla, yapay zekâ temelli çözüm yaklaşımları üzerinde kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiş ve pratik uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle, mekanizmaların karmaşık davranışlarını daha yüksek doğrulukla modellemek ve öngörmek mümkün hâle gelmiştir [19,20,21]. Özellikle Yapay Sinir Ağları (YSA), karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yetenekleri sayesinde, farklı üretim parametrelerinin mekanizmanın dinamik davranışı üzerindeki etkilerini tahmin etmede etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu sayede, mekanizma davranışına etki eden çok sayıda üretim parametresi, deneysel veriler ışığında YSA modelleri ile başarıyla ilişkilendirilebilmektedir.

Bu çalışmada, kol-kızak mekanizmasında 3B yazıcı ile farklı üretim parametrelerinde üretilen krank uzuvlarının, mekanizmanın çıkış uzvu konumu üzerindeki dinamik etkileri deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen veriler YSA ile modellenmiştir. Burada literatürde yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları (logsig, tansig, pureline) ve farklı eğitim algoritmaları (trainlm, trainbr, trainscg) [22-25] ile tek ve çift katmanlı sinir ağları denenmiş, sonuçlar belirleme katsayısı (R^2), ortalama karekök hatası (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) gibi performans metrikleri ile değerlendirilmiştir. Böylece, eklemeli imalat parametrelerinin mekanizma davranışına olan etkileri veri odaklı bir yaklaşımla irdelenmiş hem imalat hem de tasarım aşamalarında yol gösterici bilgiler elde edilmiştir.

2. Kol-Kızak Mekanizması

Endüstride krank biyel ve dört çubuk gibi düzlemsel mekanizmalar temel tahrik mekanizması olarak geniş bir alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu mekanizmaların özel bir hali olan kol-kızak mekanizması ise döner harekete sahip tahrik uzvu, bu uzva bağlı bir kayar uzuv ve kayar uzva bağlı, salınım hareketi yapan çıkış uzvundan meydana gelmektedir. Farklı eklentilerle vargel ve testere mekanizmaları gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Mekanizmanın hareket karakteristiği incelendiğinde çıkış uzvunun salınım hareketi yapması nedeniyle krankın esnekliğinin kinematik ve dinamik parametreleri önemli oranda etkileyeceği açıktır. Kol-kızak mekanizmasının şematik gösterimi ve rijit uzuvlu temel mekanizmaya ait tasarım parametreleri sırasıyla Şekil-1 ve Tablo-1' de verilmiştir.



Şekil 1. Kol-kızak mekanizmasının şematik gösterimi

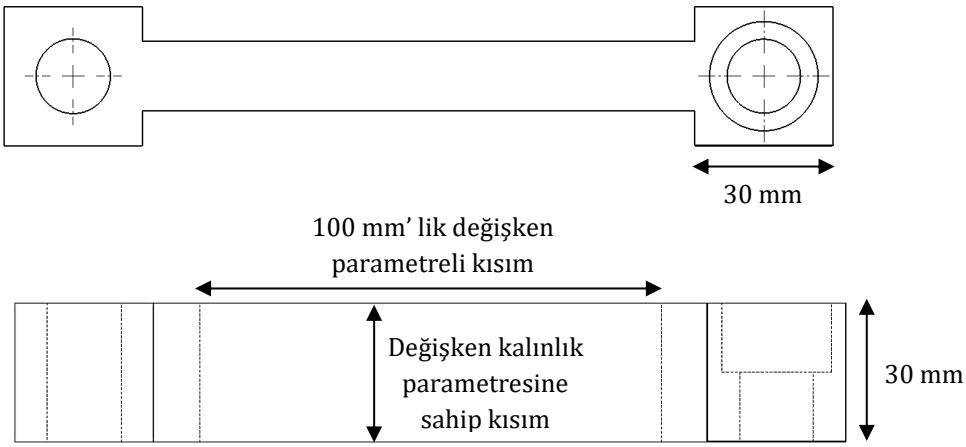
Tablo 1. Çalışmada kullanılan kol-kızak mekanizması parametreleri

Uzunluk (mm)				Kütle (kg)			Atalet momenti (kgm²)		
A_0A	A_0G_2	A_0B_0	B_0G_4	m_2	m_3	m_4	IG_2	IG_3	IG_4
150	59.06	500	288.723	0.3231	0.3201	0.881	0.001126	0.000101	0.048144

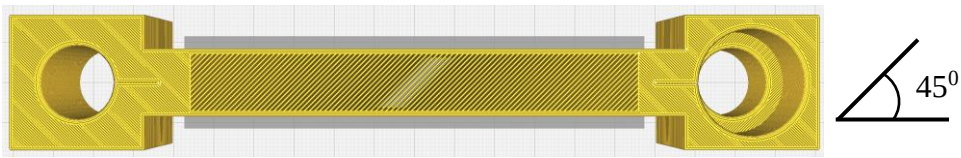
3. Deneysel Çalışma

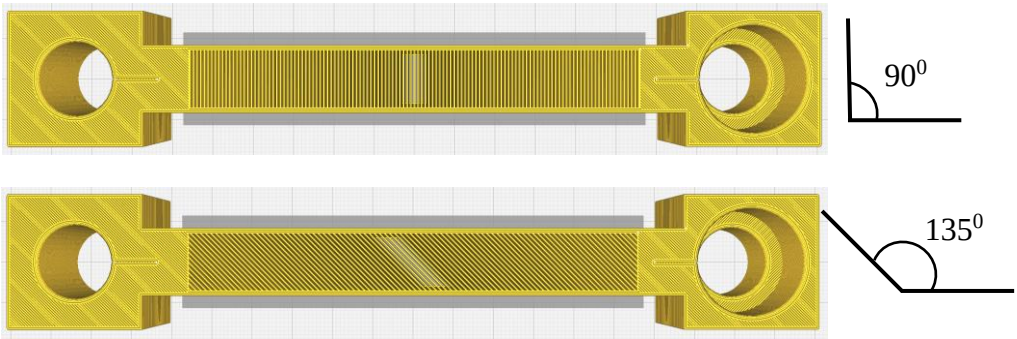
3.1. Deney numunelerinin üretimi

Deneysel çalışmalarda, kol-kızak mekanizmasının dinamik davranışını incelemek amacıyla, krank uzvu 3B yazıcı kullanılarak farklı üretim parametreleri ile üretilmiştir. Krank uzuvlarının Şekil 2' de verildiği üzere, orta kısımdaki 100 mm' lik bölümü; 45^0, 90^0 ve 135^0 yazdırma açılarında (YA), %50, %75 ve %100 doluluk oranlarında (DO) ve 24 mm, 26 mm, 28 mm ve 30 mm kalınlıklarda (K) üretilmiş ve her bir konfigürasyonun mekanizmanın çıkış uzvu konumu üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, rijit bir krank uzvu alüminyum malzemeden üretilmiş ve testlerde referans olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. Değişken parametreli krank uzvu tasarım görünümü





Şekil 3. %50 Doluluk oranında yazdırma açılarının G-CODE görünümleri

%50 doluluk oranındaki farklı yazdırma açılarına ait G-CODE görünümleri Şekil 3' de verilmiştir. Mekanizmada düzgün bağlantı yapılabilmesi amacıyla bağ noktaları %100 dolulukta yazdırılmıştır. Çalışmada %100 PLA granül esaslı 1,75 mm çaplı filament kullanılmıştır. Bu filamentin yoğunluğu 1,252 g/cm^3 ve ideal yazdırma sıcaklığı ~200 °C' dir. Krank uzuvlarını yazdırma amacıyla 300 mm x 300 mm ısıtmalı yazdırma alanına sahip 0,01 mm hassasiyetli, X, Y ve Z eksenlerinde lineer yataklara sahip 3B yazıcı kullanılmıştır. Her bir parça eşit şartlarda ve tek tek yazdırılmış olup, belirli aralıklarla yazıcıda ölçü kontrolü ve kalibrasyonu yapılmıştır. Yazdırma parametreleri Tablo 2' de verilmiştir.

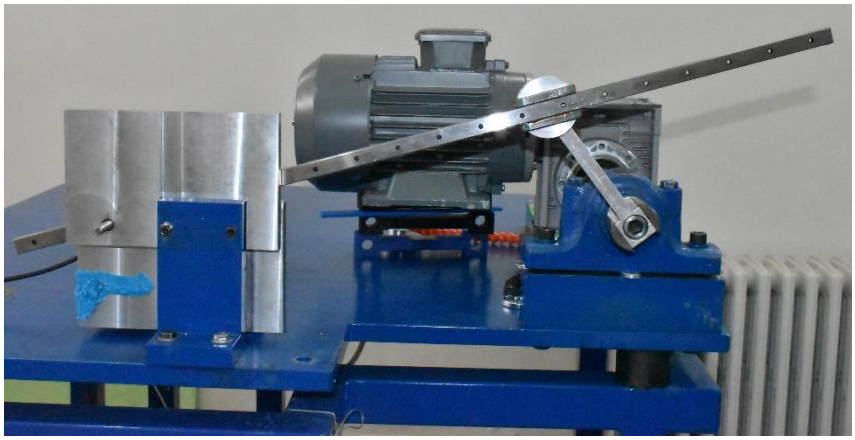
Tablo 2. 3B yazıcı yazdırma parametreleri

Katman kalınlığı	0,2 mm	Yazdırma hızı	30 mm/s
Hat genişliği	0,4 mm	Yazdırma sıcaklığı	200 °C
Dış duvar kalınlığı	1,2 mm	Yatak sıcaklığı	50 °C

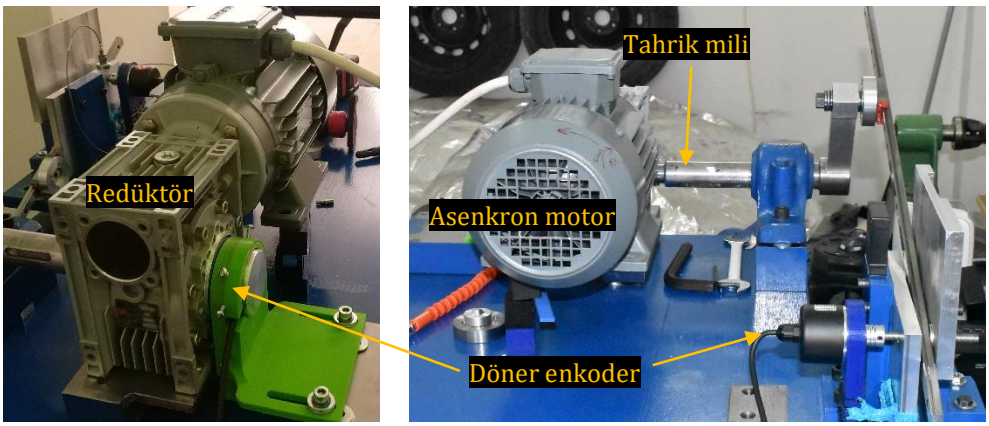
3.2. Deneysel sistem kurulumu

Çalışmada tasarım ve kurulumu gerçekleştirilen kol-kızak mekanizmasına ait deneysel sistem görünümü Şekil 4a' da verilmiştir. Mekanizmada tahrik kaynağı olarak, 1/10 hız dönüşüm oranlı redüktöre sahip (Şekil 4b) 1,5 kW' lık asenkron motor kullanılmıştır (Şekil 4c). Asenkron motor hızı bir motor sürücüsü ile doğrudan kontrol edilebilmekte olup, tahrik mili hızı 118,4 dev/dk seçilmiştir. Kol ve kızak arasında bağlantı ve hareket sağlamak üzere bilyeli lineer kaymalı araba ve çıkış uzvu olarak lineer yatak kullanılmıştır. Bu yataklar minimum boşluk, yüksek hareket doğruluğu ve ihmal edilebilir sürtünme katsayısına sahiptir.

Kayar araba, krankın A noktasına bağlanmış olup (Şekil 1), yatak-muylu çiftinin sorunsuz hareketini sağlamak için bağlantı elemanında eksenel rulmanlar kullanılarak özel bir tasarım gerçekleştirilmiştir. B_0 bağlantı noktasında (Şekil 1), düzlemsellik ve paralellik koşullarını sağlamak amacıyla özgün bir parça tasarlanmış ve üretilmiş, yatak içerisinde iğne bilyeli rulmanlar kullanılmıştır.



(a)



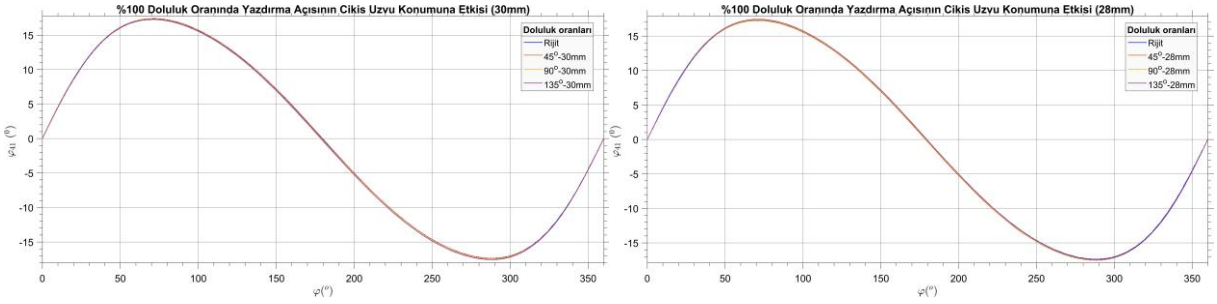
(b) (c)

Şekil 4. Deneysel sistem a) Kol-kızak mekanizması deneysel sistem görünümü b) Redüktör ve tahrik mili açısal enkoder görünümü c) Tahrik mili ve çıkış uzvu açısal enkoder görünümü

Deneysel çalışmalar, tüm testlerde aynı çalışma koşullarında gerçekleştirilmiş ve krank milinin açısal konumu başlangıçta 0 dereceye ayarlanarak başlatılmıştır. Giriş ve çıkış uzuvlarının konumlarını ölçme amacıyla tahrik miline ve çıkış miline döner enkoderler akuple edilmiştir. Deneysel sistemden veri toplanması, USB bağlantı arayüzüne sahip National Instruments USB-6251 veri toplama sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

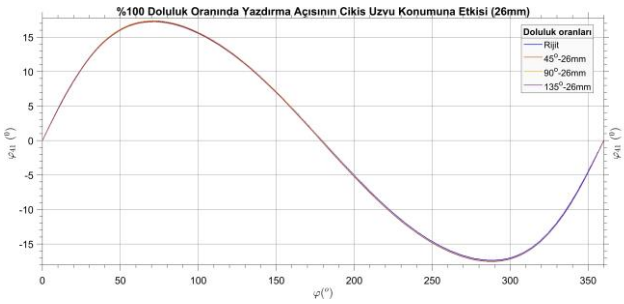
3.3. Deneysel sistem sonuçları

Kol-kızak mekanizmasında çıkış uzvu salınım hareketi yaptığından dolayı, çıkış uzvunun açısal konumunu ölçmek üzere, uzvun yataklandığı noktadaki çıkış miline döner enkoder akuple edilmiştir. Kol-kızak mekanizmasında farklı yazdırma parametrelerinin çıkış uzvu konum değişimine etkileri Şekil 5' de verilmiştir. Tüm veriler giriş parametresi olan, tahrik mili açısal konum değişkenine göre verilmiştir.



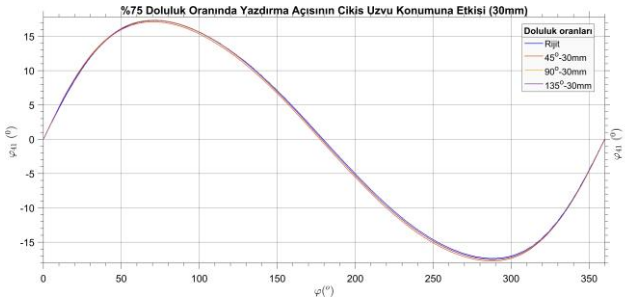
(a)

(b)

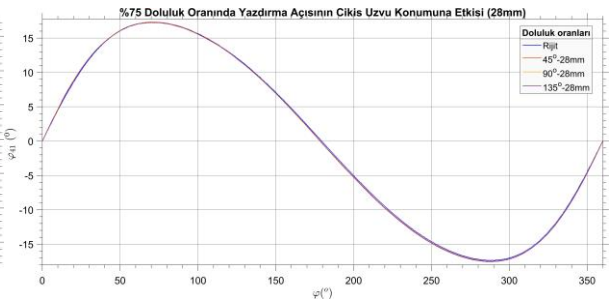


(c)

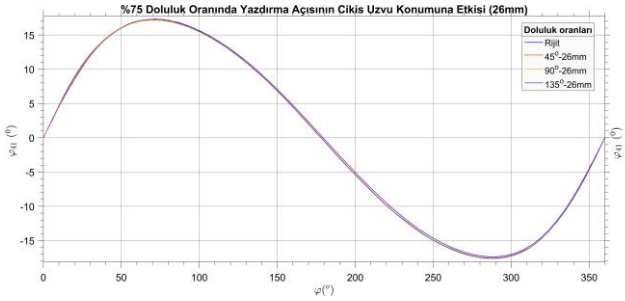
(d)



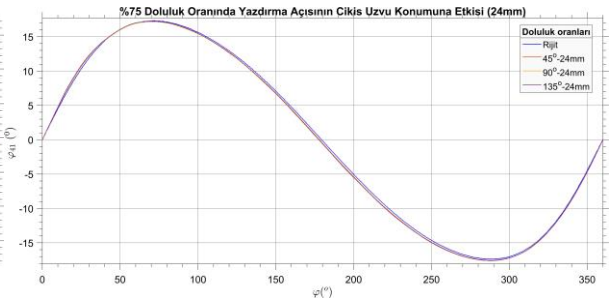
(e)



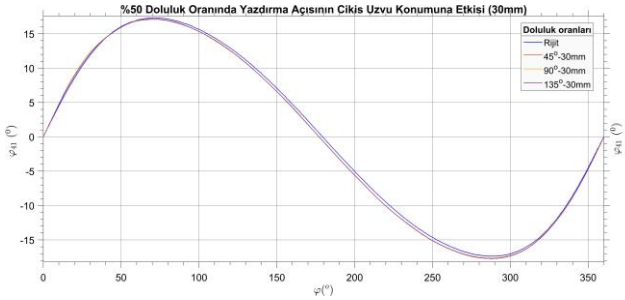
(f)



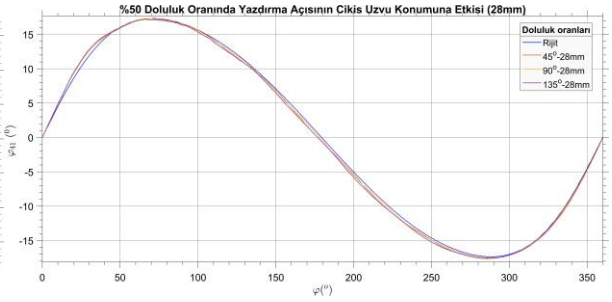
(g)



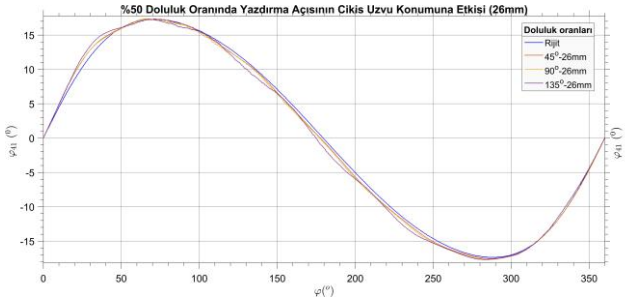
(h)



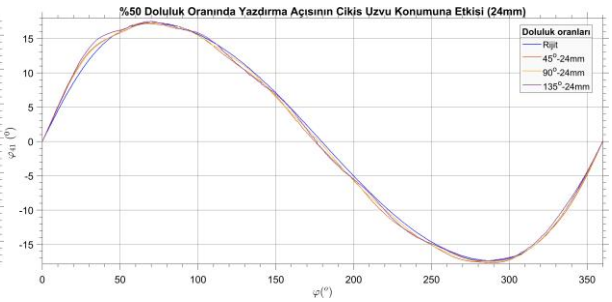
(i)



(j)



(k)



(l)

Şekil 5. Farklı yazdırma parametrelerinin çıkış uzvu açısal konumuna etkisi
a) %100 DO-30mm K, b) %100 DO-28mm K, c) %100 DO-26mm, d) %100 DO-24mm
e) %75 DO-30mm K, f) %75 DO-28mm K, g) %75 DO-26mm, h) %75 DO-24mm
i) %50 DO-30mm K, j) %50 DO-28mm K, k) %50 DO-26mm, l) %50 DO-24mm

Tam doluluk (%100) ve artan kalınlık (24 mm'den 30 mm'ye) koşullarında üretilen uzuvlarda, yazdırma açısına bağlı farklılıkların çıkış uzvu açısal konumu üzerindeki etkisi oldukça sınırlı kalmıştır (Şekil 5a-5d). %100 doluluk oranlarında elde edilen çıkış uzvu konum değişkenleri yazdırma açılarından bağımsız olarak rijit uzuvlu mekanizmaya ait çıkış uzvu konum değişimine yakın bir değişim göstermektedir. Doluluk oranının %75 olduğu krank uzuvlarında ise (Şekil 5e-5h) benzer davranış gözlemlense de yazdırma açısı etkisi bu doluluk oranında belirginleşmiştir. Özellikle daha ince parçalarda (24 mm ve 26 mm), düşük doluluk, uzvun iç yapısını esnemeye

daha yatkın hale getirerek yazdırma açılarının oluşturduğu yönsel farkları açısal konum eğrileri üzerinde daha net bir şekilde ortaya çıkarmıştır. Daha kalın parçalarda (28 mm, 30 mm) ise kısmi rijitlik korunmuş, bu sayede farklı baskı yönlendirmeleri arasındaki farklar nispeten sınırlı kalmıştır. Farklı yazdırma açıları birbirine yakın sonuçlar verse de rijit uzuvlu mekanizmaya en yakın sonuç 45^0 yazdırma açısında elde edilmiştir. Doluluk oranının %50' ye indirildiği durumda (Şekil 5i-5l) , düşük iç yoğunluk ve azalan kalınlık, yazdırma açısına bağlı farklılıkları en belirgin düzeye taşımıştır. Bu durumda parçalar daha hafif ve esnek olduğundan dolayı yazdırma açısı etkisinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. 30 mm ve 28 mm kalınlıkta 45^0 yazdırma açısı rijit mekanizmaya en yakın sonucu verirken 26 mm ve 24 mm'de 90^0 yazdırma açısı rijit mekanizmayı en iyi takip etmiştir.

Sonuç olarak, giriş-çıkış açısal konum ilişkisi incelendiğinde, yazdırma açısının etkisi doluluk oranı ve kalınlık gibi yapısal parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Yüksek doluluk ve kalınlık, mekanik davranışta yazdırma açısı kaynaklı farklılıkları büyük oranda etkileyerek daha rijit bir yanıt sunarken; azalan doluluk ve kalınlık, yazdırma açısı etkilerinin belirginleşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, istenen mekanik özelliklere ulaşmak için kalınlık, yazdırma açısı ve doluluk oranının birlikte değerlendirilmesi ve tasarım sürecinde bu parametrelerin dengeli bir şekilde seçilmesi, mekanizma performansı açısından kritik önem taşımaktadır.

4. Yapay Sinir Ağları

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte yapay zekâ kavramı özellikle makine, elektronik ve yazılım alanlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayarlar, erken dönemlerinde sadece kendilerine verilen komutlara göre işlem yapmaktaydı. Zaman içinde, bu komutların depolanması ve bilgisayarlar tarafından işlenmesi gereksinimi ortaya çıkmıştır. Yapay zekâ, teknolojinin ilerlemesi ve üretim yöntemlerinin çeşitlenmesiyle birlikte insan düşünce ve öğrenme süreçlerinin taklit edilmesi ve bu süreçlerin bilgisayarlar aracılığıyla yürütülmesi anlamına gelir. Yapay zekâ, günümüzde otomotivden uzay araştırmalarına, tekstilden sağlığa ve pazarlamaya kadar pek çok alanda hayatımızın bir parçası haline gelmiştir.

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin bilgi işleme şeklini model alarak tasarlanmış bir yapay zekâ teknolojisidir. Beynimizdeki nöronlar arasındaki karmaşık bağlantıları ve bu bağlantılar üzerinden gerçekleşen veri işleme mekanizmalarını taklit eden YSA, öğrenme ve karar verme yeteneğini simüle etmeye çalışır. Bu sistemler, büyük veri kümelerinden öğrenerek, gözlemledikleri dünyadan anlamlı bilgiler çıkarma yeteneğine sahiptir. Otomotivden sağlık sektörüne, finanstan müşteri hizmetlerine kadar birçok alanda kullanılan Yapay Sinir Ağları, modern teknolojinin en önemli bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. YSA'da genellikle ileri beslemeli yapı tercih edilir. Bu yapıda, giriş sinyalleri önce gizli katmanlar aracılığıyla işlenir ve ardından çıkış katmanına iletilir, böylece ileri doğru bir yayılım sağlanır. Çıkış sinyalleri, test verileriyle karşılaştırılarak hatalar hesaplanır. Katman ve nöron sayısının artması, karmaşık problemleri çözme kapasitesini artırır; ancak fazla sayıda nöron ve katman, öğrenme sürecini uzatabilir ve ağın ezber yapmasına neden olabilir. Bu nedenle, YSA modelinin parametrelerinin problem türüne uygun şekilde ayarlanması önemlidir. YSA' da giriş sinyalleri, genellikle deneysel sistemlerden elde edilen verilerdir. Bu sinyaller, belirlenen transfer fonksiyonları kullanılarak işlenir ve aktivasyon fonksiyonları aracılığıyla çıkış sinyallerine dönüştürülür. Bu çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan logsig, tansig ve pureline aktivasyon fonksiyonlarına yer verilmiştir. Hiperbolik-Tanjant fonksiyonu olarak da adlandırılan Tansig fonksiyonu [-1 +1] dinamik değişim aralığına sahip bir fonksiyondur.

$$tansig(x) = \frac{1}{(1 + e^{-2x})} - 1 \tag{1}$$

[0 1] dinamik değişim aralığına sahip olan ve Sigmoid fonksiyonu olarak da adlandırılan logsig aktivasyon fonksiyonu ise;

$$logsig(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{2}$$

olarak ifade edilmektedir. Purelin fonksiyonu, değişim aralığı [-1, +1] olup lineer bir değişim gösterirken; tansig ve logsig fonksiyonları lineer olmayan değişimler sergiler.

$$purelin(x) = x \tag{3}$$

Eğitim algoritmaları olarak, Levenberg-Marquardt (trainlm), Bayesian Regularization (trainbr) ve Scaled Conjugate Gradient (trainscg) kullanılmıştır. Levenberg-Marquardt, Newton yöntemlerinden türetilmiş olup, Gauss-Newton ve Gradient Descent algoritmalarının kombinasyonu olarak, bu yöntemlerin sınırlamalarını aşar. Bu algoritma, Jacobian matrisi ve hata vektörü kullanarak parametreleri güncellerken, bellek kullanımı yüksek olmasına rağmen eğitim süresini kısaltır. Bayesian Regularization, ağırlıklar ve hata karelerini optimize ederek ağ kalitesini artırır. Ölçeklendirilmiş Eşlenik Gradyan algoritması ise, hesaplama yükünü azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Kol-kızak mekanizması için oluşturulan YSA modelinde, tek ve iki katmanlı yapılarında 4212 farklı ağ kombinasyonu test edilerek en uygun yapılar belirlenmiştir. Verilerin %70' i eğitim, %15' i doğrulama, %15' i ise test için kullanılmıştır. Giriş verileri; krankın açısal konumu, yazdırma açısı, doluluk oranı ve kalınlık iken, çıkış verileri çıkış uzvunun açısal konum değerleridir. Eğitim sonuçlarının performansını analiz etmek amacıyla, elde edilen sonuçlar istatistiksel hata değerlendirmesi, belirleme katsayısı (R^2), ortalama karekök hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) metrikleri ile değerlendirilmiştir. R^2' nin 1' e yakın olması deneysel sistemden elde edilen sonuçların, hareket denklemi çözümü sonuçlarına yaklaştığını gösterirken. Bağıl hatalar için RMSE ve MAe sonuçları kullanılmıştır. RMSE performans değerlendirme ölçütüdür. Bu değerin 0'a yaklaşması, sonuçların verileri iyi derecede takip ettiğini gösterir. [26]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(o_i - t_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(o_i - \bar{o}_i)^2} \tag{4}$$

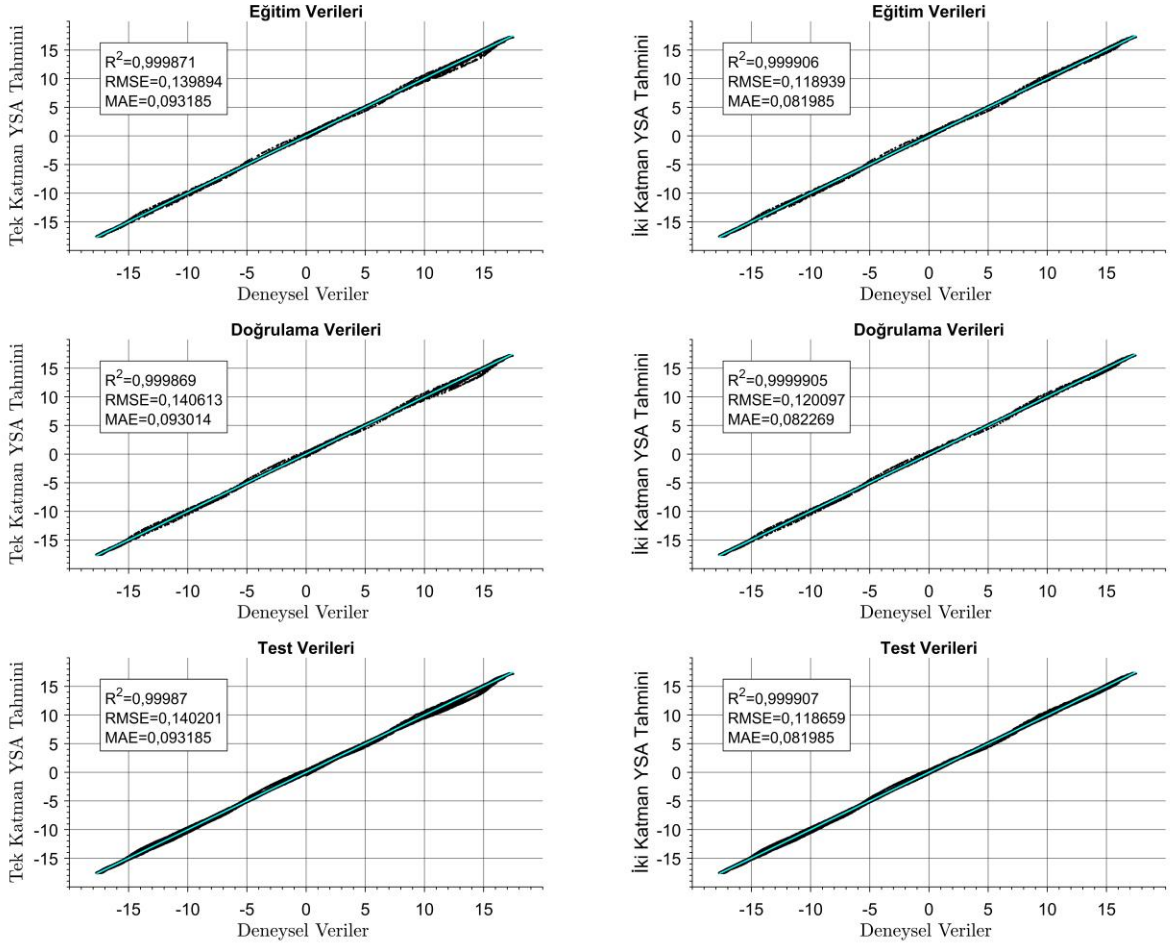
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(o_i - t_i)^2} \tag{5}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|e_j| \tag{6}$$

Tablo 3 ve Şekil 6' da YSA modellerinin eğitim, doğrulama ve test verileri üzerindeki performansı ilgili metrikler ile sunulmuştur. Sunulan şekiller ve tablolarda, incelenen parametreler arasında elde edilen en iyi sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 3. YSA çıktıları R^2 , RMSE ve MAE değerleri

Fonksiyon	**Metrik**	**Eğitim**	**Doğrulama**	**Test**
Tek katman				
logsig-purelin-4-trainbr	R^2	0,999871	0,999869	0,99987
	RMSE	0,139894	0,0140613	0,140201
	MAE	0,093185	0,093014	0,093185
İki katman				
losig-tansig-pureln-4-3-trainlm	R^2	0,999906	0,999905	0,999907
	RMSE	0,118938	0,120097	0,118659
	MAE	0,081985	0,082269	0,081985



Şekil 6. Kol-kızak mekanizması yapay zekâ modellerinin eğitim doğrulama ve test verileri ile uyumu

Eğitim kombinasyonları içerisinde, mekanizma çıktıları için iki katmanlı YSA modelinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. İki katmanlı YSA modelinde en iyi tahmin, gizli katmanlarda losigmoid ve tansigmoid, çıkış katmanında ise pürelin aktivasyon fonksiyonlarının bulunduğu, ilk gizli katmanında 4 nöron ve ikinci gizli katmanında ise 3 nöron bulunan yapıda, 0,118938 RMSE ve 0,081985 MAE değerleri ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar, katman ve nöron sayısının artışının, YSA modelinin tahmin başarısını belirgin şekilde iyileştirebileceğini göstermektedir. Özellikle, aktivasyon fonksiyonlarının ve nöron sayısının doğru kombinasyonu, mekanizmanın dinamik çıktılarını daha doğru bir şekilde modellememizi sağlamıştır. Dolayısıyla, model optimizasyonu sürecinde bu tür yapılandırmaların üzerinde durulması, genel ağ performansını artırma potansiyeline sahiptir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, mekanizma uzuvlarının farklı 3B yazıcı üretim parametrelerinin mekanizmanın çıkış uzvunun konumuna olan etkileri incelenmiştir. Deneysel bir sistem kurularak çıkış uzvunun konum değişkenleri detaylı bir şekilde analiz edilmiş ve YSA tabanlı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla çalışmada kol-kızak mekanizması model mekanizma olarak kullanılmıştır. Mekanizmanın krank uzvu, farklı yazdırma parametreleri belirlenerek 3B yazıcı ile üretilmiştir. Aynı zamanda referans parametreleri elde etme amacıyla, Alüminyum malzemeden üretilmiş rijit krank uzvu kullanılmış ve rijit uzuvlu mekanizma ile 3B yazdırılmış uzuvlu mekanizmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel sistemden elde edilen çıkış uzvu konum değişkenlerine bakıldığında, %100 dolulukta yazdırma açısından bağımsız olarak, konum değerleri rijit uzuvlu mekanizma sonuçlarını çok yakın takip ederken, doluluk oranı ve kalınlık azaldıkça yazdırma açısı etkileri daha iyi görülmektedir.

Her ne kadar farklı yazdırma açıları arasındaki sonuçlar birbirine benzer olsa da 45^0 yazdırma açısı, rijit uzuvlu mekanizmaya en yakın performansı göstermiştir. Doluluk oranı %50' ye düşürüldüğünde, iç yoğunluğun azalması ve malzeme kalınlığının düşmesi, yazdırma açılarının etkisini daha belirgin hale getirmiştir. Özellikle, daha ince ve esnek parçalarda yazdırma açısının etkisi daha net olarak gözlemlenmiştir. 30 mm ve 28 mm kalınlıklarda 45^0

yazdırma açısı, rijit mekanizmaya en yakın sonuçları verirken, 26 mm ve 24 mm kalınlıklarda 90^0 derece yazdırma açısı en iyi uyumu sağlamıştır.

Ayrıca, deneysel sonuçlardan elde edilen veriler YSA ile modellenmiştir. Tek katmanlı YSA modelleri içerisinde en iyi tahmini "logsig-purelin-4-trainbr" YSA yapısı ve iki katmanlı YSA modelinde ise en iyi tahmini -logsig-tansig-pureln-4-3-trainlm" YSA yapısı gerçekleştirmiştir. Bu iki yapının istatiksel sonuçları karşılaştırıldığında ise en iyi sonucun iki katmanlı YSA yapısında elde edildiği görülmektedir. Bu durum, mekanizmalarda YSA' nın, özellikle karmaşık ve dinamik davranışların modellenmesinde üstün bir yöntem olduğunu göstermektedir. Yapay sinir ağlarının bu tür mekanik sistemlerde etkili bir şekilde kullanılabilmesi, gelecekte daha optimal tasarımların ve işlemlerin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

6. Kaynakça

[1] Gong, J., Yu, Z., & Chang, H. K. 2022. Dynamic Analyses of Whitworth Quick Return Mechanism. International Journal of Mechanical Engineering Education, 50(4), 883-901.

[2] Beale, D. G., & Scott, R. A. 1990. The stability and response of a flexible rod in a quick return mechanism. Journal of Sound and Vibration, 141(2), 277–289.

[3] Sevim, Ç., Özmen, Ö., Parlak, M., & Uzmay, İ. 2024. Impact of printing parameters on the dynamic outputs of a slider-crank mechanism with FFF-based 3D-printed crank-arms. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 14644207241290497.

[4] Tanveer, M. Q., Mishra, G., Mishra, S., Sharma, R. 2022. Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts-a current review. Mater. Today: Proc. 62, 100-108.

[5] Goh, G. D., Goh, G. L., Lyu, Z., Ariffin, M. Z., Yeong, W. Y., Lum, G. Z., Wong, H. Y. A. 2022. 3D Printing of Robotic Soft Grippers: Toward Smart Actuation and Sensing. Adv. Mater. Technol. 7(11), 2101672.

[6] Kumar, M., Varshney, A., Taufik, M. 2023. Hand prosthetics fabrication using additive manufacturing. Mater. Today: Proc.

[7] Park, J., Chang, M., Jung, I., Lee, H., Cho, K. 2024. 3D Printing in the Design and Fabrication of Anthropomorphic Hands: A Review. Adv. Intell. Syst. 6(5), 2300607.

[8] Liu, S., Van, M., Chen, Z., Angeles, J., Chen, C. 2021. A novel prosthetic finger design with high load-carrying capacity. Mech. Mach. Theory. 156, 104121.

[9] Kashef, S. R., Amini, S., Akbarzadeh, A. 2020. Robotic hand: A review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria. Mech. Mach. Theory. 145, 103677.

[10] Tan, N., Gu, X., Ren, H. 2018. Design, characterization and applications of a novel soft actuator driven by flexible shafts. Mech. Mach. Theory. 122, 197-218.

[11] Lalegani Dezaki, M., Sales, R., Zolfagharian, A., Yazdani Nezhad, H., Bodaghi, M. 2023. Soft pneumatic actuators with integrated resistive sensors enabled by multi-material 3D printing. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 128, 4207-4221.

[12] Wu, T., Liu, Z., Ma, Z., Wang, B. 2024. Multibody dynamic modeling and motion analysis of flexible robot considering contact. Multibody Syst. Dyn. 1-33.

[13] Sibilska-Mroziewicz, A., Możaryn, J., Hameed, A., Fernández, M. M., Ordys, A. 2022. Framework for simulation-based control design evaluation for a snake robot as an example of a multibody robotic system. Multibody Syst. Dyn. 55(4), 375-397.

[14] Molaei, A., Foomany, N. A., Parsapour, M., Dargahi, J. 2022. A portable low-cost 3D-printed wrist rehabilitation robot: Design and development. Mech. Mach. Theory. 171, 104719.

[15] Triwiyanto, Wakidi, L. F., Caesarendra, W., Rizal, A., Ahmed, A. A., Abdullayev, V. H. 2023. A Review of 3D Printing Technology for the Development of Exoskeletons for Upper Limb Rehabilitation. International Conference on Electronics, Biomedical Engineering, and Health Informatics, 643-663. Springer Nature Singapore, Singapore.

[16] Yildiz, I. 2018. A low-cost and lightweight alternative to rehabilitation robots: omnidirectional interactive mobile robot for arm rehabilitation. Arab. J. Sci. Eng. 43, 1053-1059.

[17] Hargrove, B., Nastevska, A., Frecker, M., Jovanova, J. 2022. Pseudo rigid body model for a nonlinear folding compliant mechanism. Mech. Mach. Theory. 176, 105017.

[18] Jagtap, S. P., Deshmukh, B. B., Pardeshi, S. 2021. Applications of compliant mechanism in today's world–A review. J. Phys.: Conf. Ser. 1969(1), 012013.

[19] Erkaya, S., Uzmay, I. 2008. A neural–genetic (NN–GA) approach for optimising mechanisms having joints with clearance. Multibody System Dynamics, 20(1):69–83.

[20] Erkaya, S., Uzmay, I. 2009. Investigation on effect of joint clearance on dynamics of four-bar mechanism. Nonlinear Dynamics, 58(1):179–198.

[21] Erkaya, S., Uzmay, I. 2009. Optimization of transmission angle for slider-crank mechanism with joint clearances. Structural and Multidisciplinary Optimization, 37(5):493–508.

[22] Özmen, Ö., Sınanoğlu, C., Batbat, T., Güven, A. 2019. Prediction of slipper pressure distribution and leakage behaviour in axial piston pumps using ANN and MGGP. Mathematical Problems in Engineering, 2019(1), 7317520.

[23] Kaleeswaran, V., Dhamodharavadhani, S., Rathipriya, R. 2020. A comparative study of activation functions and training algorithm of NAR neural network for crop prediction. 2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 1073-1077. IEEE.

[24] Danilin, S. N., Makarov, V. V., Shchanikov, S. A. 2014. Design of artificial neural networks with a specified quality of functioning. 2014 International Conference on Engineering and Telecommunication, 67-71. IEEE.

[25] Chen, J. C., Wang, Y. M. 2020. Comparing activation functions in modeling shoreline variation using multilayer perceptron neural network. Water, 12(5), 1281.

[26] Özmen, Ö., Sınanoğlu, C., Batbat, T., Güven, A. 2019. Prediction of slipper pressure distribution and leakage behaviour in axial piston pumps using ANN and MGGP. Mathematical Problems in Engineering, 2019.

Erciyes Üniversitesi
Enginoscope Dergisi
Cilt 1, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Enginoscope Journal
Volume 1, Issue 1, 2025

Takviyeli Hibrit Kompozit Levhaların Termomekanik Davranışının Sayısal Olarak Araştırılması

Munise Didem Demirbaş*[1], Mehmet Demir[1],
[1] Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, 38039, Kayseri, Türkiye
*Sorumlu Yazar: Munise Didem Demirbaş

(Alınış / Received: 23.12.2024, Kabul / Accepted: 30.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 31.01.2025)

Anahtar Kelimeler
Hibrit Kompozit, Termomekanik Analiz, Karbon Fiber, Bazalt Fiber, Aramid Fiber, Sonlu Elemanlar Analizi

Öz: Bu çalışmada Karbon, Bazalt ve Aramid takviye elemanları kullanılarak iki farklı hibrit kompozit yapının oluşturulduğu, her biri 16 katmandan oluşan bu yapıların termomekanik davranışları Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak sayısal olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Analizlerde hibrit yapının termomekanik davranışı üst yüzeyden sıcaklık sınır şartı olmak üzere, alt kenardan ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır. Diğer kenarlar yalıtılmış ve dört kenarı ankastre yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda hibrit yapıda oluşan termal yer değiştirmeler, deformasyonlar ve gerilme dağılımları incelenmiştir.

Numerical Investigation of Thermomechanical Behavior of Reinforced Hybrid Composite Sheets

Keywords
Hybrid Composite, Thermomechanical Analysis, Carbon Fiber, Basalt Fiber, Aramid Fiber, Finite Element Analysis

Abstract: In this study, two different hybrid composite structures were formed using Carbon, Basalt and Aramid reinforcement elements, each consisting of 16 layers, and their thermomechanical behaviors were numerically investigated and compared using the Finite Element Method (FEM). In the analyses, the thermomechanical behavior of the hybrid structure was applied as the temperature boundary condition from the upper surface and the heat flux boundary condition from the lower edge. The other edges were insulated and four edges were fixed. As a result of this study, the thermal displacements, deformations and stress distributions occurring in the hybrid structure were investigated.

1. Giriş

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapay materyallerdir ve her bir bileşen makro seviyede özelliklerini korur. Bu özellikleri sayesinde kompozit malzemeler, geniş bir kullanım alanına sahiptir çünkü yüksek mukavemet ve hafiflik gibi avantajlar sunarlar. Kompozit yapılar genellikle düşük dayanıma sahip bir ana matris ve bu matrisi güçlendiren takviye elemanlarından oluşur. Ana matris, kompoziti dış etkilere karşı koruyarak, takviye elemanları malzemeye dayanıklılık, tokluk ve süneklik kazandırır [1-3].

Hibrit kompozitler, birden fazla takviye elemanı içeren yapılardır ve bu özellikleri sayesinde dayanıklılık ve işlevsellik açısından daha üstün özellikler sunarlar. Karbon, bazalt ve aramid gibi farklı liflerle güçlendirilmiş hibrit kompozitler, mekanik performansı iyileştirirken, termal dayanıklılık ve gerilme dağılımı gibi özelliklerin optimize edilmesine olanak tanır. Bu nedenle hibrit kompozitler, karmaşık yükleme koşulları altında yüksek performans sergileyen uygulamalar için oldukça uygundur [4].

Bu çalışmada, karbon, bazalt ve aramid takviyeli 16 katmanlı iki farklı hibrit kompozit yapının termomekanik davranışı incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sayısal analizlerde, hibrit kompozitin termal yer değiştirme, deformasyon ve gerilme dağılımları, üst yüzeyden sıcaklık sınır şartı olmak üzere, alt kenardan ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır. Diğer kenarlar yalıtılmış ve dört kenarı ankastre yapılmıştır.

Bu çalışma, hibrit kompozitlerin termal ve mekanik yükler altında gösterdiği performans hakkında önemli bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1 Literatür taraması

Hibrit kompozit yapıları termomekanik davranışı üzerine yapılan bazı çalışmalara aşağıda değinilmiştir.
Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanlarının kullanımıyla optimize edilen üstün mekanik ve termal özellikler sunar. Zhang ve arkadaşları karbon ve bazalt gibi farklı fiberlerin kombinasyonu ile hibrit kompozitlerin çekme mukavemetinin ve termal direncinin arttığını ifade ettiler [5]. Özellikle bazalt lifleri termal dayanıklılık sağlarken, karbon lifleri çekme mukavemetini yükseltmiştir. Singh ve arkadaşları, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile hibrit kompozitlerin mekanik ve termal yükler altındaki davranışını incelemiş, sıcaklık artışıyla malzemede oluşan deformasyonların önemini vurgulamıştır [6]. Bu çalışmada, farklı sıcaklık ve yük koşullarında hibrit kompozitlerde gerilme birikiminin farklılık gösterdiği ortaya konmuştur.

Liang ve arkadaşları, karbon ve bazalt takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme mukavemetini incelemiş, bu tür malzemelerin geleneksel kompozitlere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini belirlemiştir [7]. Sıcaklık değişimlerinin, mikroyapısal deformasyonlara neden olarak malzemenin performansını nasıl etkilediği de ele alınmıştır. Wang ve arkadaşları, dört taraflı sıkıştırma altında hibrit kompozitlerin termal ve mekanik yükler altındaki davranışını incelemiş, yüksek sıcaklık koşullarının malzemede homojen olmayan gerilme dağılımlarına yol açtığını göstermiştir [8]. Hibrit kompozitlerin termal genleşme özellikleri üzerine yapılan bir diğer çalışma, farklı takviye elemanlarının malzeme içerisindeki termal yükler altında nasıl davrandığını analiz etmiştir. Özellikle, karbon ve bazalt lifleri arasındaki farklılıkların malzemenin genleşme katsayısına etkisi vurgulanmıştır. Kim ve arkadaşları, hibrit kompozitlerin kırılma dayanımını araştırarak, bu tür malzemelerin çok katmanlı yapılarının kırılma mekanizmalarını nasıl etkilediğini açıklamıştır [10]. Karbon ve bazalt fiberlerinin birlikte kullanımı, malzemenin kırılma dayanımını artırmıştır. Chen ve arkadaşları, hibrit kompozitlerin sıcaklık ve mekanik yükler altındaki davranışını termomekanik analizler yoluyla incelemiş, yüksek sıcaklıkta oluşan deformasyon ve gerilme birikimlerinin malzemenin performansına olan etkilerini değerlendirmiştir [11]. Liu ve arkadaşları, karbon, aramid ve bazalt fiberlerinin kombinasyonlarının hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerine nasıl etki ettiğini incelemiştir [12]. Araştırmalar, fiberlerin farklı oranlarda kullanımıyla malzemelerin mekanik ve termal dayanıklılığının optimize edilebileceğini göstermiştir.
Polimer matrisli hibrit kompozitler, çeşitli liflerle güçlendirildiğinde daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlar. Smith ve arkadaşları, polimer bazlı matrislerde karbon ve bazalt fiberlerinin kullanımıyla mekanik performansın iyileştirildiğini ortaya koymuştur [13]. Xiang ve arkadaşları, hibrit kompozitlerin termal yük altındaki davranışlarını analiz etmiş ve farklı takviye fiberlerinin sıcaklık dağılımını nasıl etkilediğini incelemiştir [14]. Bu çalışma, yüksek sıcaklık koşullarında malzemelerin deformasyon davranışlarını anlamaya yönelik önemli sonuçlar sunmuştur. Hibrit kompozitlerin farklı sıcaklık koşulları altında nasıl davrandığı üzerine yapılan çalışmalarda, sıcaklık değişimlerinin malzemenin mekanik özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu analizler, malzemelerin ısıl dayanıklılık açısından optimize edilmesine olanak tanımıştır. Çevresel koşulların hibrit kompozitlerin dayanıklılığı üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışma, nem ve sıcaklık gibi faktörlerin malzemenin uzun vadeli performansını nasıl etkilediğini vurgulamıştır. Farklı takviye elemanlarının hibritizasyonu üzerine yapılan bu çalışma, fiberlerin mekanik yükler altında nasıl sinerjik etkiler sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalar, karbon ve bazalt fiberlerinin birlikte kullanımının malzeme dayanıklılığını artırdığını göstermektedir. Düşük sıcaklık koşullarında hibrit kompozitlerin davranışlarını inceleyen bu çalışma, malzemelerin termal dayanıklılıklarını ve gerilme dağılımlarını değerlendirmiştir. Son olarak, farklı yükleme koşulları altında hibrit kompozitlerin deformasyon ve gerilme dağılımlarını inceleyen bu çalışma, malzeme tasarımında yük dağılımının önemini vurgulamıştır.

Bu literatür taraması, hibrit kompozitlerin geniş uygulama alanlarında nasıl kullanıldığını ve bu malzemelerin termomekanik davranışlarını inceleyen güncel araştırmaları kapsamakta olup Karbon/Bazalt/Aramid takviyeli hibrit kompozitlerin mevcut dizilimle üretildiği ve sayısal olarak termomekanik davranışının araştırıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu bağlamda, çalışmamız karbon, bazalt ve aramid takviyeli hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarını sayısal olarak inceleyerek literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

1.2. Problem durumu

Hibrit kompozitlerin termomekanik davranışının araştırılması, bu malzemelerin sıcaklık değişimlerine tepkilerini anlamak için kritik bir alan öneme sahiptir. Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapılar olup, hafiflik, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gibi avantajlar sunarak geniş bir uygulama alanı bulurlar. Bu tür malzemelerin termomekanik davranışlarının anlaşılması, tasarım süreçlerinde güvenlik ve performans açısından büyük önem taşır. Hibrit kompozitlerin sıcaklık altında mukavemet kaybı, gerilme yığılması ve deformasyon gibi özellikleri, kullanılan liflerin türüne ve malzeme yapısına bağlı olarak, hibrit

kompozitlerin sıcaklık altında mukavemet kaybı, gerilme yığılması ve deformasyon gibi özellikleri, kullanılan lif türüne ve malzeme yapısına bağlı olarak değişir. Karbon, bazalt ve aramid gibi farklı liflerin kombinasyonları, malzemenin mekanik özelliklerini optimize ederken, termal davranışlarının da dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal analiz teknikleri, hibrit kompozitlerin performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [5-6]. Sonuç olarak, hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi, malzemenin tasarımında ve mühendislik uygulamalarındaki verimliliğin artırılması açısından hayati bir öneme sahiptir. Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanları ile güçlendirilmiş yapılar oluşturarak hem mekanik dayanıklılığı hem de termal stabiliteyi artırma potansiyeline sahiptir.

1.3. Araştırmanın amacı

Yapılan analizler, bu levhaların termomekanik davranışlarının daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini sağlar. Özellikle, sıcaklık değişimlerinin malzeme üzerindeki etkilerini anlamak, bu kompozitlerin performansını ve dayanıklılığını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmanın sonuçları, hibrit kompozit levhaların termomekanik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına ve bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda daha verimli bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunacaktır. Bunun yanı sıra, hibrit kompozitlerin tasarımında ve mühendislik uygulamalarında sürdürülebilir ve etkili çözümler sunma potansiyelini artıracaktır [8,15].

1.4. Araştırmanın önemi

Bu araştırmanın önemi, hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının detaylı bir şekilde incelenmesinden kaynaklanmaktadır. Hibrit kompozitler, farklı takviye elemanlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulduğundan, bu malzemelerin mekanik ve termal özellikleri, kullanılan liflerin türüne ve oranına bağlı olarak değişir. Bu tür araştırmalar, şu alanlarda önemli katkılar sağlar:

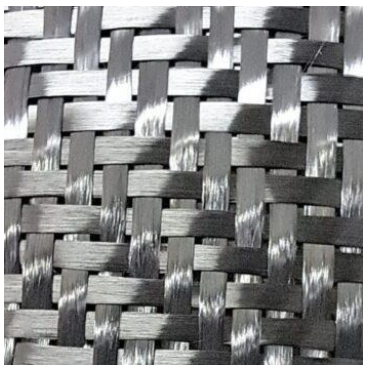
- Mekanik ve Termal Performansın Optimize Edilmesi: Hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının anlaşılması, mühendislik tasarımlarında malzeme seçiminde daha bilinçli kararlar alınmasını sağlar. Özellikle yüksek sıcaklık ve mekanik yük koşullarında performansın artırılması, çeşitli endüstriyel uygulamalarda güvenliği ve verimliliği artırır [5-6].
- Endüstriyel Uygulamalar İçin Uygunluk: Polimer kompozit levhaların kullanımı, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi avantajlar sunarak otomotiv, havacılık ve inşaat gibi birçok sektörde önem kazanmaktadır. Bu araştırmalar, hibrit kompozitlerin bu alanlardaki uygunluğunu değerlendirmek ve malzemelerin belirli uygulamalar için optimize edilmesini sağlamak amacıyla gereklidir [8,15].
- Yeni Malzeme Geliştirme: Hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının incelenmesi, yeni malzeme türlerinin geliştirilmesine ve mevcut malzemelerin performanslarının iyileştirilmesine katkı sağlar. Bu hem araştırma hem de endüstri açısından yenilikçi çözümler sunar [7,12].
- Sürdürülebilirlik ve Ekonomik Verimlilik: Hibrit kompozitler, malzeme tasarrufu sağlayarak daha sürdürülebilir mühendislik çözümleri sunabilir. Malzemelerin daha verimli kullanılması, üretim maliyetlerini azaltırken çevresel etkileri de minimize eder [16,17].

Sonuç olarak, bu araştırmanın önemi, hibrit kompozitlerin termomekanik davranışlarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi ile ilgili olup, mühendislik uygulamalarında bu malzemelerin verimli ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır.

2. Malzeme ve Metot

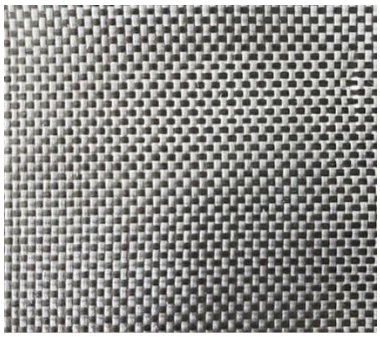
2.1 Bu araştırmada kullanılacak olan polimer kompozitler için takviye malzeme türleri

Karbon Fiber: Karbon fiber, karbon atomlarının uzun parçalar halinde düzenli olarak dizilmesiyle oluşan (Şekil 1) üçlü ve hafif bir malzemedir. Genellikle polimer matrisle birleştirilerek kompozit malzemelerin üretiminde kullanılır. Karbon fiberin ana özellikleri arasında yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, kimyasal dayanıklılık ve iyi termal iletkenlik bulunur.
Karbon fiberin çeşitli endüstriyel uygulamaları; otomotiv, havacılık ve uzay endüstrilerinde, rüzgâr enerjisi türbinlerinde, spor ekipmanlarında ve yapısal güç gerektiren diğer alanlardır [2,4]. Bu malzemenin yüksek mukavemeti ve hafifliği, performansın artırılması ve enerji verimliliğinin sağlanması gibi çeşitli avantajlar sunar.



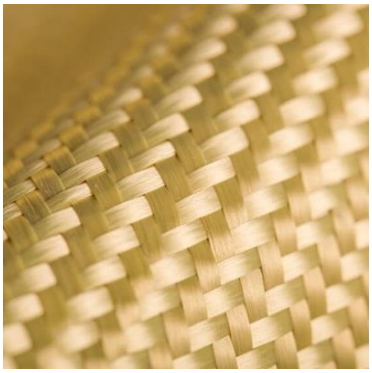
Şekil 1. Karbon Fiber ile dokunmuş kumaş görseli.

Bazalt Fiber: Bazalt fiber, doğal bazalt kayalarından elde edilen ince liflerdir (Şekil 2). Bu lifler, erimiş bazalt kütlesinin özel yöntemlerle işlenmesiyle üretilir. Bazalt fiberin öne çıkan özellikleri arasında yüksek mukavemet, termal dayanıklılık, kimyasal direnç ve düşük yoğunluk bulunur. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, yapı malzemeleri, spor ekipmanları gibi çeşitli endüstrilerde kullanımı yaygındır [2,4].



Şekil 2. Bazalt Fiber ile dokunmuş kumaş görseli.

Aramid Fiber: Aramid fiber, sentetik bir lif türüdür ve poliamid (aramid) polimerlerden üretilir (Şekil 3). Bu fiberler, genellikle yüksek mukavemet, yüksek modül ve iyi termal direnç gibi özelliklerle karakterizedir [2,4]. Aramid fiberlerin en yaygın kullanılan türlerinden biri, Dupont tarafından geliştirilen ve Ticel adı altında ticari olarak satılan Kevlar'dır.



Şekil 3. Aramid Fiber ile dokunmuş kumaş görseli.

Hibrit kompozit malzemeler, günümüzde birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, polimer matris içinde birden fazla takviye edici malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulur. Genellikle cam elyafı, karbon elyafı veya seramik parçacıklar gibi takviye edici malzemeler kullanılır. Hibrit kompozitlerin yüksek mukavemet-takviye oranı, bu malzemelere hem yüksek dayanıklılık hem de hafiflik kazandırır [5-6]

Hibrit kompozit malzemelerin termomekanik davranışını analiz etmek, tasarım ve mühendislik süreçlerinde kritik bir adımdır. Bu analizler, malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik performansın tahmin edilmesi açısından önemlidir. Sonuç olarak, daha güvenilir ve optimize edilmiş ürünlerin elde edilmesi sağlanır [6,15].

Bu çalışmada, hibrit kompozit malzemelerin termomekanik davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS paket programı kullanılarak incelenmiştir. Ansys, mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir sonlu elemanlar yazılımıdır ve termomekanik analizler için çeşitli özellikler sunar. Bu program, malzeme modellerini kullanarak gerçek yaşam koşullarını simüle etme yeteneği ile dikkat çeker [8].

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, hibrit kompozit malzemelerin termal genleşme davranışı, malzeme modellemesi, gerilme analizi ve termal gerilme analizi gibi konular ele alınacaktır. Bu analizlerin yapıldığı örnekler ve elde edilen sonuçlar paylaşılacak ve hibrit kompozitlerin termomekanik davranışının incelenme süreci detaylandırılacaktır.

Bu çalışma ile hibrit kompozit malzemelerin termomekanik davranışları detaylı bir şekilde analiz edilerek, daha güvenilir ve optimize edilmiş ürünlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ansys gibi simülasyon araçlarının kullanılması, bu analizlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar.

2.2 Malzemelerin mekanik özellikleri

Bu çalışma süresince yapılan analizlerde kullanılan malzeme parametreleri "https://www.matweb.com/" ağ sayfasından alınarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Aramid Özellik Tablosu.

Özellik	Değer
Yoğunluk (Density)	1,44e-006 kg/mm^3
Isı İletkenliği (Thermal Conductivity)	6,0e-005 W/mm°C

Elastik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Young Modülü (Young's Modulus)	67000	4700	4700
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	XY: 0,34	YZ: 5,0e-002	XZ: 0,34
Kayma Modülü (Shear Modulus)	XY: 2000	YZ: 1586	XZ: 2000

Özellik	Değer
Sıcaklık (Temperature)	21°C

Termal Özellikler

Özellik	X Yönü (°C^{-1})	Y Yönü (°C^{-1})	Z Yönü (°C^{-1})
Isıl Genleşme Katsayısı (Coefficient of Thermal Expansion)	-2,0e-006	6,0e-005	6,0e-005

Mekanik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	2700	70	70
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	X: -1200	Y: -150	Z: -150
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 150	YZ: 75	XZ: 150

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	3,0e-002	1,0e-002	1,0e-002
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	-1,0e-002	-1,0e-002	-1,0e-002
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 2,5e-002	YZ: 2,5e-002	XZ: 2,5e-002

Tablo 2. Bazalt Özellik Tablosu.

Özellik	Değer
Yoğunluk (Density)	2,7e-006 kg/mm^3
Isı İletkenliği (Thermal Conductivity)	4,0e-005 W/mm°C

Elastik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Young Modülü (Young's Modulus)	89000	9000	9000
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	XY: 0,25	YZ: 0,2	XZ: 0,25
Kayma Modülü (Shear Modulus)	XY: 3500	YZ: 1200	XZ: 3500

Özellik	Değer
Sıcaklık (Temperature)	21°C

Termal Özellikler

Özellik	X Yönü (°C^{-1})	Y Yönü (°C^{-1})	Z Yönü (°C^{-1})
Isıl Genleşme Katsayısı (Coefficient of Thermal Expansion)	8,1e-006	1,21e-005	1,21e-005

Mekanik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	1100	50	50
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	X: -600	Y: -150	Z: -150
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 60	YZ: 60	XZ: 60

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	3,0e-002	5,0e-003	5,0e-003
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	-1,0e-002	-2,0e-002	-2,0e-002
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 2,5e-002	YZ: 2,5e-002	XZ: 2,5e-002

Tablo 3. Karbon Özellik Tablosu.

Özellik	Değer
Isı İletkenliği (Thermal Conductivity)	9,0e-003 W/mm°C
Yoğunluk (Density)	1,8e-006 kg/mm³

Elastik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Young Modülü (Young's Modulus)	2,3e+005	10000	10000
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	XY: 0,27	YZ: 0,4	XZ: 0,27
Kayma Modülü (Shear Modulus)	XY: 5000	YZ: 2000	XZ: 5000

Termal Özellikler

Özellik	X Yönü (°C⁻¹)	Y Yönü (°C⁻¹)	Z Yönü (°C⁻¹)
Isıl Genleşme Katsayısı (Coefficient of Thermal Expansion)	-1,0e-007	2,2e-005	2,2e-005

Mekanik Özellikler

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	2000	50	50
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	X: -1200	Y: -200	Z: -200
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 80	YZ: 50	XZ: 80

Özellik	X Yönü (MPa)	Y Yönü (MPa)	Z Yönü (MPa)
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	1,5e-002	5,0e-003	5,0e-003
Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	-1,0e-002	-2,0e-002	-2,0e-002
Kayma Dayanımı (Shear Strength)	XY: 2,5e-002	YZ: 2,5e-002	XZ: 2,5e-002

2.3 Metot

Yapılan bu araştırma, ANSYS paket programı üzerinden modellenerek ve gerekli sınır şartları tariflenerek gerçekleştirilecek ve elde edilen veriler, polimer kompozit levhanın termomekanik davranışını tanımlayan modellerle ilişkilendirilecektir. Bu modeller, malzemenin karmaşık davranışlarını daha iyi anlamak ve gelecekteki tasarımlar için rehberlik sağlamak amacıyla kullanılabilecektir.
İlk adım, polimer kompozit levhanın başlangıç mekanik ve termal özelliklerinin belirlenmesidir. Bu, malzemenin bileşenlerinin belirlenmesi, mikro yapısal analizlerin yapılması ve başlangıç modül, mukavemet, termal iletkenlik gibi temel özelliklerin ölçülmesini içerebilir.

2.4 Ansys'in polimer kompozit malzemeler için kullanımı

Ansys, polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışının analizi için güçlü bir mühendislik simülasyon yazılımıdır. Bu yazılım, polimer kompozit malzemelerin tasarım aşamasında yüksek performanslı analizler yapılmasına olanak sağlar.
Ansys, polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışını çeşitli analiz yöntemleriyle inceleyebilir. Bunlardan biri, malzemenin gerilme ve şekil değiştirme tepkilerini belirlemek için sahip olduğu Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanmaktır. SEM malzemenin geometrisini ayrık parçalara (elemanlara) bölerek kompleks analizler yapmayı sağlar.
Ansys, polimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çeşitli simülasyon araçları sunar. Gerilme analizi, malzemenin üzerine etki eden dış kuvvetlere ve sıcaklığa bağlı gerilme dağılımını hesaplamak için kullanılır. Şekil değiştirme analizi ise malzemenin deformasyon davranışını ve yapısal bütünlüğünü belirlemek için kullanılır.
Ayrıca Ansys, polimer kompozit malzemelerin termal davranışını da analiz edebilir. Termal analiz, malzemenin sıcaklık kazanımına veya kaybına bağlı olarak nasıl tepki verdiğini değerlendirir. Bu analiz, malzemenin termal genleşme, ısı dağılımı ve termal gerilmeler gibi termal davranışlarına ışık tutar.

Ansys, polimer kompozit malzemelerin tasarım aşamasında kullanılabilecek en iyi malzeme seçiminde ve yapısal olarak optimize edilmesi konusunda çeşitli modelleme ve simülasyon araçları sunarak mühendislerin karar verme sürecini kolaylaştırır. Ayrıca, mevcut tasarımların gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceğini tahmin etmek için yapısal analiz yapmak suretiyle test etme imkanı sağlar.

Sonuç olarak, Ansys kullanımı, mühendislerin daha etkin tasarımlar yapmalarını, malzemelerin performansını optimize etmelerini ve ürünlerin mukavemet ve dayanıklılığını artırmalarını sağlar. Mühendisler, bu yazılımı kullanarak daha iyi tasarımlar yapabilir, malzemelerin performansını optimize edebilir ve ürünlerin mukavemet ve dayanıklılığını artırabilir. Polimer kompozit malzemelerin gelecekteki kullanım alanlarında büyük bir potansiyele sahip olmasıyla birlikte, Ansys'in analiz yetenekleri daha da önem kazanmaktadır.

3. Modelleme ve Analiz

3.1 Malzeme modellemesi ve geometri oluşturma

Polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışını analiz etmek için doğru malzeme modellemesi ve geometri oluşturma önemlidir. Bu adımlar, sonuçların doğruluğunu ve analizin güvenilirliğini sağlamak için dikkatlice yapılmalıdır.
Malzeme modellemesi, malzemenin fiziksel özelliklerini ve davranışını doğru bir şekilde temsil etmeyi amaçlar. Bu nedenle, uygun malzeme modeli seçimi son derece önemlidir.
Geometri oluşturma aşamasında, polimer kompozit malzemenin gerçek dünya geometrisini doğru bir şekilde temsil etmek önemlidir. Bu adım, genellikle CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımları kullanılarak gerçekleştirilir. Malzeme geometrisinin hassasiyetle modellenmesi, analizin doğruluğunu ve sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir.

3.2 Sınır koşullarının belirlenmesi

Polimer kompozit malzemelerin termomekanik davranışını anlamak için, doğru sınır koşullarını belirlemek önemlidir. Sınır koşulları, malzemenin simülasyon sırasında maruz kaldığı dış etkileri temsil eder.

Sınır koşulları, birçok farklı faktörü içerebilir. Öncelikle, malzemenin üzerine uygulanan kuvvetler veya gerilmeler dikkate alınmalıdır. Bu, malzemenin gerilme dağılımının nasıl oluştuğunu ve malzemenin nasıl deforme olduğunu belirleyecektir.

Ayrıca, sıcaklık koşulları da polimer kompozit malzemelerin davranışını etkileyen önemli bir faktördür. Malzemede ısı birikimi veya sıcaklık değişimleri, yapının genleşmesine veya büzülmesine neden olabilir. Bu nedenle, simülasyon sırasında malzeme üzerindeki sıcaklık etkilerinin dikkate alınması önemlidir.
Sınır koşullarını belirlemek için deneysel veriler veya fiziksel modeller kullanılabilir. Deneysel veriler, malzemenin gerçek davranışıyla ilgili bilgiler sağlar. Fiziksel modeller ise, malzemenin matematiksel olarak tanımlanmasını ve simülasyonların gerçekçi sonuçlar üretmesini sağlar.

3.3 Termomekanik analiz adımları

Termomekanik analiz, polimer kompozit malzemelerin termal ve mekanik davranışını incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, malzemenin sıcaklık değişimleri, termal genleşme, mekanik gerilmeler ve deformasyonlar gibi termal ve mekanik etkiler altında nasıl davrandığını belirlemeyi amaçlar. Ansys yazılımı, bu tür analizler için yaygın olarak kullanılan bir simülasyon aracıdır ve termomekanik analiz adımları genellikle aşağıdaki şekilde sıralanır:

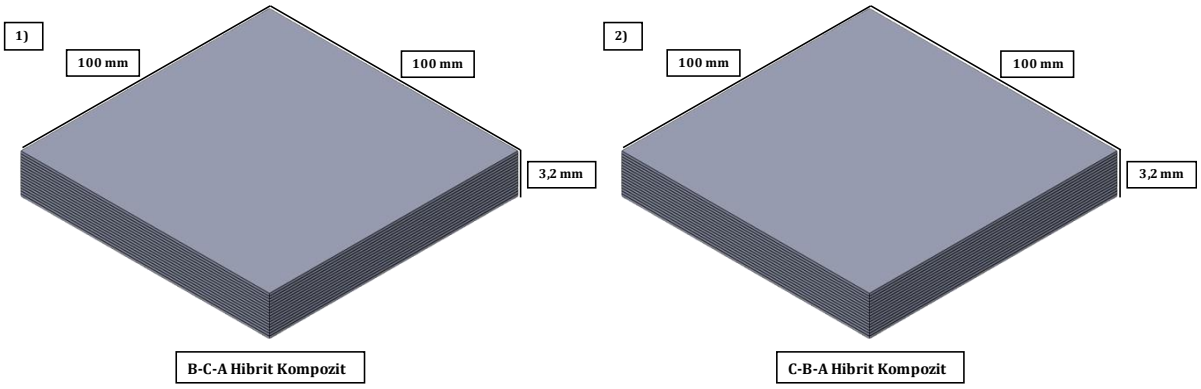
3.3.1. Geometri Tanımlama: İlk adım, analiz yapılacak olan polimer kompozit malzemenin geometrisinin tanımlanmasıdır (Şekil 4). Bu adımda, malzemenin boyutları, şekli ve bölümleri belirlenir. Geometri, CAD yazılımları veya önceden oluşturulmuş modeller kullanılarak tanımlanabilir.

Tablo 4. Model Ölçüleri Tablosu.

Sınır Kutusu (Bounding Box)	Değerler
Uzunluk X	100 mm
Uzunluk Y	100 mm
Uzunluk Z	3.2 mm

3.3.2. Belirlenen katmanlar:

1. Bazalt-Karbon-Aramid-Bazalt-Karbon-Aramid-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Aramid-Karbon-Bazalt-Aramid-Karbon-Bazalt
2. Karbon-Bazalt-Aramid-Karbon-Bazalt-Aramid-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Bazalt-Aramid-Bazalt-Karbon-Aramid-Bazalt-Karbon
(Şekil 4).



Şekil 4. Hibrit Kompozitlerin Katman ve Geometri Görseli.

3.3.3. Katmanların ve dizilimin seçim kriterleri

Mekanik Performans:
Basalt ve Karbon: Yüksek mukavemet ve sertlik özellikleriyle öne çıkan bu malzemeler, kompozitin taşıma kapasitesini artırmak ve dayanıklılığını sağlamak için stratejik olarak yerleştirilmiştir. Basalt lifleri, darbe dayanımı ve ısıya karşı direnç sağlarken karbon lifleri, hafiflik ve yüksek elastik modül sunar.
Aramid: Darbe dayanımını artırmak ve çatlama riskini azaltmak için aramid lifleri kullanılmıştır. Özellikle ara katmanlarda kullanılarak enerji yutma kapasitesi artırılmıştır.

Katman Dizilimi:
Katmanlar, simetrik bir şekilde yerleştirilerek malzeme içinde termal ve mekanik gerilmelerin homojen bir şekilde dağıtılması hedeflenmiştir. Simetrik dizilim, eğilme ve burulma gibi yükler altında deformasyon riskini azaltır. Dizilimde, farklı malzemelerin özellikleri bir araya getirilerek her bir katmanın zayıf yönleri diğer katmanlar tarafından desteklenmiştir. Örneğin, karbon liflerinin kırılganlığı aramid ve bazalt lifleriyle dengelenmiştir.

Üretilebilirlik:
Katman dizilimi, üretim sürecinde kolaylık sağlamak amacıyla basit ve tekrarlanabilir bir şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan malzemelerin ticari olarak erişilebilir ve maliyet etkin olması göz önünde bulundurulmuştur. Özellikle bazalt ve aramid lifleri, hem maliyet avantajı hem de yüksek performans özellikleri sunduğu için tercih edilmiştir. Katman kalınlıkları ve geometri, üretim sırasında laminasyon ve presleme süreçlerinin sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesine uygun olarak belirlenmiştir.

3.3.4. Sınır koşulları

Analizin doğru sonuçlar verebilmesi için, malzeme üzerindeki sınır koşullarının belirlenmesi gereklidir. Bu adımda, malzemenin etkileneceği sıcaklık, basınç veya kuvvet gibi dış etkilerin tanımlanması önemlidir.

Tablo 5. Termal Sınır Şartları Tablosu.

Kapsam			
Seçim Yöntemi	Geometri Seçimi		
Geometri	1 Yüzey	5 Yüzey	1 Yüzey
Tanım			
Tür	Sıcaklık	Mükemmel İzolasyon	Isı Akışı
Büyüklük	25 °C (kademeli)	0 W	70 W (kademeli)

Tablo 6. Statik Sınır Şartları Tablosu.

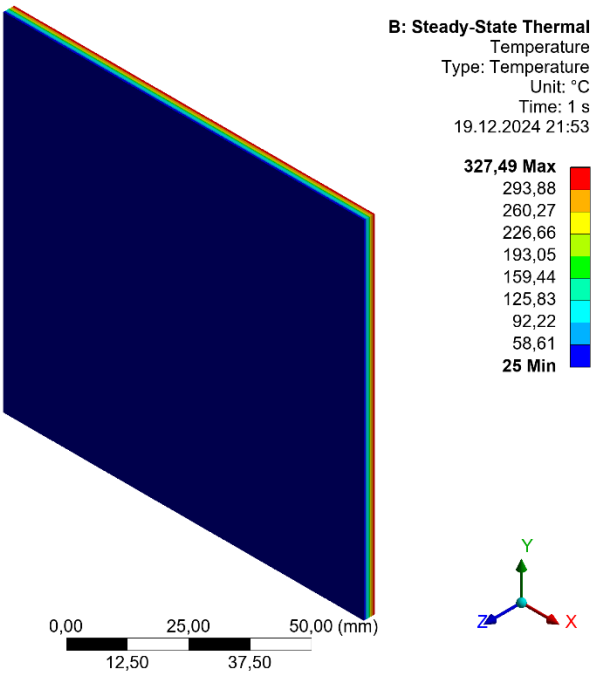
Nesne Adı	Sabit Destek
Durum	Tam Tanımlı
Kapsam	
Seçim Yöntemi	Geometri Seçimi
Geometri	4 Yüzey
Tanım	
Tür	Sabit Destek
Bastırılmış	Hayır

3.4. Analiz

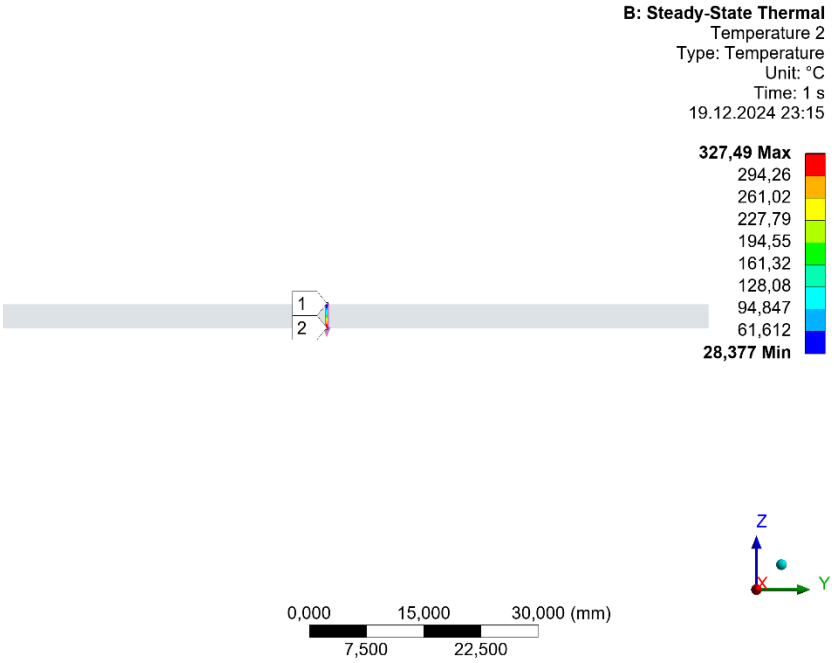
Bu aşamada, malzemenin termal ve mekanik davranışlarının simülasyonları gerçekleştirilmektedir. Ansys yazılımı, termal genleşme, ısı transferi ve mekanik yüklerin etkilerini dikkate alarak analiz sonuçlarını hesaplar.
Sonuçların Değerlendirilmesi: Analiz sonuçları doğrulukları ve tutarlılıkları açısından dikkatli bir şekilde değerlendirilir. Sonuçlar, malzemenin termal genleşme davranışı, stres dağılımı, deformasyon miktarı gibi önemli bilgiler sağlayabilir.
Termomekanik analiz adımları, polimer kompozit malzemelerin davranışı hakkında önemli bilgiler sunabilir. Bu adımların doğru bir şekilde uygulanması, analiz sonuçlarının güvenilir ve gerçekçi olmasını sağlar. Ansys yazılımı, analiz adımlarının kolayca takip edilmesini sağlayarak, bu tür analizlerin daha verimli bir şekilde yapılmasına yardımcı olur.

3.4.1 BCA katmanlı levha için analiz sonuçları

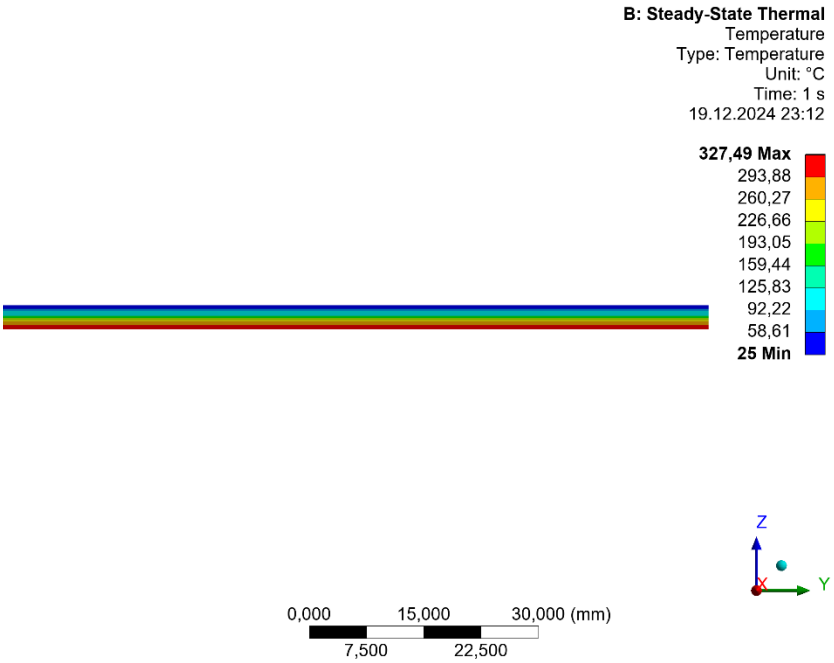
3.4.1.1 BCA katmanlı levha için termal analiz çıktıları



Şekil 5. Termal analiz görseli 1.

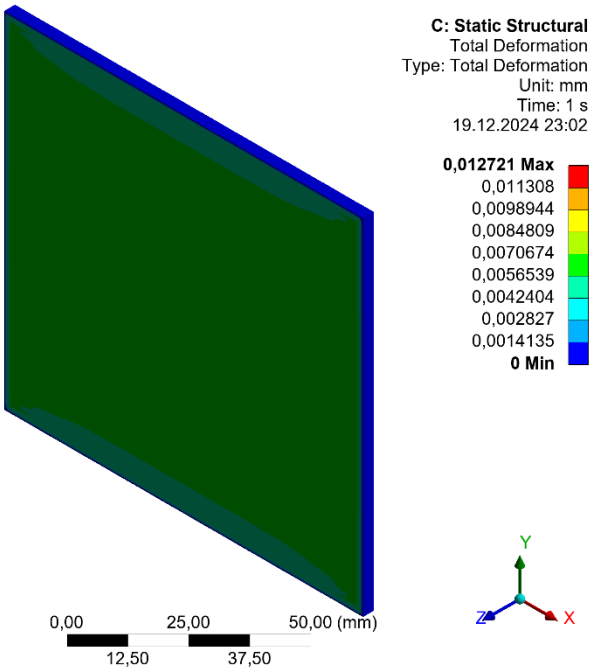


Şekil 6. Termal analiz görseli 2.



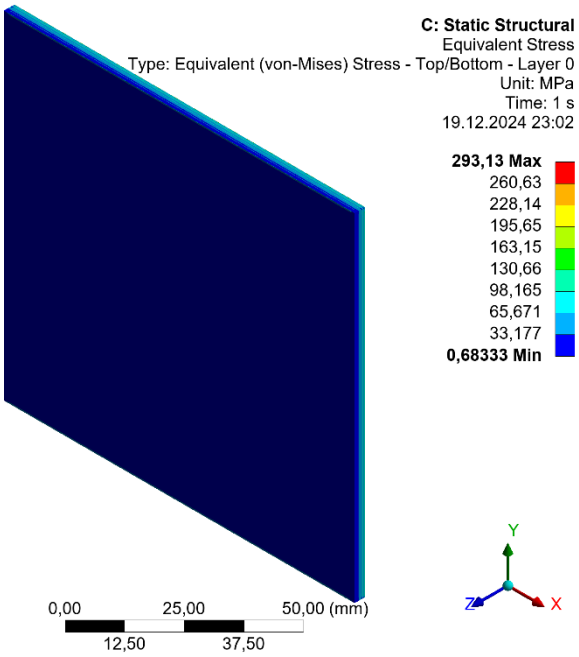
Şekil 7. Termal analiz görseli 3.

3.4.1.2 BCA Katmanlı Levha için Total Deformasyon Analizi Sonuçları

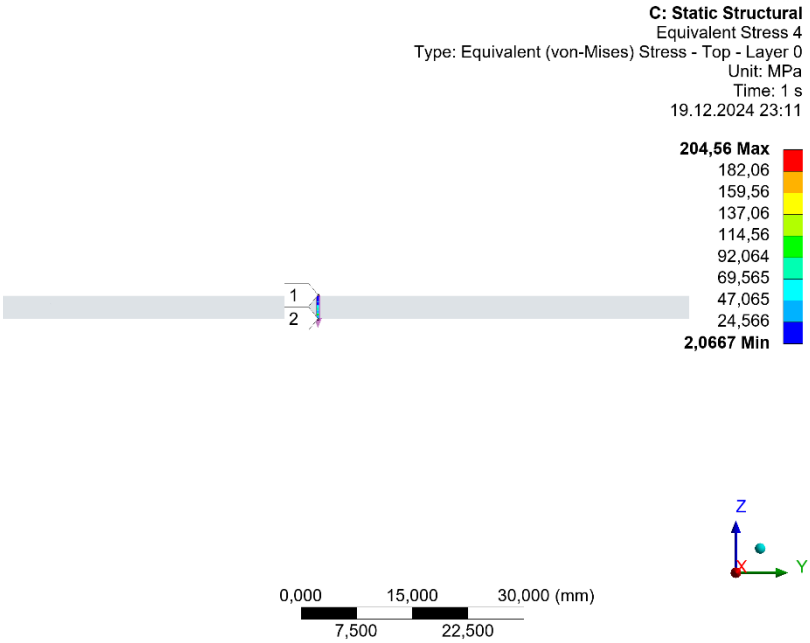


Şekil 8. Total Deformasyon Analiz görseli.

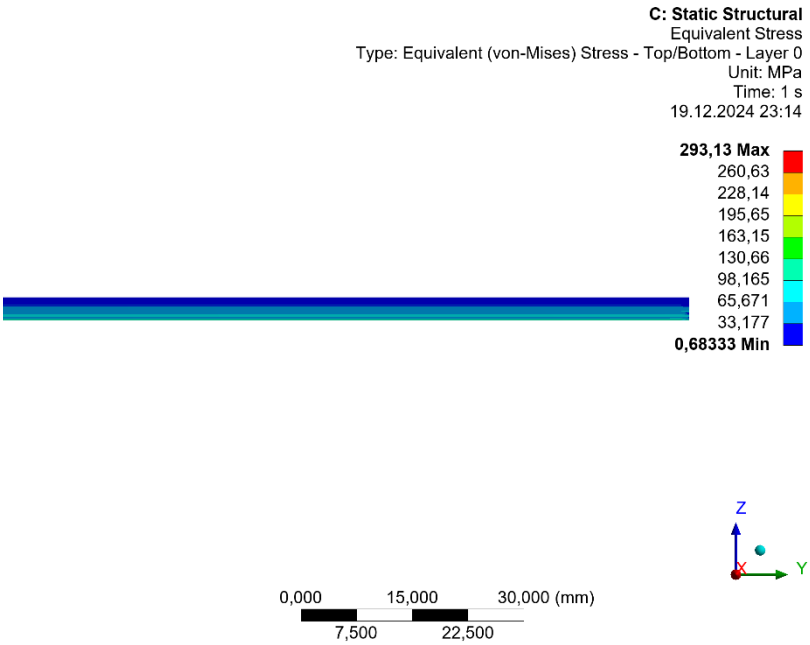
3.4.1.3 BCA Katmanlı Levha için Von Mises Gerilme Analizi Sonuçları



Şekil 9. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 1.



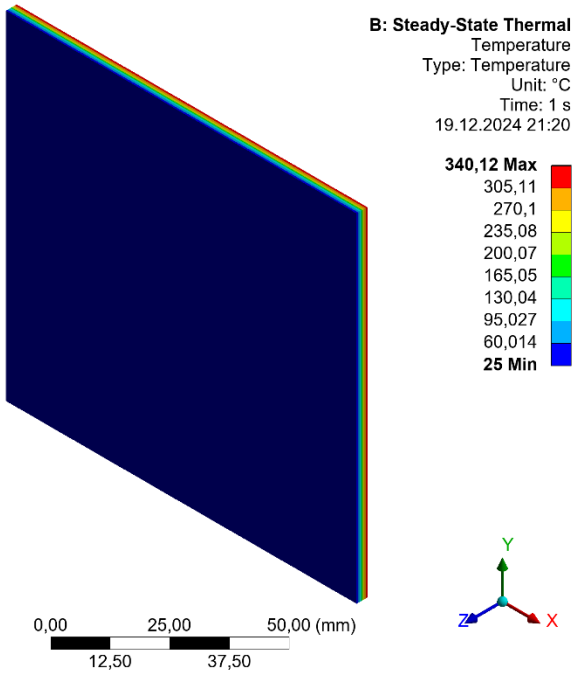
Şekil 10. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 2.



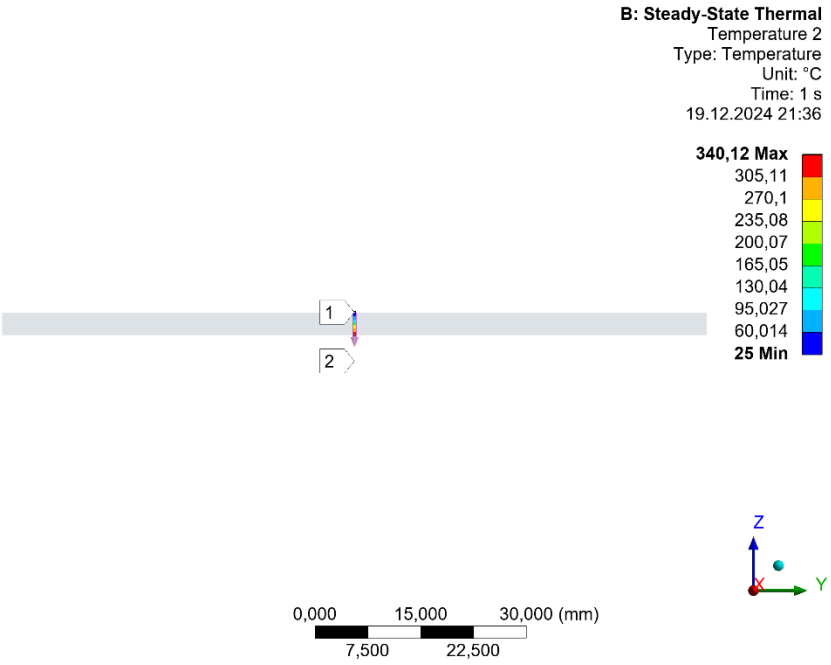
Şekil 11. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 3.

3.4.2 CBA katmanlı levha için analiz sonuçları

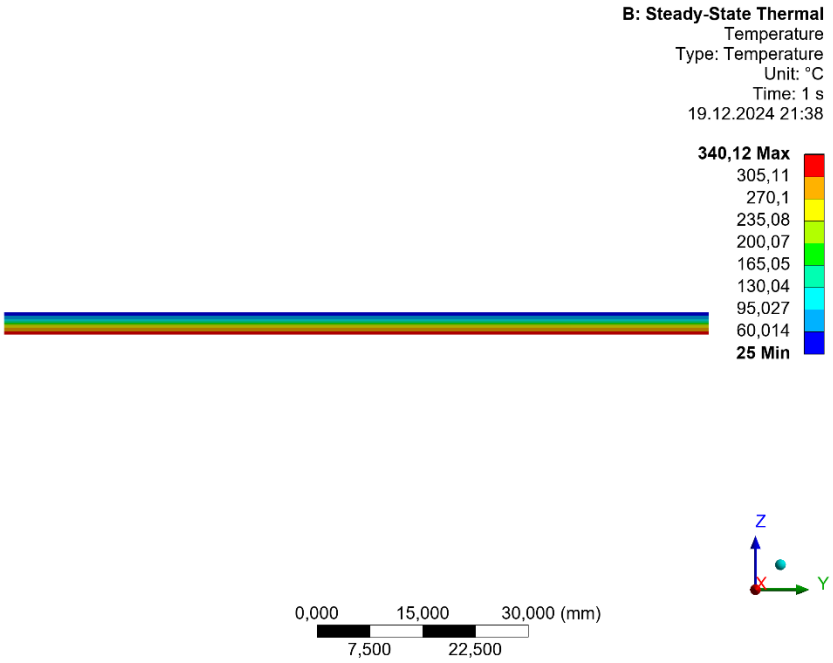
3.4.2.1 CBA katmanlı levha için termal analiz çıktıları



Şekil 12. Termal analiz görseli 1.

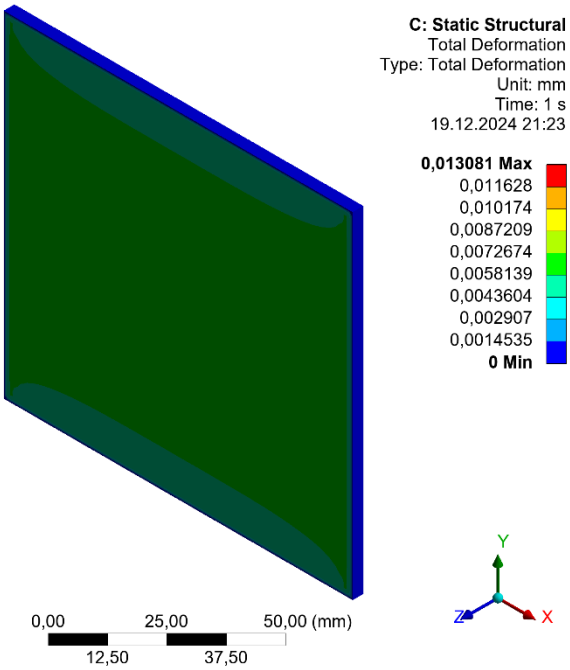


Şekil 13. Termal analiz görseli 2.



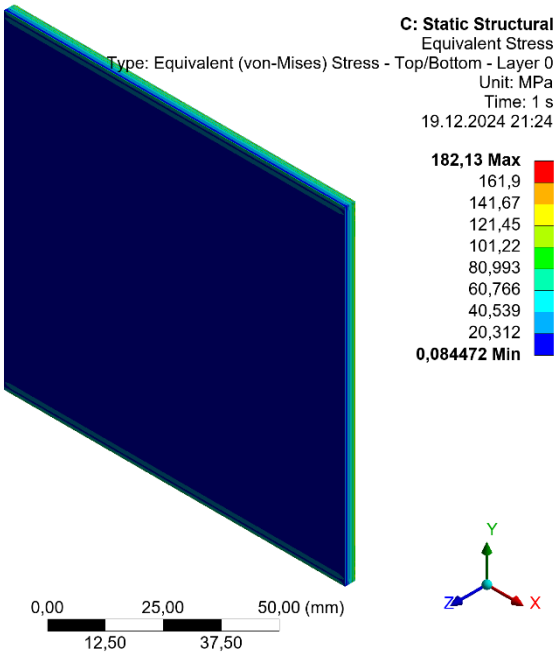
Şekil 14. Termal analiz görseli 3.

3.4.2.2 CBA katmanlı levha için total deformasyon analizi sonuçları

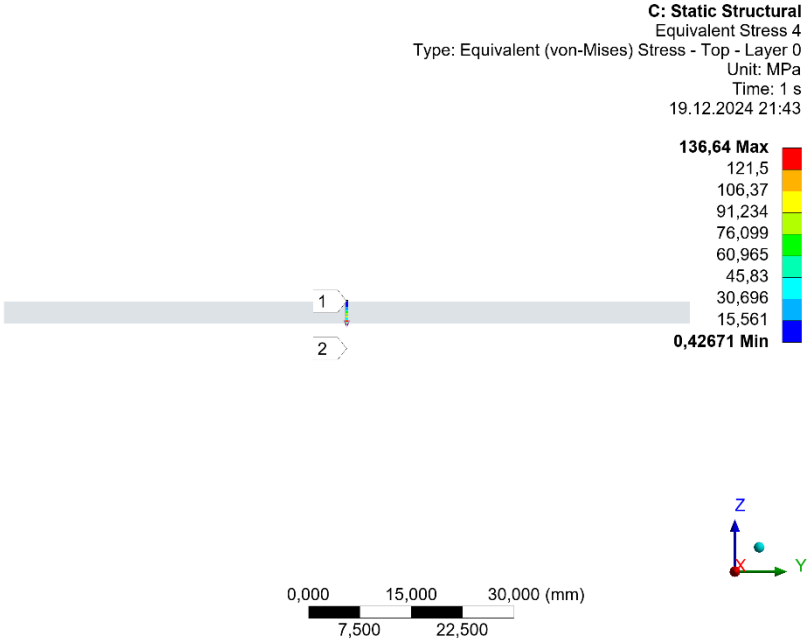


Şekil 15. Total Deformasyon Analiz görseli.

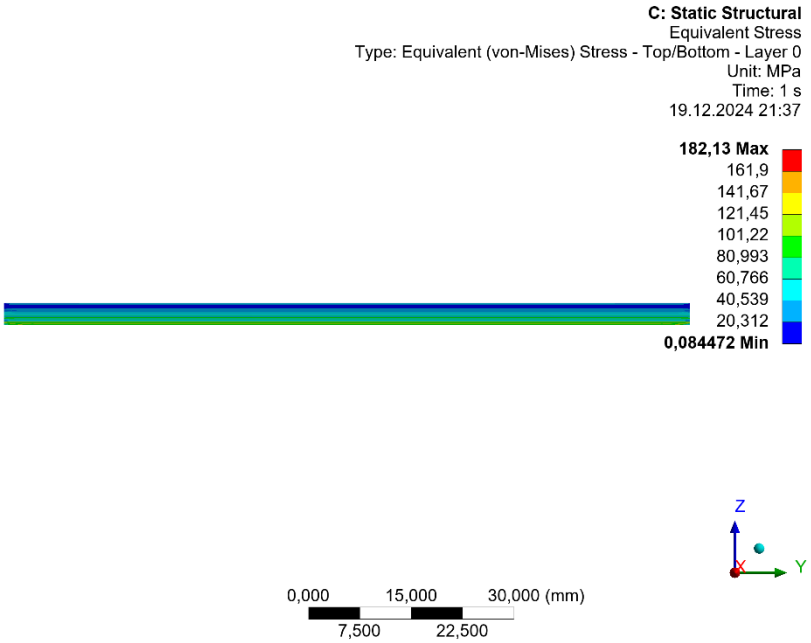
3.4.2.3 CBA katmanlı levha için von mises gerilme analizi sonuçları



Şekil 16. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 1.



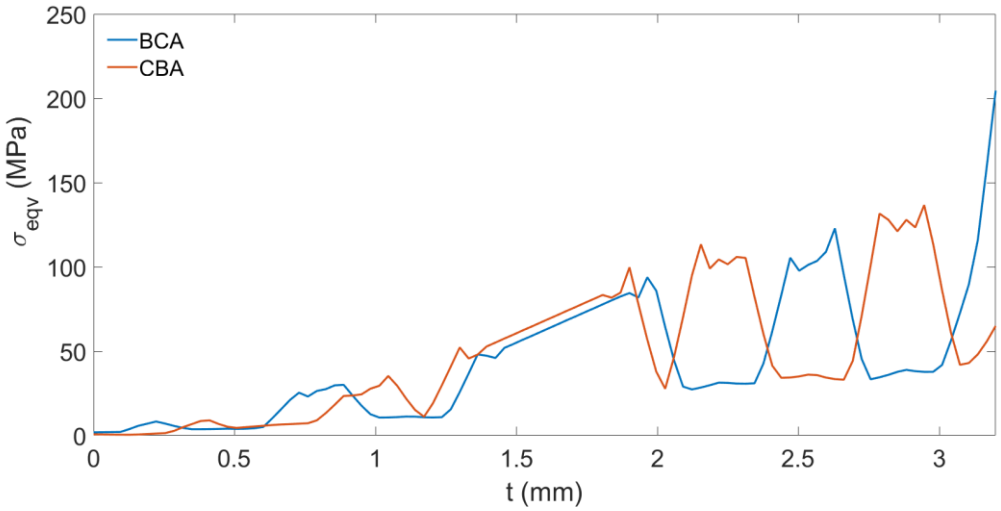
Şekil 17. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 2.)



Şekil 18. Von-Mises Gerilme Analiz görseli 3.

4. Bulgular

Bu çalışma kapsamında polimer kompozit levhaların termomekanik davranışı sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.
ANSYS yazılımı aracılığıyla, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışlarının sayısal modellenmesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçları, levhanın farklı sıcaklık ve mekanik yük koşullarında nasıl davrandığını göstermektedir.
Özellikle, levhanın sıcaklık dağılımı, termal gerilmeler, gerinme, deformasyon ve diğer mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının karmaşıklığını ve çeşitliliğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar görüntü ve tablo halinde verilmiştir ve bu neticeye göre, bu çalışma, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının araştırılması ve ANSYS üzerinden sonlu elemanlar analizinin yapılması amacıyla deneysel ve sayısal yöntemlerin birleştirilmesini içeren karma bir araştırma modeli izlemiştir.
Elde edilen bulgular, deneysel ve sayısal analizlerin sonuçları bir araya getirilerek incelenmiş ve polimer kompozit levhaların termomekanik davranışı hakkında önemli bir anlayış sağlanmıştır. Bulgular, levhanın termal ve mekanik özelliklerinin malzeme bileşimi, sıcaklık değişimi ve mekanik yükler gibi faktörlere nasıl bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.
Bu araştırma modeli, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının kapsamlı bir şekilde araştırılmasını sağlamış ve malzemenin endüstriyel uygulamalarda daha etkin bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunmuştur.



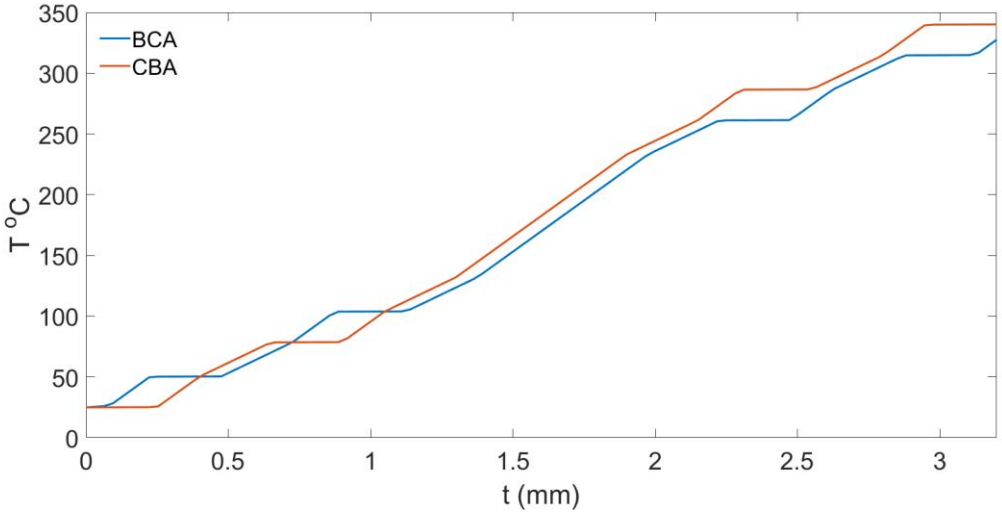
Şekil 19. Kalınlığa Göre Gerilme Sonuçları Karşılaştırma

4.1 Gerilme dağılımı

BCA ve CBA katman istiflemesi için eşdeğer gerilme değerleri t (kalınlık) boyunca farklılık göstermektedir.
BCA istiflenmesinde, maksimum gerilme değeri yaklaşık 220 MPa civarındayken, CBA istiflenmesinde ise bu değer 200 MPa'ı aşmamaktadır.
CBA istiflenmesi, t = 1.5-2.5 mm arasında belirgin dalgalanma gösterirken, BCA istiflenmesinde bu dalgalanmalar daha yumuşaktır.

4.2 Gerilme artış eğilimi

Her iki katman istiflenme şekli için de gerilme, kalınlık arttıkça genel bir artış eğilimi göstermektedir.
BCA istiflenmesinde, gerilme artışı daha düzenli bir yapıya sahipken, CBA istiflenmesinde ani yükselme ve düşüşlerle karakterizedir.
Mekanik Dayanım:
BCA hibrit kompozit levha için daha yüksek maksimum gerilme değerlerine ulaşılsa da, bu istiflenme şekli için gerilme dağılımı daha kararlı bir yapıya sahiptir. Bu, BCA istiflenmesinin mekanik dayanım açısından daha öngörülebilir bir davranış sergilediğini göstermektedir.
CBA hibrit kompozit levhada dalgalanmalar, katmanlar arası gerilme transferinde dengesizliklere ve muhtemel çatlak başlama noktalarına işaret etmektedir.
Termomekanik Stabilite:
CBA katman istiflenmesinde ani gerilme değişimleri, sıcaklık ve mekanik yüklerin birleşik etkisi altında daha hassas bir yapı oluşturabilir. Bu durum, malzeme ömrünü kısaltabilir.



Şekil 20. Kalınlığa Göre Sıcaklık Sonuçları Karşılaştırma.

4.3 Sıcaklık dağılımı

Her iki hibrit kompozit levha için de sıcaklık t (kalınlık) boyunca düzenli bir artış eğilimi göstermektedir. CBA istiflemesinde sıcaklık değerleri, BCA istiflemesine göre hafifçe daha yüksektir ve t = 3 mm kalınlıkta maksimum sıcaklık yaklaşık 340 °C'ye ulaşmaktadır. BCA katman istiflenmesinde sıcaklık dağılımı daha dengeli bir şekilde artış göstermektedir.

Mekanik Performans: BCA şeklinde istiflenen hibrit kompozit levhada gerilme artışı daha düzenli ve kararlı bir yapı sunmaktadır. Bu, yük aktarımının daha dengeli olduğunu ve bu katmanlı yapının mekanik dayanım açısından daha güvenilir olduğunu göstermektedir. CBA istiflenme şeklindeki dalgalanmalar, katmanlar arası gerilme transferinin düzensiz olduğunu ve çatlak başlangıcı için potansiyel zayıf noktalar oluşturabileceğini göstermektedir.

Termal Performans: CBA hibrit kompozit levhada sıcaklık değerlerinin daha yüksek olması, bu istiflenme şeklinin termal yükler altında daha büyük termal genleşme streslerine maruz kalabileceğini göstermektedir. BCA diziliminde sıcaklık artışının daha homojen olması, termal stabilite açısından avantaj sağlamaktadır.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, polimer kompozit levhaların termomekanik davranışının deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılması üzerine odaklanmıştır. Deneysel çalışmalar, levhaların termal genleşme katsayıları, elastik modül değerleri ve termal iletkenlikleri gibi temel özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel veriler, sonlu elemanlar analiziyle uyumlu olacak şekilde doğrulanmıştır.

Sayısal analizler, ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve levhaların farklı sıcaklık ve mekanik yük koşullarında nasıl davrandığı simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları, levhanın termomekanik davranışının genel özelliklerini ve malzeme bileşimine, sıcaklık değişimine ve mekanik yüklere nasıl yanıt verdiğini göstermiştir.

Termomekanik analiz sonuçları, polimer kompozit malzemelerin tasarımında bir yol gösterici olarak kullanılabilir. Bu verilere dayanarak, malzeme ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesi ve malzeme davranışının geliştirilmesi mümkündür. Bu da daha güvenilir ve dayanıklı polimer kompozit ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

BCA ve CBA hibrit kompozit yapıların gerilme dağılımı incelendiğinde, BCA istiflenme şeklindeki kompozit yapının daha kararlı ve öngörülebilir bir performans sunduğu görülmüştür.
CBA istiflenme şekline sahip hibrit kompozit yapıda gözlemlenen dalgalanmalar, yüksek gerilme konsantrasyonlarına neden olabileceği için termomekanik dayanım açısından dezavantajlıdır.

BCA hibrit kompozit levha hem mekanik hem de termal yükler altında daha kararlı bir performans sergilemektedir. Bu istiflenme şeklinin maksimum gerilme ve sıcaklık dağılımı açısından daha dengeli olduğu tespit edilmiştir. CBA dizilimindeki dalgalı gerilme ve daha yüksek sıcaklık değerleri, bu istiflenme şeklinin termomekanik dayanım açısından daha zayıf bir performans sergileyebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, hibrit kompozit yapılar için katman istiflenme şekli, mekanik ve termal yüklerin birlikte dikkate alınarak optimize edilmesi gereken kritik bir parametredir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, termomekanik analizlerin hibrit kompozitlerin istifleme sırasının tasarım sürecindeki önemini vurgulamaktadır.

6.Kaynakça

[1] Aran A., “Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler”, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1420, Gümüşsuyu-İstanbul, 1990.

[2] Şahin Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, Gazi Kitapevi, Ankara, 2000.

[3] Sayman O., Aksoy S., “Kompozit Malzemeler”, Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 1995.

[4] Al-Kubati, Abdulrahman. (2019). Kompozit Malzemeler. 10.13140/RG.2.2.15696.53768.

[5] Zhang, H., Li, Y., Wang, Z. (2020). "The effect of hybrid reinforcement on the mechanical and thermal properties of fiber composites." Journal of Composite Materials, 54(10), 1231-1245.

[6] Singh, A., Gupta, N., Kumar, A. (2022). "Finite element analysis of hybrid composite materials under thermal and mechanical loads." Materials Science and Engineering, 126(2), 334-342.

[7] Liang, Y., Liu, J., Zhao, P. (2019). "Structural performance of hybrid carbon-basalt composites under bending stress." Composites Part B: Engineering, 173, 106946.

[8] Wang, S., Huang, X., Feng, J. (2021). "Thermal and mechanical behavior of hybrid composites under four-sided compression." Journal of Reinforced Plastics and Composites, 40(5), 321-329.

[9] Zhang, X., Chen, Y., Wu, H. (2020). "Thermal expansion characteristics of hybrid fiber composites in various loading conditions." International Journal of Thermal Sciences, 153, 106679.

[10] Kim, J., Park, S., Lee, C. (2018). "Fracture toughness of hybrid composite materials reinforced with carbon and basalt fibers." Composites Science and Technology, 166, 57-65.

[11] Chen, R., Wang, T., Li, Y. (2019). "Thermomechanical properties of hybrid composites: A comparative study." Materials & Design, 178, 107838.

[12] Liu, Y., Zhou, J., Li, F. (2020). "Mechanical and thermal properties of carbon, aramid, and basalt fiber-reinforced hybrid composites." Composite Structures, 235, 111791.

[13] Smith, A., Jones, L., Patel, N. (2021). "Mechanical performance of polymer matrix composites reinforced with carbon and basalt fibers." Journal of Applied Polymer Science, 138(14), 50493.

[14] Xiang, H., Wang, Z., Liu, C. (2017). "Thermal performance of hybrid composites in high-temperature environments." Journal of Composite Materials, 51(8), 1065-1074.

[15] Kim, J., Park, S., Lee, C. (2018). "Fracture toughness of hybrid composite materials reinforced with carbon and basalt fibers." Composites Science and Technology, 166, 57-65.

[16] Gupta, P., Singh, V., Kumar, R. (2020). "Behavior of hybrid composites under varying temperature and load conditions." Composite Structures, 243, 112249.

[17] Rahman, A., Nair, P., Iqbal, Z. (2019). "Durability of hybrid composites under environmental exposure." Materials & Design, 162, 345-352.

Sürdürülebilir Geopolimer Harçların Yaşam Döngüsü ve Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi: Farklı Senaryolar Üzerine Bir Çalışma

Ezgi Örklemez[1*], Brial Asif Hayi Paka[1], Ahmet Ceylan[2], Serhan İlkentapar[1], Uğur Durak[1], Okan Karahan[1], Cengiz Duran Atiş[1]

[1] Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ
[2] Kayseri Şeker Fabrikası A.Ş., KAYSERİ

* Sorumlu Yazar : Ezgi Örklemez

(Alınış / Received: 16.12.2024, Kabul / Accepted: 07.01.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 31.01.2025)

Anahtar Kelimeler
Geopolimer
Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
Uçucu Kül
Diatomit
Sürdürülebilirlik

Öz: Uçucu kül esaslı geopolimer bağlayıcıların mekanik özellikleri inşaat ve yapı sektöründe kullanımı için önem arz etmektedir. Ayrıca inşaat ve yapıda kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinin yanı sıra iklim değişikliği ile mücadelede Avrupa Yeşil Mutabakatı'nda (European Green Deal) yer alan çevresel hedefler inşaat sektörünüde yakından ilgilendirmektedir. Bu kapsamda bu çalışmada, bağlayıcı olarak F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer numunelerin mekanik özellikleri ve çevresel etkileri üzerinde diatomit ikamesinin etkisi araştırılmıştır. Karışımlarda, bağlayıcı malzeme ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında diatomit ile ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Geopolimer numunelere 90°C'de 24, 48 ve 72 saat ısıl kür uygulanmıştır. Geopolimer numuneler üzerinde farklı kür sürelerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin mikro yapısını incelemek için diatomit ikameli geopolimer hamurların FESEM görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %1, %2 ve %3 oranlarında diatomit içeren harçların eğilme ve basınç dayanımlarında artış olduğu görülmüştür. En yüksek mekanik dayanım sonucu %3 diatomit içeren harçlarda gözlenmiştir. FESEM görüntüleri sonucunda %3 diatomit ikamesi ile üretilen geopolimerin daha yoğun ve kompakt bir mikro yapı sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca farklı senaryolara göre diatomit ikameli ve diatomit ikamesiz geopolimer harçların olumlu ve olumsuz çevresel etkileri belirlenmiştir. Sonuç olarak çevreci üretilmek istenen geopolimer harçlara çevresel çıktı olarak etki eden diatomit oranı, aktivatör oranı, aktivatör türü, kür süresi, kür sıcaklıkları ve hammaddeye ulaşım mesafesi gibi faktörlerin görece olumlu ve olumsuz sonuçları irdelenmiştir.

Assessment of Life Cycle and Mechanical Properties of Sustainable Geopolymer Mortars: A Study on Different Scenarios

Keywords
Geopolymer
Life Cycle Assessment
Fly Ash
Diatomite
Sustainability

Abstract: The mechanical properties of fly ash-based geopolymer binders are significant importance for their application in the construction and building sectors. Moreover, in addition to the mechanical properties of materials used in construction, environmental goals outlined in the European Green Deal, aimed at combating climate change, are also highly relevant to the construction industry. Within this scope, this study investigates the effects of diatomite substitution on the mechanical properties and environmental impacts of geopolymer samples produced using Class F fly ash as the binder. Geopolymer mortars were prepared by substituting the binder material with diatomite at ratios of 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% by weight. The geopolymer samples were subjected to heat curing at 90°C for 24, 48, and 72 hours. Flexural and compressive strength tests were conducted on the geopolymer samples at different curing durations. Additionally, the microstructure of the diatomite-substituted geopolymer pastes was examined using FESEM imaging. The results showed that mortars containing 1%, 2%, and 3% diatomite exhibited improvements in flexural and compressive strength. The highest mechanical strength was observed in mortars with 3% diatomite. FESEM

images revealed that the geopolymer produced with 3% diatomite substitution exhibited a denser and more compact microstructure. Furthermore, the positive and negative environmental impacts of diatomite-substituted and non-substituted geopolymer mortars were identified under different scenarios. In conclusion, factors such as the diatomite ratio, activator ratio, activator type, curing duration, curing temperature, and raw material transportation distance, which influence the environmental footprint of geopolymer mortars, were evaluated for their relatively positive and negative effects on producing environmentally friendly geopolymer mortars.

1. Giriş

Beton; su, çimento, agrega ve/veya katkı maddelerinden oluşan en yaygın yapı malzemelerinden birisidir. Beton üretiminde kullanılan çimento ise temel bir bağlayıcı malzeme olmasına rağmen, çimento üretimi atmosfere yüksek oranda CO_2 emisyonuna sebebiyet vermektedir. Bu emisyonun bir sebebi çimento üretiminin yoğun enerji gerektiren bir süreç olmasıdır [1]–[3]. Beton ve çimento sistemlerinin mevcut olan bu çevresel etkileri araştırmacıları daha çevreci yapı malzemelerine yönlendirmiştir. Bu çevreci olan yapı malzemelerinden birisi olan geopolimerlerin sentezinde cüruf, silis dumanı ve uçucu kül bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Geopolimer sentezinde tek tip bağlayıcının tek başına bir aktivatör ile kullanılması mümkün olduğu gibi farklı bağlayıcı grupları ve farklı aktivatörlerin birlikte kullanımı da mümkündür [4]–[9].

Çevreci geopolimer malzemeleri üretmek için kullanılan bağlayıcılardan birisi de uçucu küllerdir. Uçucu kül yapısında amorf bir yapıda bol miktarda reaktif alümina ve silika içerdiğinden yüksek puzolanik özellik göstermektedir [10]. Geopolimer bağlayıcıların sentezlenmesinde aktivatörler ve kür süreçleri önemli bir yer tutmaktadır. Öyle ki alkali aktivatörler, bağlayıcı yapıdaki katı alüminyum oksit ve silisyum oksidi çözmek için çok önemli bir rol oynamaktadır. Geopolimer sentezinde mekanik mukavemeti etkileyen diğer önemli faktör ise kürleme sıcaklığıdır [11]–[17]. Kürleme sıcaklıkları bağlayıcı ve aktivatör türüne bağlı olarak uygulanmakta olup oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara kadar değişebilmektedir. Kürleme sıcaklıklarına ek olarak, kürleme süreleri mekanik mukavemeti etkileyen başka bir faktör olarak belirlenmiştir [14], [18]–[20].

Uçucu kül tabanlı üretilen geopolimerin oda ısısında aktivasyonu uzun sürmekte ve mekanik dayanımının gelişimi çok zaman almaktadır [21], [22]. En düşük aktivasyon enerjisinin NaOH ile ayrı ayrı aktive edilen metakaolin, cüruf ve uçucu kül bazlı geopolimer bağlayıcı sistemlerde olduğu 20°C sıcaklıkta izotermal kalorimetre ile yapılan çalışmalarda açıklanmıştır [23].

Geopolimer üretiminde doğal puzolanların katkı olarak kullanılması son yıllarda yaygın hale gelmiştir. Bu doğal puzolanlardan birisi olan diatomit, amorf silisli fosilleşmiş tortulardan meydana gelmektedir. Amorf silika içeriğine ek olarak, diatomit genellikle karbonatlı ve killi mineraller, düşük kuvars ve feldispatlar içermektedir. Geniş yüzey alanları (geniş yüzey/yüksek hacim oranı), yüksek su emme veya tutma kapasiteleri gibi farklı özelliklere sahiptirler. Gözenekli mikro yapısı, hafifliği ve düşük ısı iletkenliği nedeniyle genellikle yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır [24]. Diatomitin amorf silika içeriği sayesinde, diatomitlerin geopolimer bağlayıcıların üretilmesinde iyi bir doğal kaynak olarak alternatif olacağı düşünülmektedir.

Literatürde yapılan önceki çalışmalarda geopolimer üretiminde silika dumanı yerine diatomitin kullanıldığı [25] bununla birlikte %100 oranına kadar diatomit ile geopolimer üretildiği ve burada aktivatör olarak Na_2SiO_3 ve NaOH kullanıldığı belirtilmiştir [26], [27]. Hafif agrega ile üretilen geopolimer sistemlerde diatomit ikamesi ile ısı iletkenlik katsayılarının düşürüldüğü rapor edilmiştir [28].

Gerek geopolimer sistemlerde gerekse geleneksel bağlayıcılarda sürdürülebilirlik gün geçtikçe daha önemli hale gelmektedir. Gerçek dünya verilerine dayalı sürdürülebilirlik faktörlerinin ölçülmesi, çeşitli çevresel etki kategorilerinde farkındalığın artırılması için son derece önem arz etmektedir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)-Life Cycle Assessment (LCA), inşaat sektöründe yapı malzemelerinin de faydalandığı tüm yaşam döngüsü veya belirtilen dönem boyunca çevresel etkilerini ölçmek ve değerlendirmek için kullanılan kritik bir metodolojidir. YDD verilerinin önemi, Çevresel Ürün Beyanları- Environmental Product Declaration (EPD'ler) gibi bilgi tabanlı belgeler oluşturmada da karşımıza çıkmaktadır. YDD'nın EPD'lerle ve ISO standartlarına uyumla birleştirilmesi, inşaat sektöründe sürdürülebilir uygulamaları teşvik etmektedir. Öyle ki önceki araştırmalarda, alkali ile aktive edilmiş ve geopolimer sistemler geleneksel çimentolu sistemlere kıyasla daha iyi çevresel performans sergilediği rapor edilmiştir. Buna ek olarak, bu çevreci sistemlerin geleneksel sistemlere göre %28 ile %80 daha az sera gazı emisyonuna sebebiyet verdiği belirtilmiştir [29]–[35].

Literatürdeki birçok geopolimer karışım tasarımı küresel ısınma potansiyelini (GWP) azaltarak daha olumlu sonuçlar göstermesine rağmen, aktivatörlerin diğer konsantrasyon etkisi kategorileri üzerindeki etkisinin geleneksel çimentolu karışımlara göre daha belirgin olduğu belirtilmiştir. McLellan vd. (2011), [36] geopolimer sistemlerin iklim değişikliği ile mücadelede belirli bir potansiyele sahip olduğunu bunula birlikte kullanılan taşıma türü, malzeme kaynağı ve enerjinin sera gazı emisyonlarını azaltabileceğini bildirilmiştir. Geopolimer sistemler için uygun olmayan bir bileşen ve/veya süreç seçilmesinin iklim değişikliği üzerinde daha negatif etkiye neden olabileceği vurgulanmıştır. Geopolimer betonun CO_2 emisyonlarından sorumlu diğer farktörlerin ise geopolimerlerde kullanılan alkali aktivatörlerin (hammadde madenciliğinden üretim sürecine kadar) ve yüksek hızlı kürleme süreçlerinin olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada, yüksek karbon emisyonlarına neden olan çimento yerine daha ekonomik ve sürdürülebilir bir malzeme olan geopolimer bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada uçucu kül ana bağlayıcı olarak, diatomit ise uçucu küle ikame edilen bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Diatomit katkılarının geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak, geleneksel çimentolu harçların ve uçucu kül bazlı geopolimer harçların çevresel etkileri, yaşam döngüsü analizi yoluyla farklı senaryolar ile karşılaştırılmıştır.

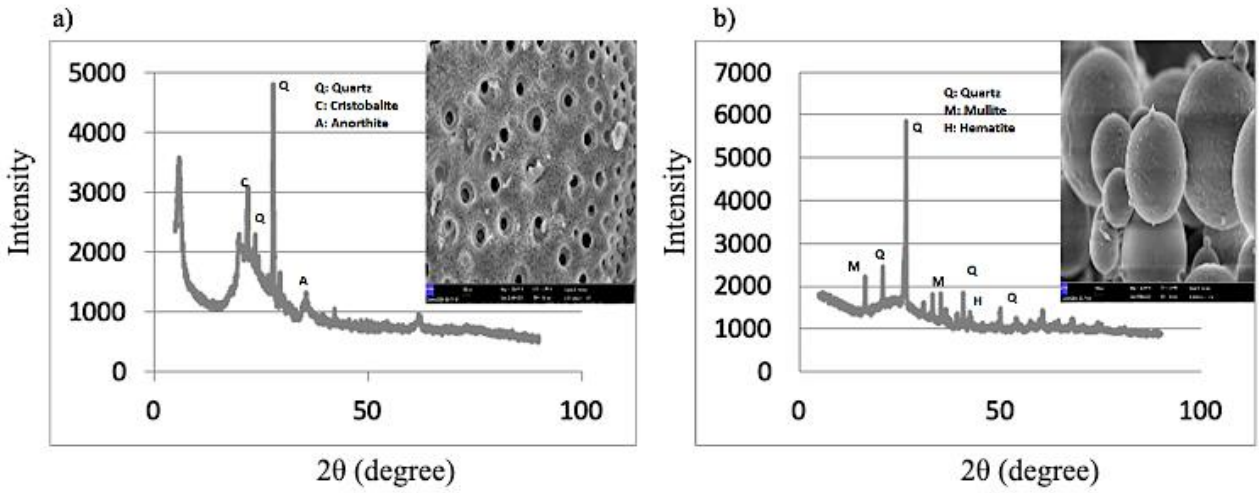
2. Materyal ve Metot

2.1.Materyal

Bu çalışma kapsamında kullanılan diatomit, Türkiye'nin Kayseri ili Hırka kasabasında bulunan diatomit yatağından elde edilmiştir. F sınıfı uçucu kül ise Zonguldak'taki Çatalağzı Termik Santralinden sağlanmıştır. **Tablo 1**'de diatomit ve uçucu külün kimyasal kompozisyonu verilmiş olup, **Şekil 1(a)** ve **1(b)**, de bağlayıcı malzemelerin FESEM görüntüsü ve XRD deseni sunulmuştur.

Tablo 1. Çatalağzı F sınıfı uçucu kül ve diatomitin kimyasal kompozisyonu

Oksit (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	CaO	SO_3	Cl^-	P_2O_5	TiO_2	Kızdırma Kaybı
Uçucu Kül	52.60	27.02	6.98	4.55	0.75	1.59	2.85	0.23	0.0043	-	-	3.42
Diatomit	75.70	6.55	3.82	0.99	0.87	1.2	2.68	-	-	0.48	0.26	7.39



Şekil 1. a) Diatomit; FESEM görüntüsü ve XRD deseni b) Uçucu kül; FESEM görüntüsü ve XRD deseni

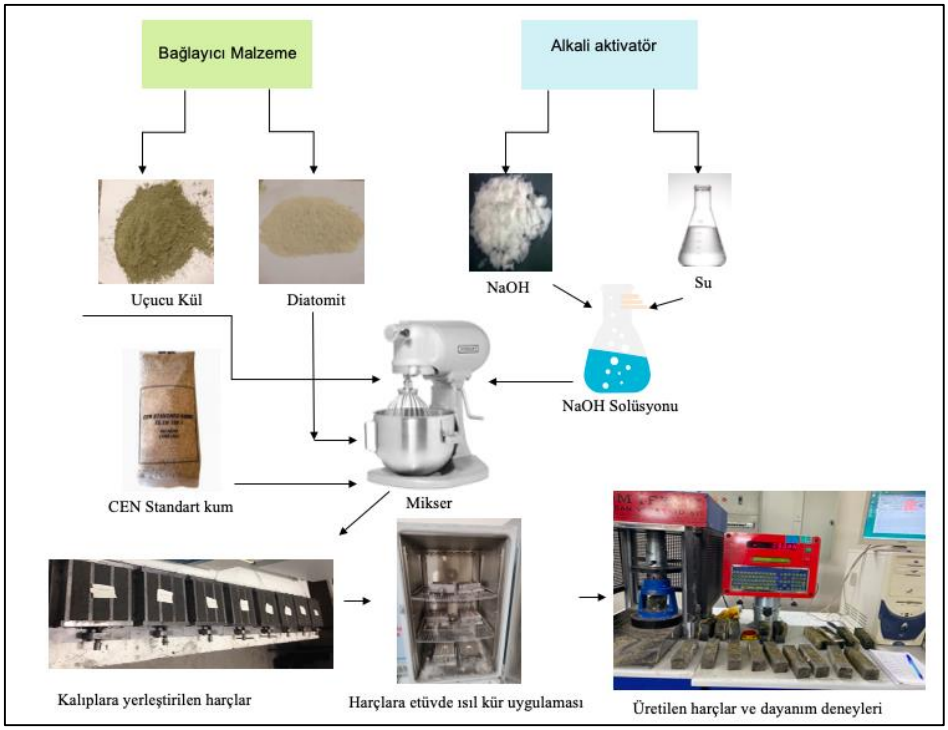
Geopolimer harç üretimi için TS EN 196-1 [37]'e uygun CEN standart kumu ve aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır. Aktivatörün kimyasal içeriği en az %97 saflık içermektedir. Harç karışımlarında içilebilir su kullanılmış olup TS EN 1008'e göre harç karışımında içilebilir su kullanımının uygunluğu belirtilmiştir. Uçucu kül ile imal edilen referans harcı (D0) ve diatomit ikameli harçlardan oluşan toplam 6 grup geopolimer harç üretilmiştir. Bu harçların karışım oranları **Tablo 2**'de sunulmuştur. Çözeltideki Na^+ oranı bağlayıcı miktarının %10'u olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı/kum oranı 3 ve bağlayıcı/su oranı 0,31 olarak seçilmiştir. Diatomit ikameleri toplam bağlayıcı miktarının uçucu küle göre ağırlıkça %1 (D1), %2 (D2), %3 (D3), %4 (D4) ve %5 (D5)'i olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Harçların karışım oranları

Harç Kodu	Uçucu Kül (g)	Diatomit (g)	Kum (g)	Na^+(%)	Su (g)
D0	450	_	1350	10	140
D1	445.5	4.5	1350	10	140
D2	441	9.0	1350	10	140
D3	436.5	13.5	1350	10	140
D4	432	18.0	1350	10	140
D5	427.5	22.5	1350	10	140

2.2. Metot

Geopolimer harçların üretim prosesi **Şekil 2**'de gösterilmiştir. Geopolimer harçlar üretilirken, bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça %10 Na^+ içeren NaOH çözeltileri 24 saat önce hazırlanmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara toplam bağlayıcının ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5'i oranına denk gelecek şekilde diatomit ikamesi yapılmıştır. Harç için karıştırma kabına yerleştirilen bağlayıcı ve NaOH çözeltisi 30 saniye boyunca yavaşça karıştırılmış sonrasında 1350 g standart kum eklenmiştir. Karıştırma işlemine düşük devirde 60 saniye devam edildikten sonra mikser durdurularak karıştırma kabı etrafındaki harç ortada toplanarak toplam 90 saniye dinlendirilmiştir. Karıştırma işlemine yüksek devirde 60 saniye daha devam edilerek karıştırma işlemi sonlandırılmıştır. Harç karışımları 40x40x160 mm ölçülerindeki çelik kalıplara iç kısımları yağlanarak sarsma tablası vasıtasıyla titreşimle yerleştirilmiştir. Daha sonra 90 °C'de önceden ısıtılmış fırına geopolimer harç numuneler yerleştirilmiş ve 24 saat, 48 saat ve 72 saat boyunca ısıl küre tabi tutulmuştur. Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler fırından çıkarılmış, oda sıcaklığına soğumaya bırakılmış ve deney için hazır hale getirilmiştir. Kür sonrası elde edilen harç numuneleri eğilme ve basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Numunelerin mikro yapısını analiz etmek için, geopolimer hamur numuneleri hazırlanmış ve FESEM görüntüleri alınmıştır.



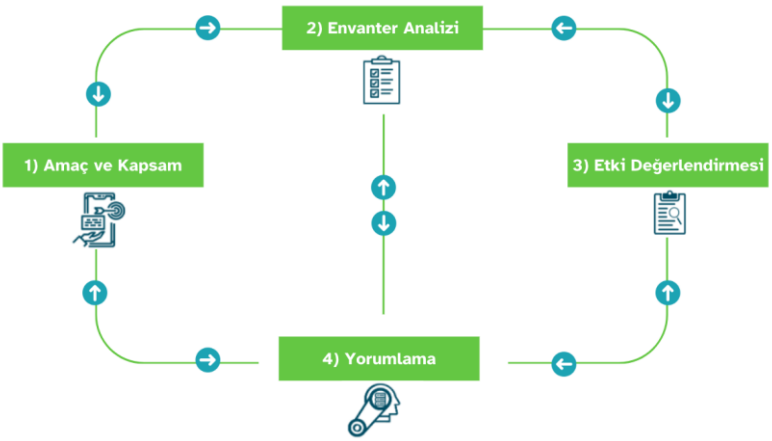
Şekil 2. Geopolimer harçların üretim prosesi

Deneysel çalışmalar kapsamında eğilme ve basınç testleri TS EN 196-1 standardına göre yapılmıştır. Her bir seri için 40x40x160 mm ebatlarında üretilen üç adet uçucu kül ve diatomit ikameli geopolimer numuneler üzerinde tek nokta eğilme testi yapılmıştır. İkiye bölünen ve toplam altı adet kalan harç numunelere basınç testi yapılmıştır. Testler tamamlandıktan sonra sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Alan Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM), geopolimer hamur örneklerinin mikro yapısı üzerinde diatomit ilavesinin etkisini değerlendirmek için incelenmiştir. Geopolimer hamur karışımı kum olmadan ve harç karışımlarının aynı karışım oranıyla hazırlanmıştır. Geopolimer hamur (D0, D1, D2, D3, D4, D5) 90°C'lik bir fırında 24 saatlik ısıl kürü tamamladıktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Soğuyan numuneler altın paladyum

kaplaması yapılarak Zeiss (GeminiSEM 500) cihazı ile 1000, 20000 büyütmelerde görüntülemeler yapılmıştır.

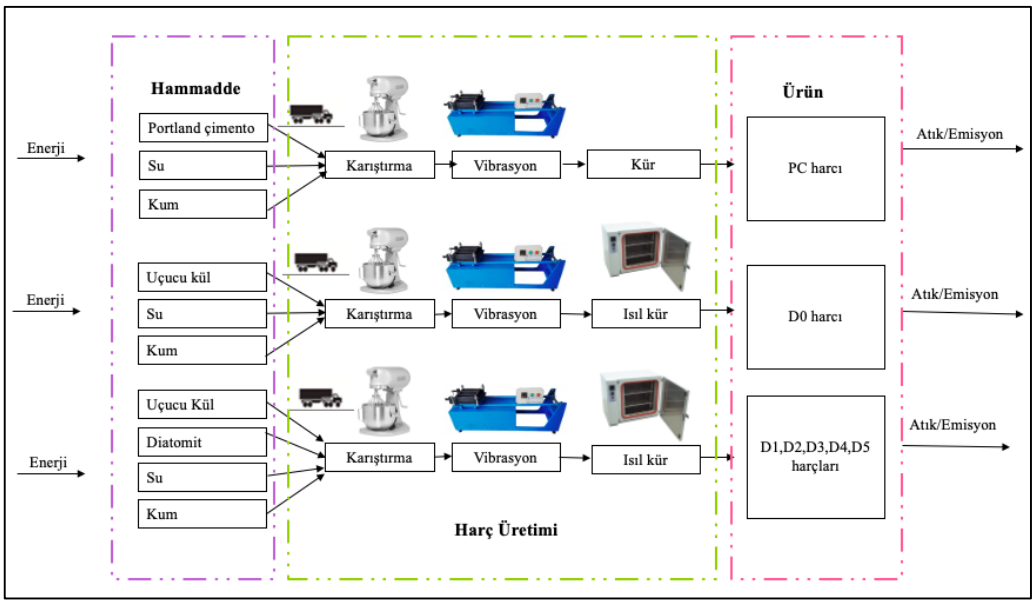
2.2.1.Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)

YDD, bir sürecin, ürünün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir metodolojidir. ISO 14040 ve 14044'e [31], [38] göre YDD **Şekil 3**'te gösterildiği gibi dört ana aşamadan oluşmaktadır: Bu aşamalar amaç ve kapsam tanımı, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve yorumlamadır.



Şekil 3. YDD aşamaları

Bu çalışma kapsamında YDD'nin temel amacı üretilen harç örneklerinin çevresel etkilerini ölçmek ve birbirileri ile karşılaştırmaktır. Bu bağlamda, çimento esaslı (PC) harç, geopolimer kontrol harcı (D0) ve %1, 2, 3, 4 ve 5 diatomit ikameli geopolimer harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) çevresel etkileri analiz edilmiştir. Birim fonksiyon 1 m^3 olarak seçilmiş ve hammaddenin çıkarılmasından harç üretimine kadar yaşam döngüsü aşamalarını kapsayan beşikten kapıya yaklaşımı izlenmiştir. Geopolimer harçların sistem sınırları **Şekil 4**'te sunulmuştur.



Şekil 4. Harçların sistem sınırları (beşikten kapıya yaklaşım)

Harç karışımlarının hammadde miktarları, enerji tüketimi ve su kullanımına ilişkin birincil envanter verileri laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalardan uyarlanmıştır. Bu çalışmada hammaddelerin (portland çimentosu, uçucu kül, kum, sodyum hidroksit, diatomit) 16-32 ton ağırlığındaki EURO 4 dizel yakıtlı bir kamyonla karayoluyla taşındığı varsayılmıştır. Taşıma mesafeleri Google Haritalar kullanılarak (portland çimentosu (50 km), uçucu kül (630 km), kum (980 km), sodyum hidroksit (379 km), diatomit (35 km)) olarak belirlenmiştir. Çimento esaslı PC harcı üretmek için dayanım sınıfı 42,5 ve özgül ağırlığı 3,14 g/cm^3 olan Portland çimentosu ve CEN standardı RILEM kumu kullanılmıştır. Hammadde üretimi, enerji ve taşıma verileriyle ilgili ikincil veriler SimaPro 9.5 yazılımında Ecoinvent 3.9.1 veri tabanından ve literatür taramasından elde edilmiştir. Mevcut yaşam döngüsü değerlendirmeleri, **Tablo 3**'te verilen üç vaka senaryosu ile detaylandırılmıştır.

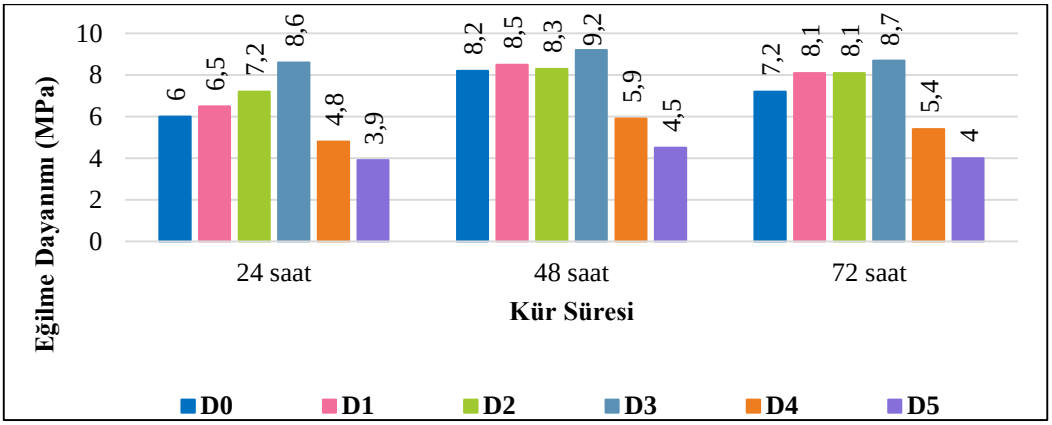
Tablo 3. Senaryoların tanımlanması

Senaryo	Tanım
Senaryo 1 (Temel Senaryo)	Gerçek taşıma mesafelerine dayalı senaryo (24 saat ısıl kür)
Senaryo 2	Gerçek taşıma mesafelerine (48 ve 72 saat ısıl kür) dayalı senaryoya göre kür sürelerinin çeşitlendirilmesi
Senaryo 3	Bölgesel taşıma mesafelerine dayalı senaryo (Tüm malzemeler 7 km'lik hayali bir mesafe üzerinden taşınmıştır ve 24 saat ısıl kür)

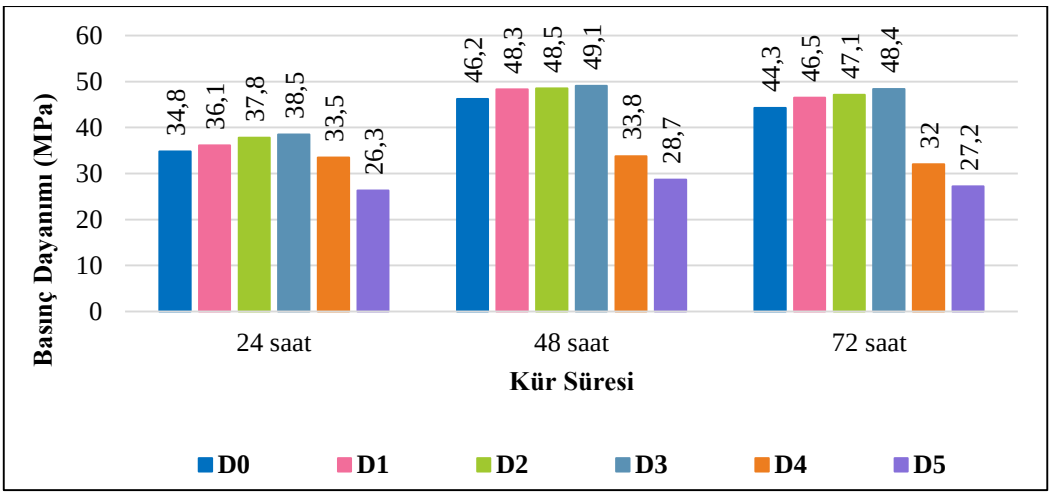
Harç üretiminin etki değerlendirmesi için SimaPro 9.5 yazılımında CML-IA temel yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem abiyotik tükenme (AD, kg Sb eq.), abiyotik tükenme-fosil yakıtlar (AD-FF, MJ), küresel ısınma potansiyeli (GWP, kg CO_2 eq.), ozon tabakasının incelmesi (ODP, kg CFC -11 eq.), insan toksisitesi (HT, kg 1,4-DB eq.), tatlı su sucul ekotoksisite (FAE, kg 1,4-DB eq.), deniz ekotoksisitesi (MAE, kg 1,4-DB eq.), karasal ekotoksisite (TE, kg 1,4-DB eq), fotokimyasal oksidasyon (PO_4, kg C_2H_4 eq.), asitleşme potansiyeli (AP, kg SO_2 eq.) ve ötrofikasyon potansiyeli (EP, kg PO_4 eq.) çevresel etki kategorilerini kapsamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 5 ve 6'da gösterilen 90°C'de 24, 48 ve 72 saat ısıl kür uygulanan harçlar için eğilme ve basınç dayanımı sonuçları gösterilmektedir. %3 diatomit içeren geopolimer harç örneği (D3), 90°C'de 48 saatlik ısıl kür süresi sonucunda en yüksek eğilme (9,2 MPa) ve basınç dayanımı (49,1 MPa) değerlerine ulaşmıştır. Kontrol harcı (D0), aynı koşullar altında 8,2 MPa eğilme dayanımına ve 46,2 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'dan, ısıl kür süresinin 24 saatten 48 saate çıkarılmasının, %3'e kadar diatomit ikame edilerek hem eğilme hem de basınç dayanımı açısından mekanik dayanıma olumlu katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Ancak, 90°C'de 72 saatlik ısıl kür süresi, diatomit katkı oranına bakılmaksızın 48 saatlik ısıl kür ile karşılaştırıldığında eğilme ve basınç dayanımını düşürmüştür. Ayrıca, geopolimer harçtaki (D4 ve D5) yüksek miktarda diatomit ikamesi, kontrol (D0) ve diğer harçlarla (D1, D2 ve D3) karşılaştırıldığında tüm kür süreleri boyunca dayanım kaybına neden olmuştur.

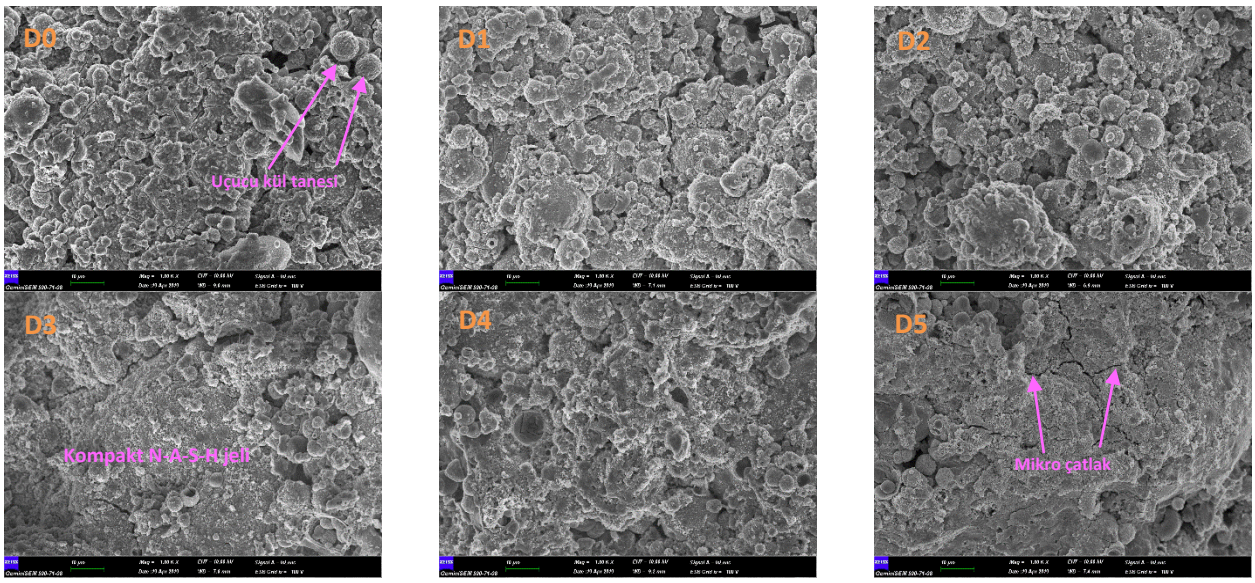


Şekil 5. Geopolimer harçların eğilme dayanımı sonuçları



Şekil 6. Geopolimer harçların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 6'da gösterilen sonuçlara göre, 90°C ısıl kür sıcaklığında optimum diatomit ikame oranının %3 olduğu belirlenmiştir. %5 oranında diatomit (D5) içeren geopolimer harç numunesi, 90°C'de tüm geopolimer karışımlarından daha düşük eğilme ve basınç dayanımı değeri sonucu vermiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da, 90°C'de 48 saatlik kür süresinin, kontrol harçlarına kıyasla 24 saatlik kür süreleri kadar eğilme ve basınç dayanımı gelişimine katkıda bulunmadığını göstermektedir. 24 saatlik ısıl kür süresinin 90°C'de yeterli olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu duruma paralel bir sonuç literatürde daha önce yapılan Atis ve arkadaşları tarafından bir çalışmada yayımlanmıştır [39], [40]. Yukarıda tartışıldığı gibi, yüksek miktarda diatomit içeren bazı karışımlar, örneğin D4 ve D5 karışımları daha düşük dayanım sonucu vermiştir. Bu durum yüksek miktardaki diatomit parçacıklarının aglomerasyonu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde, Messina ve arkadaşları [41] ve Durak ve arkadaşları [42], geopolimer harçta silika dumanı veya nano SiO_2 miktarının artırılmasının mikro yapıda bir aglomerasyona veya kısmi tıkanıklığa neden olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, bu etki D4 ve D5 karışımında gözlemlendiği gibi mukavemet gelişiminde bir azalmaya neden olmuştur. Kontrol ve diatomit ikameli numunelerin FESEM görüntüleri **Şekil 7**'de sunulmuştur. Mikro yapıya göre sodyum alümina-silikat jelinin oluşumu, tepkimeye girmemiş, kısmen tepkimeye girmiş ve tamamen tepkimeye girmiş uçucu kül parçacıkları, boşluklar, gözeneklilik ve mikro çatlak oluşumu açıkça gözlemlenmiştir. Bu durumun literatürde yayınlanan önceki çalışmalarla benzer olduğu görülmüştür [4], [42]–[44]. Ancak %3 diatomit içeren D3'ün FESEM görüntüsü mikro gözenekleri ve boşlukları geliştirmiştir. Diğer hamur numunelerinin D3 hamurundan daha yüksek gözenekliliğe sahip olduğu görülmektedir.

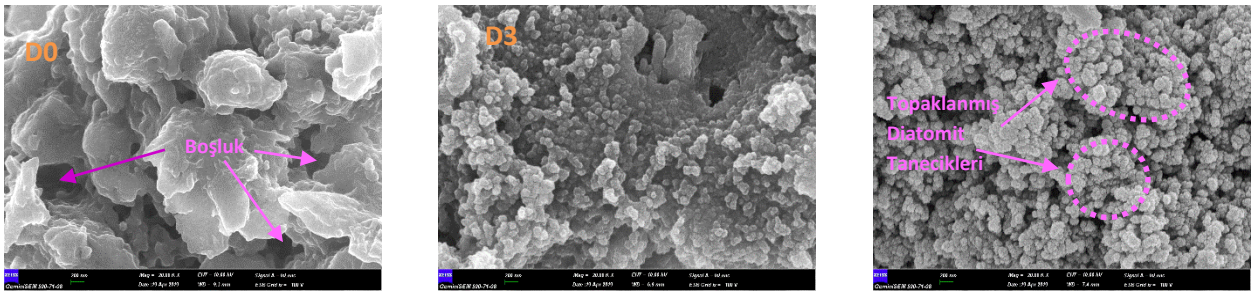


Şekil 7. Geopolimer hamurların (D0, D1, D2, D3, D4 ve D5) FESEM görüntüsü (1000 büyütme)

Kontrol hamur numunesi (D0) ve diatomit içeren geopolimer hamurlar (D3, D5) için 20000 kat büyütülen FESEM görüntüleri **Şekil 8**'de sunulmuştur. D0 geopolimerik matristeki boşlukların oluşumu FESEM görüntüsünde gösterilmiştir. D3 hamuru, kontrol hamuruna kıyasla düşük boşluklu daha yoğun bir mikro yapıda

D5

olduğu gösterilmektedir. D5 hamuru FESEM görüntüsü, aglomerasyon nedeniyle oluşan boşlukları ve tepkimeye girmeyen diatomit parçacıklarını açıkça göstermektedir.



Şekil 8. Geopolimer hamurların (D0, D3, D5) FESEM görüntüsü (20000 büyütme)

D3 geopolimer matrisi, diatomit parçacıklarının daha yüksek BET yüzey alanı nedeniyle geopolimerik reaksiyonu güçlendirdiğini göstermektedir. Geopolimer sentezinde, alümina silikat malzemelerin (uçucu kül, silika dumanı, metakaolin, diatomit, vb.) ana bileşenleri olan silika ve alümina oksitlerin alkali bir aktivatör çözeltisinde çözündüğü sonucuna varılmıştır. Daha önce yayınlanan çalışmalarda geopolimer bağlayıcıların reaksiyon mekanizmasının üç ana adımdan oluştuğunu bildirmektedir: (1) esas olarak OH^- nedeniyle camsı katı fazlardan reaktif Si ve Al'nin çözünmesi; (2) çözünmüş türlerin yeniden yönlendirilmesi ve jelleşmesi; (3) ürünlerin polimerizasyonu ve yoğunlaşması [45]–[47]. Çalışmada elde edilen iç yapı analizlerinin literatür ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma, üç farklı senaryo kullanılarak geleneksel portland çimentolu ve uçucu kül bazlı geopolimer harçların çevresel etkilerinin belirlenmesinde hammadde taşınmasını ve ısıl kür süresinin önemi irdelenmiştir. İlk senaryoda harç karışımları için kullanılan malzemelerin kaynaktan üretim yapılacağı laboratuvara kadar olan gerçek taşıma mesafeleri ile sınırlar belirlenmiştir. Ayrıca üretilen geopolimer harçlara 90°C'de 24 saat ısıl kür uygulanmıştır. İkinci senaryoda ilk senaryodaki karışımların kür süreleri değiştirilerek (90°C'de 48 ve 72 saat) karışımların çevresel etkileri üzerinde kür süresinin etkileri ölçülmüştür. Üçüncü senaryoda ise hammadde taşımacılığının karışımlar üzerindeki çevresel etkilerini ölçmek için yerel olarak (yerel tedarikçiden) 7m uzaklıktan hammaddeler tedarik edilerek ele alınmıştır. Karışımlara ilk senaryoda olduğu gibi 90°C'de 24 saat ısıl kür uygulanmıştır. Senaryolar yerel kaynak kullanımının ve kür süresinin YDD analizleri üzerindeki etkisini kapsamlı şekilde ele almıştır.

Bütün senaryolarda harç karışımlarının çevresel etki kategorisi değerleri, 1 m^3 harç için beşikten kapıya yaklaşımı dikkate alınarak CML-IA temel yöntemiyle nitelendirilmiştir [48]–[51]. Bu yöntem 11 çevresel etki kategorisini (AD, AD-FF, GWP, ODP, HT, FAE, MAE, TE, PO, AP ve EP) içermektedir.

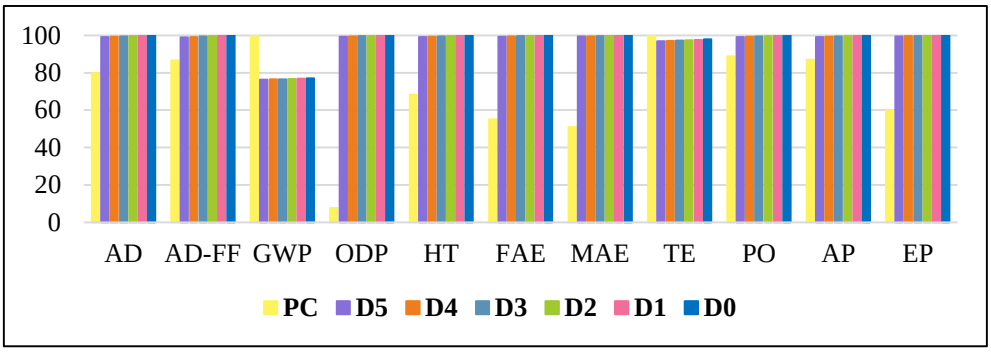
Gerçek taşıma mesafelerine bağlı ilk senaryo sonuçları **Tablo 4**'te sunulmuştur. Harç karışımlarında kullanılan her bir hammadde için fiili taşıma mesafeleri şu şekilde belirtilmiştir: PC (50 km), uçucu kül (630 km), kum (980 km), NaOH (780 km), diatomit (35 km). Bu metodoloji ile inşaat sektöründe taşımacılığın neden olduğu olumsuz çevresel etkilere odaklanılmıştır. Geleneksel harç için (Portland çimentolu) GWP değeri 8,28E+02 ve geopolimer kontrol harcı (D0) için 6,38E+02 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Öte yandan diatomit ikameli harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP'si sırasıyla 6,36E+02, 6,35E+02, 6,34E+02, 6,33E+02 ve 6,32E+02 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre, %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %23,6 oranında azalmıştır. Ayrıca, GWP açısından geopolimer kontrol harcı (D0) ve diğer diatomit ikameli harçlar da benzer çevresel performanslar sergilediği görülmüştür.

Tablo 4. Gerçek taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	2,31E-03	2,87E-03	2,88E-03	2,88E-03	2,89E-03	2,90E-03	2,90E-03
AD-FF	MJ	6,88E+03	7,86E+03	7,88E+03	7,90E+03	7,91E+03	7,93E+03	7,95E+03
GWP	kg CO_2 eq	8,28E+02	6,32E+02	6,33E+02	6,34E+02	6,35E+02	6,36E+02	6,38E+02
ODP	kg CFC-11 eq	5,64E-06	7,39E-05	7,40E-05	7,41E-05	7,42E-05	7,43E-05	7,44E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	2,62E+02	3,80E+02	3,81E+02	3,82E+02	3,82E+02	3,83E+02	3,84E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	1,33E+02	2,41E+02	2,41E+02	2,41E+02	2,42E+02	2,42E+02	2,42E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	3,20E+05	6,25E+05	6,26E+05	6,26E+05	6.27E+05	6,28E+05	6,29E+05
TE	kg 1,4-DB-eq	2,27E+00	2,20E+00	2,20E+00	2,21E+00	2,21E+00	2,21E+00	2,22E+00
PO	kg C_2H_4 eq	1,09E-01	1,21E-01	1,22E-01	1,22E-01	1,22E-01	1,22E-01	1.22E-01

AP	kg SO_2 eq	2,42E+00	2,76E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,77E+00	2,78E+00	2,78E+00
EP	kg PO_4 eq	6,27E-01	1,04E+00	1,04E+00	1,04E+00	1,04E+00	1,04E+00	1,05E+00

Geopolimer harç karışımları çimentolu geleneksel harç karışımı ile karşılaştırıldığında (**Şekil 9**), bir ürün veya sistemin çevresel performansının önemli bir göstergesi olan GWP açısından daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak TE etki kategorisi hariç çimentolu geleneksel harç, geopolimer harçlara göre daha iyi çevresel performans göstermiştir. Geopolimer harçların diğer çevresel etki kategorilerinde daha düşük performans gösterememesinin sebebi kullanılan aktivatör (NaOH) ve taşıma mesafelerinden kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.



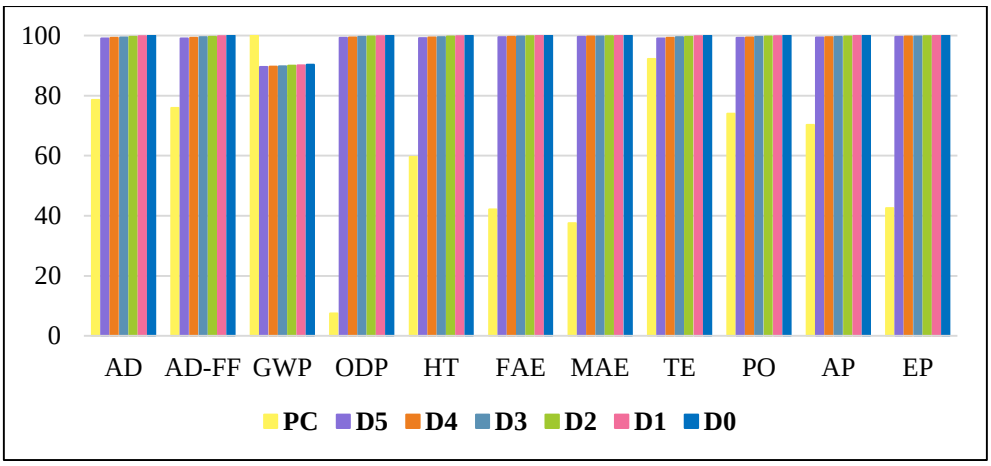
Şekil 9. Gerçek taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçlarların YDD sonuçlarının karşılaştırılması

Kür sürelerinin çeşitlendirilmesiyle (48 ve 72 saat) kurulan ikinci senaryo sonuçları **Tablo 5** ve **Tablo 6**'da gösterilmektedir. Geleneksel harç için (Portland çimentolu) GWP değeri 8,28E+02 ve 90 °C'de 48 saat kür edilen geopolimer kontrol harcı (D0) için 7,48E+02 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Öte yandan diatomit ikameli harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP'si sırasıyla 7,46E+02, 7,45E+02, 7,44E+02, 7,43E+02 ve 7,42E+02 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre, %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %10,5 oranında azalmıştır. Ayrıca, GWP açısından geopolimer kontrol harcı (D0) ve diğer diatomit ikameli harçlar da benzer çevresel performanslar sergilediği görülmüştür. Kür süresinin 48 saate çıkmasıyla harç karışımlarının GWP değerleri artmıştır. 24 ve 48 saat kür edilen D5 harçlarının GWP'leri kıyaslandığında kür süresinin artmasıyla % 17,25 oranında GWP'si artmıştır.

Tablo 5. 48 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	2,31E-03	2,91E-03	2,92E-03	2,93E-03	2,93E-03	2,94E-03	2,94E-03
AD-FF	MJ	6,88E+03	8,99E+03	9,01E+03	9,02E+03	9,04E+03	9,05E+03	9,07E+03
GWP	kg CO_2 eq	8,28E+02	7,41E+02	7,43E+02	7,44E+02	7,45E+02	7,46E+02	7,48E+02
ODP	kg CFC-11 eq	5,64E-06	7,44E-05	7,45E-05	7,47E-05	7,48E-05	7,49E-05	7,50E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	2,62E+02	4,37E+02	4,37E+02	4,38E+02	4,39E+02	4,40E+02	4,40E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	1,33E+02	3,14E+02	3,15E+02	3,15E+02	3,15E+02	3,16E+02	3,16E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	3,20E+05	8,47E+05	8,48E+05	8,49E+05	8,50E+05	8,50E+05	8,51E+05
TE	kg 1,4-DB-eq	2,27E+00	2,44E+00	2,44E+00	2,45E+00	2,45E+00	2,46E+00	2,46E+00
PO	kg C_2H_4 eq	1,09E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,46E-01	1,47E-01
AP	kg SO_2 eq	2,42E+00	3,42E+00	3,43E+00	3,43E+00	3,43E+00	3,44E+00	3,44E+00
EP	kg PO_4 eq	6,27E-01	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00	1,47E+00

Geopolimer harç karışımlarının GWP'si çimentolu geleneksel harç karışımına göre daha düşük çevresel etkilere sahiptir (**Şekil 10**). Ancak diğer bütün çevresel etki kategorilerinde çimentolu geleneksel harç, geopolimer harçlara göre daha iyi çevresel performans göstermiştir. Geopolimer harç karışımlarının diğer çevresel etki kategorilerinde daha düşük performans gösterememelerinin sebebi kullanılan aktivatör (NaOH) ve taşıma mesafeleri kaynaklıdır. Ayrıca kür süresi arttığı için bir diğer önemli sebep ısıl kür için harcanan enerji olmuştur.

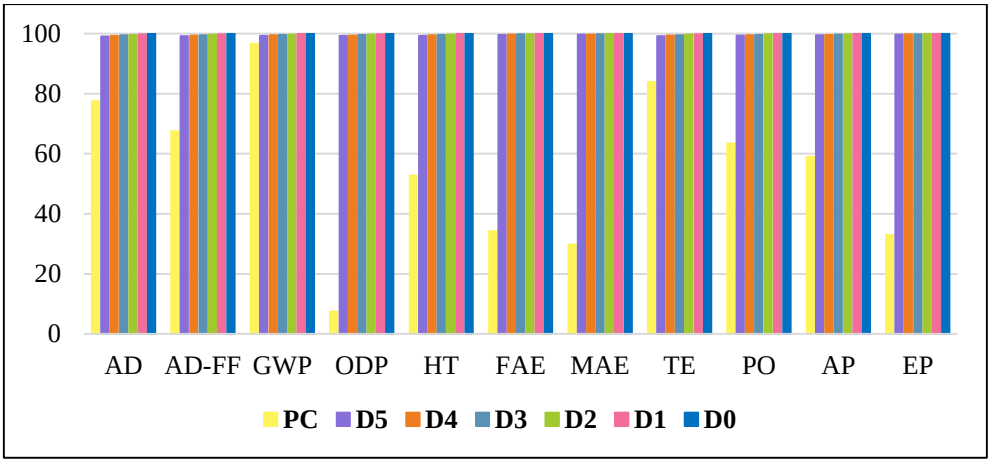


Şekil 10. 48 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçlarların YDD sonuçlarının karşılaştırılması

72 saat kür edilen geopolimer harçlar için (D0, D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP değerleri sırasıyla 8,57E+02, 8,56E+02, 8,55E+02, 8,54E+02, 8,53E+02 ve 8,51E+02 olarak hesaplanmıştır (**Tablo 6**). Geleneksel harç için (Portland çimentolu) GWP değeri ise 8,28E+02'dir. Bu bulgulara göre, %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %2.78 oranında artmıştır. 24 ve 72 saat kür edilen D5 harçlarının GWP'leri kıyaslandığında kür süresinin artmasıyla % 34.65 oranında GWP'si artmıştır. Ayrıca kür süresinin 72 saate çıkmasıyla geopolimer harçlar çevresel performans açısından geleneksel çimentolu harca göre bütün çevresel etki kategorilerinde daha kötü performans sergilemiştir (**Şekil 11**). Geopolimer harçlarda çevresel etkilerin artması NaOH kullanımı ve taşıma kaynaklı emisyonlar dışında ısıl kür süresinin artması en büyük handikap olmuştur.

Tablo 6. 72 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	2,31E-03	2,96E-03	2,96E-03	2,97E-03	2,97E-03	2,98E-03	2,98E-03
AD-FF	MJ	6,88E+03	1,01E+04	1,01E+04	1,01E+04	1,02E+04	1,02E+04	1,02E+04
GWP	kg CO_2 eq	8,28E+02	8,51E+02	8,53E+02	8,54E+02	8,55E+02	8,56E+02	8,57E+02
ODP	kg CFC-11 eq	5,64E-06	7,50E-05	7,51E-05	7,52E-05	7,53E-05	7,54E-05	7,56E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	2,62E+02	4,93E+02	4,94E+02	4,95E+02	4,95E+02	4,96E+02	4,97E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	1,33E+02	3,88E+02	3,89E+02	3,89E+02	3,89E+02	3,90E+02	3,90E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	3,20E+05	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06
TE	kg 1,4-DB-eq	2,27E+00	2,68E+00	2,68E+00	2,69E+00	2,69E+00	2,70E+00	2,70E+00
PO	kg C_2H_4 eq	1,09E-01	1,70E-01	1,70E-01	1,70E-01	1,71E-01	1,71E-01	1,71E-01
AP	kg SO_2 eq	2,42E+00	4,08E+00	4,09E+00	4,09E+00	4,09E+00	4,10E+00	4,10E+00
EP	kg PO_4 eq	6,27E-01	1,89E+00	1,90E+00	1,90E+00	1,90E+00	1,90E+00	1,90E+00



Şekil 11. 72 saat kür senaryosuna göre PC ve geopolimer harçlarların YDD sonuçlarının karşılaştırılması

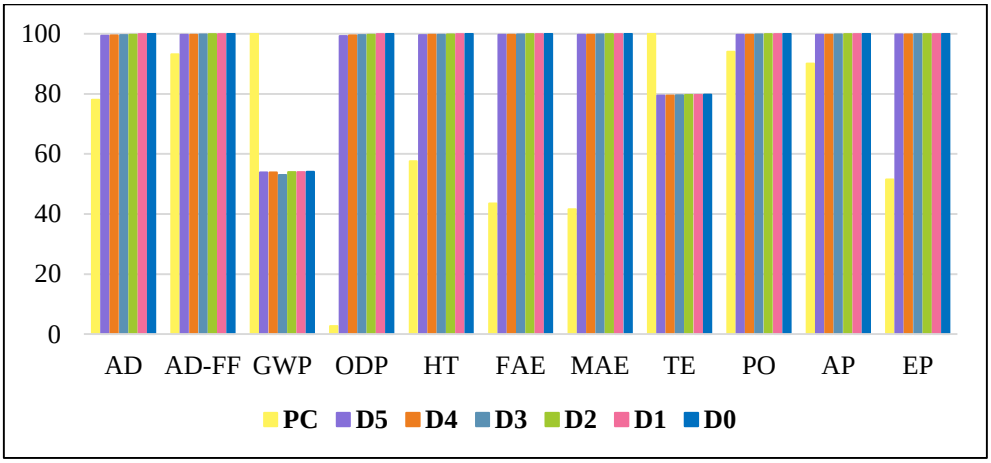
Üçüncü senaryoda, harç üretimi için gerekli tüm hammaddelerin 7 km'lik bir yerel mesafeden (yerel tedarikçi) taşındığı yaklaşımı benimsenmiştir. Bu basitleştirme, önceki senaryoya karşı bir zıtlık oluşturarak, yerel kaynakların kullanımının potansiyel çevresel avantajlarını vurgulamaktadır. Geleneksel harç için (Portland çimentolu) GWP değeri 5,46E+02 ve geopolimer kontrol harcı (D0) için 2,95E+02 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Öte yandan diatomit ikameli harçların (D1, D2, D3, D4 ve D5) GWP'si sırasıyla 2,95E+02, 2,94E+02, 2,94E+02, 2,94E+02 ve 2,94E+02 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır (**Tablo 7**). Bu bulgulara göre, %2 (D2), %3 (D3), %4 (D4) ve %5 (D5) oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harçların geleneksel harca (PC) göre GWP'leri %46.15 oranında azalmıştır. Ayrıca, GWP açısından geopolimer kontrol harcı (D0) ve D1 diğer diatomit ikameli harçlara benzer çevresel performanslar sergilediği görülmüştür.

D5 harcının gerçek taşıma mesafelerine bağlı ilk senaryo ile yerel taşıma mesafelerine sahip üçüncü senaryo kıyaslandığında GWP değeri %53,48 oranında azalmıştır. Yerel kaynakların kullanımı çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik açısından büyük öneme sahip olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, hammadde taşımacılığının, geopolimer harçların çevresel etkileri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Örneğin, Bajpai ve diğerleri (2020), üç farklı geopolimer beton karışımının çevresel etkilerini geleneksel çimento betonlarıyla karşılaştırmak için bir YDD gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda ham madde taşımacılığının hem geopolimer hem de geleneksel beton karışımlarının küresel ısınma potansiyeline (%8,90-%47,61) önemli ölçüde katkı sağladığını ortaya koymuşlardır [52].

Tablo 7. Yerel taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PC	D5	D4	D3	D2	D1	D0
AD	kg Sb eq	1,40E-03	1,78E-03	1,78E-03	1,79E-03	1,79E-03	1,79E-03	1,79E-03
AD-FF	MJ	2,92E+03	3,12E+03	3,13E+03	3,13E+03	3,13E+03	3,13E+03	3,13E+03
GWP	kg CO_2 eq	5,46E+02	2,94E+02	2,94E+02	2,94E+02	2,94E+02	2,95E+02	2,95E+02
ODP	kg CFC-11 eq	1,96E-06	6,94E-05	6,95E-05	6,96E-05	6,97E-05	6,98E-05	6,99E-05
HT	kg 1,4-DB-eq	1,25E+02	2,16E+02	2,16E+02	2,17E+02	2,17E+02	2,17E+02	2,17E+02
FAE	kg 1,4-DB-eq	7,41E+01	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02	1,70E+02
MAE	kg 1,4-DB-eq	2,02E+05	4,83E+05	4,84E+05	4,84E+05	4,84E+05	4,84E+05	4,85E+05
TE	kg 1,4-DB-eq	1,28E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00	1,02E+00
PO	kg C_2H_4 eq	6,35E-02	6,73E-02	6,74E-02	6,74E-02	6,75E-02	6,75E-02	6,75E-02
AP	kg SO_2 eq	1,48E+00	1,64E+00	1,64E+00	1,64E+00	1,65E+00	1,65E+00	1,65E+00
EP	kg PO_4 eq	3,91E-01	7,57E-01	7,58E-01	7,58E-01	7,59E-01	7,59E-01	7,59E-01

Geopolimer harç karışımları çimentolu geleneksel harç karışımı ile karşılaştırıldığında, GWP açısından daha düşük çevresel etkilere sahip olduğu görülmüştür. Ancak TE etki kategorisi hariç çimentolu geleneksel harç, geopolimer harçlara göre daha iyi çevresel performans göstermiştir (**Şekil 12**). Geopolimer harçların diğer çevresel etki kategorilerinde daha düşük performans gösterememelerinin sebebi kullanılan aktivatör NaOH'dan kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.

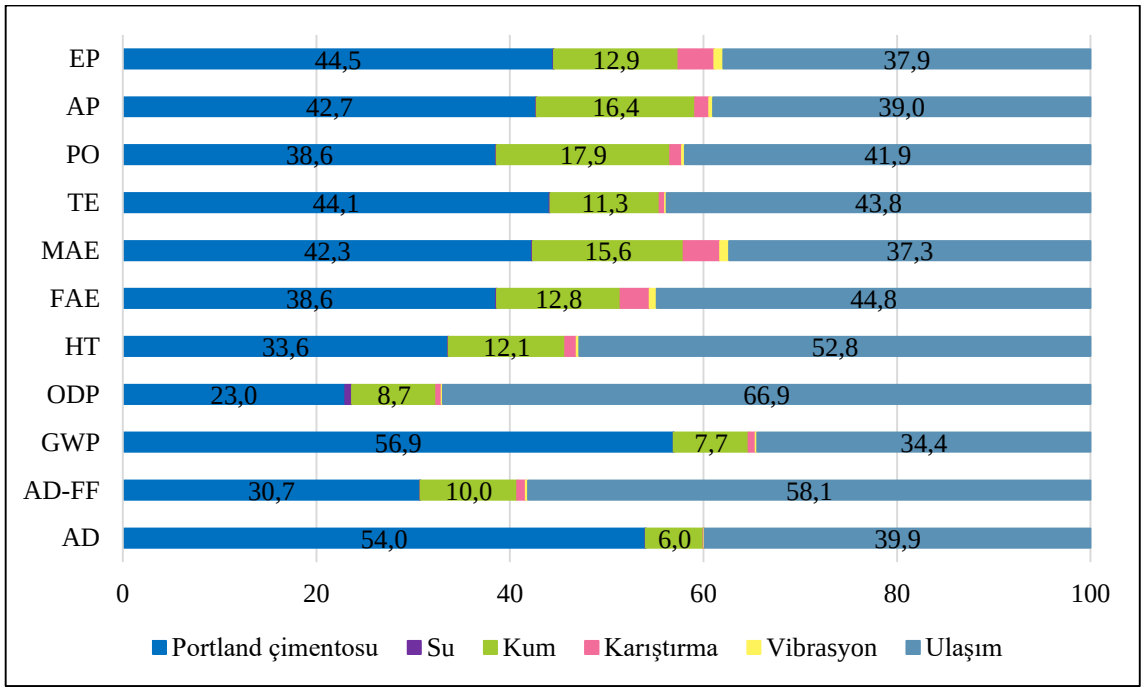


Şekil 12. Yerel taşıma senaryosuna göre PC ve geopolimer harçlarların YDD sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel çimentolu harç ve %5 oranında diatomit ikamesi içeren geopolimer harç için çevresel etkilerin üretim adımlarına ve alt bileşenlere göre dağılımı **Şekil 13** ve **Şekil 14**'te gösterilmektedir.

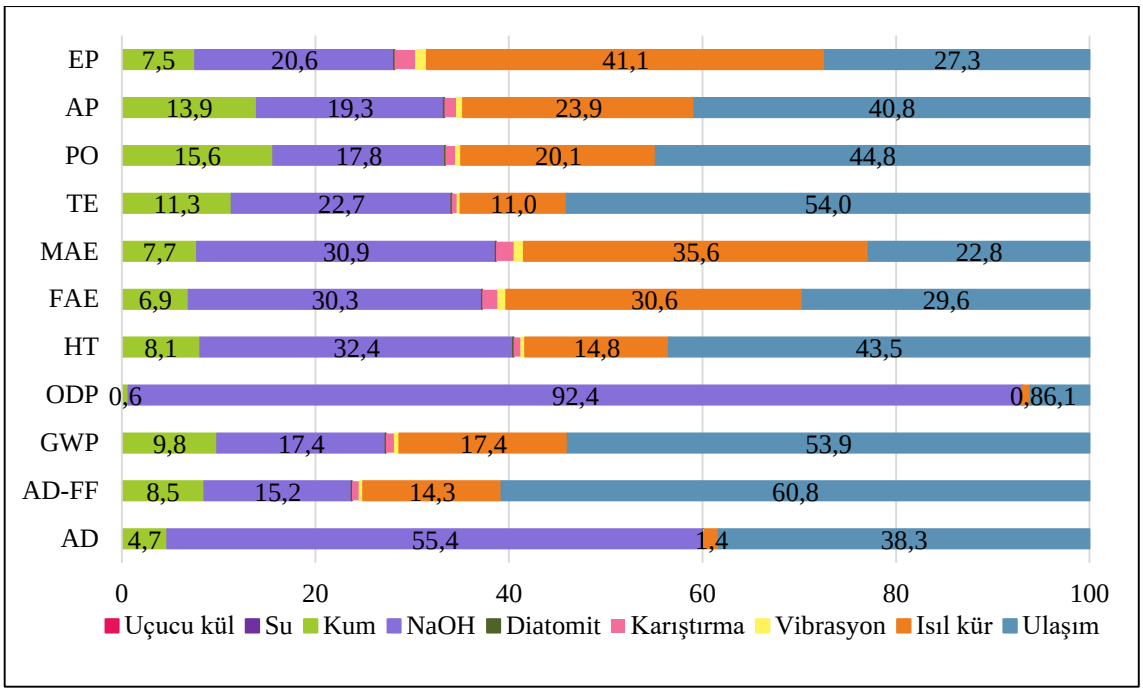
Geleneksel çimentolu harç karışımının YDD sonuçları, en yüksek çevresel etkilerin çimento, hammadde taşımacılığından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Çimento, %23-%56,9 arasında payla tüm çevresel etki

kategorilerine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Çimento üretimi karbondioksit emisyonu ve enerji yoğun bir süreç olduğundan, çimento üretimi yüksek küresel sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Böylece çimento, PC harcı üretiminde %56,9 ile GWP üzerindeki en yüksek etkiye sahiptir (**Şekil 13**). Çimento üretimiyle ilgili diğer önemli emisyonlar partikül madde (PM), nitrojen oksitler (NOx) ve kükürt dioksittir (SO_2). Ayrıca karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (VOC) ve toksik emisyonlar (örneğin ağır metaller, dioksinler ve furanlar) da endişe vericidir. Çimento üretim sürecinde kullanılan yakıt ve hammaddelerin bileşimi, üretim teknolojisinin seçimi ve diğer faktörler, hava kirleticilerin türünü belirlemekte ve miktarını [53]–[55] etkilemektedir. Geleneksel harç karışımında bir diğer önemli çevresel etkiyi ham madde taşımacılığı oluşturmuştur. Ham madde taşımacılığı %34,4-%66,9 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine büyük oranda katkıda bulunmaktadır. Karışımda kullanılan kum çimento ve ham madde taşımacılığına ek olarak daha küçük bir payla %6-%17,9 oranında çevresel etki kategorilerine katkıda bulunmuştur. Harçların karıştırılması ve vibrasyonu gibi proseslerin çevresel yükleri oldukça düşüktür.



Şekil 13. Gerçek taşıma senaryosu ile PC harç karışımının çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı

Çevresel etkilerin D5 harç karışımının alt bileşenlerine göre dağılımı **Şekil 14**'te gösterilmektedir. %5 oranında diatomit ikameli harç karışımının YDD sonuçları, en yüksek çevresel etkilerin NaOH, ham madde taşımacılığı ve ısıl kürden kaynaklandığını ortaya koymuştur. NaOH, %15,2-%55,4 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Diatomit ikameli geopolimer harç karışımında bir diğer önemli çevresel etkiyi hammadde taşımacılığı oluşturmuştur. Hammadde taşımacılığı %6,1-%60,8 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine büyük oranda katkıda bulunmaktadır. Karışımın ısıl kür ile priz alması sağlandığı için önemli bir çevresel yükte ısıl kürleme prosesinden gelmiştir (%0.8-%41.1). Bunlara ek olarak harç karışımlarında kullanılan kum %0,6-%15,6 payla çevresel etki kategorilerine katkı sağlamıştır. Harçların karıştırılması ve vibrasyonu gibi proseslerin çevresel yükleri oldukça düşüktür.



Şekil 14. Gerçek taşıma senaryosu ile D5 geopolimer harç karışımının çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma sonuçlarına göre %3 oranına kadar diatomit ikamesinin geopolimer harç numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarını kontrol numunesine kıyasla artırdığı belirlenmiştir. Fakat %3 diatomit ikame oranından daha yüksek oranda diatomitin ikame edilmesi durumunda dayanımlarda düşüş olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, numunelerin 90°C'de 72 saat boyunca kür edilmesi diatomitin etkinliğini azaltmış ve basınç mukavemetlerini düşürmüştür.

FESEM görüntülerine göre, %3'e kadar diatomit ikamesi, geopolimer hamur numunelerinin mikro yapısını iyileştirerek diatomitsiz hazırlanan numunelere kıyasla daha yoğun içyapıya sahip numuneler elde edilmesini sağlamıştır.

Gerçek taşıma senaryosuna göre %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %23,6 oranında azalmıştır.

Senaryo 2'ye göre 48 saat kür edilen %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harcın (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %10,5 oranında azalmıştır. 72 saat kür edilen %5 oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harçta ise (D5) geleneksel harca (PC) göre GWP'si %2,78 oranında artmıştır. 24 ve 72 saat kür edilen D5 harçlarının GWP'leri kıyaslandığında kür süresinin artmasıyla % 34,65 oranında GWP'si artmıştır.

Senaryo 3'e göre %2 (D2), %3 (D3), %4 (D4) ve %5 (D5) oranında diatomit ikame edilmesiyle üretilen geopolimer harçların geleneksel harca (PC) göre GWP'leri %46,15 oranında azalmıştır.

D5 harcının gerçek taşıma mesafelerine bağlı Senaryo 1 ile yerel taşıma mesafelerine sahip Senaryo 3 kıyaslandığında GWP değeri %53,48 oranında azalmıştır. Bu sonuç yerel kaynakların kullanımının çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik açısından büyük öneme sahip olduğunu göstermiştir.

Gerçek taşıma senaryosu Senaryo 1'e göre PC harç karışımının çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı incelendiğinde en yüksek çevresel etkilerin çimento ve hammadde taşımacılığından kaynaklandığını ortaya koymuştur. D5 geopolimer harç karışımında ise en yüksek çevresel etkilerin NaOH, hammadde taşımacılığı ve ısıl kürden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından **FLY-2019-9195** kodlu proje ile desteklenmiştir.

Kaynakça

[1] H. Li *et al.*, "Sustainable resource opportunity for cane molasses: Use of cane molasses as a grinding aid in the production of Portland cement," *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 56–64, 2015.

[2] D. N. Huntzinger and T. D. Eatmon, "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 7, pp. 668–675, 2009.

[3] C. L. Sabine *et al.*, "The Oceanic Sink for Anthropogenic CO2," *Science (80-.).*, vol. 305, no. July, pp. 5–12, 2004.

[4] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, "Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 675–683, 2015.

[5] S. Saha and C. Rajasekaran, "Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 615–620, Aug. 2017.

[6] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, and C. D. Atiş, "The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 264, 2020.

[7] A. Awad *et al.*, "Experimental investigation of mechanical properties of geopolymer mortars produced with metakaolin, red mud and glass powder Ashraf," *Comput. Concr.*, vol. 27, no. 6, p. 597, Jun. 2021.

[8] Y. G. Adewuyi, "Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation," *ACS Omega*, vol. 6, no. 24, pp. 15532–15542, 2021.

[9] S. Adjei, S. Elkatatny, and K. Ayranci, "Effect of Elevated Temperature on the Microstructure of Metakaolin-Based Geopolymer," *ACS Omega*, vol. 7, no. 12, pp. 10268–10276, 2022.

[10] A. Sathonsaowaphak, P. Chindaprasirt, and K. Pimraksa, "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar," *J. Hazard. Mater.*, vol. 168, no. 1, pp. 44–50, 2009.

[11] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, and P. Chindaprasirt, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature," *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2118–2124, 2011.

[12] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1315–1322, Jul. 2008.

[13] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, Aug. 1999.

[14] J. C. Swanepoel and C. A. Strydom, "Utilisation of fly ash in a geopolymeric material," *Appl. Geochemistry*, vol. 17, no. 8, pp. 1143–1148, Aug. 2002.

[15] V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, and C. Thaumaturgo, "Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers," *Int. J. Inorg. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 309–317, 2000.

[16] A. R. Brough, M. Holloway, J. Sykes, and A. Atkinson, "Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars: Part II. The retarding effect of additions of sodium chloride or malic acid," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 9, pp. 1375–1379, Sep. 2000.

[17] A. Fahmi, A. B. amini, Y. Marabi, S. R. Zavaragh, and A. Majnouni-Toutakhane, "Effect of Curing Temperature on the Mechanical Strength of Alkali Activated Laterite Geopolymeric Samples," *J. Eng. Res.*, pp. 1–25, 2021.

[18] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1224–1232, Jun. 2005.

[19] D. Panias, I. P. Giannopoulou, and T. Perraki, "Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 301, no. 1–3, pp. 246–254, 2007.

[20] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 3, pp. 224–229, 2007.

[21] O. A. A. Ali, "Mechanical Properties of Fly Ash Based Geopolymer Mortar Activated By Alkali and Cement Simultaneously," Erciyes Universty,Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2017.

[22] F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso, and T. Vázquez, "Alkali-activated fly ash/slag cements. Strength behaviour and hydration products," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1625–1632, 2000.

[23] Z. Sun and A. Vollpracht, "Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag," *Cem. Concr. Res.*, vol. 103, no. September 2017, pp. 110–122, 2018.

[24] B. Galzerano *et al.*, "Design of sustainable porous materials based on 3D-structured silica exoskeletons , Diatomite : Chemico-physical and functional properties," *Mater. Des.*, vol. 145, pp. 196–204, 2018.

[25] C. Bagci, G. P. Kutyla, and W. M. Kriven, "Fully reacted high strength geopolymer made with diatomite as a fumed silica alternative," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 17, pp. 14784–14790, 2017.

[26] T. Sinsiri, T. Phoo-ngernkham, N. Ratchasima, and V. Sata, "The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar," *Comput. Concr.*, vol. 9, no. 6, pp. 427–439, 2012.

[27] M. Sciences, T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, and T. Sinsiri, "High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 20, no. August, pp. 310–318, 2013.

[28] P. Posi, S. Lertnimoolchai, V. Sata, and T. Phoo-ngernkham, "Investigation of Properties of Lightweight Concrete with Calcined Diatomite Aggregate," vol. 18, pp. 1429–1435, 2014.

[29] Y. C. Ersan, S. Gulcimen, T. N. Imis, O. Saygin, and N. Uzal, "Life cycle assessment of lightweight concrete containing recycled plastics and fly ash," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 7, pp. 2722–2735, 2022.

[30] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, and E. Byars, "Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 781–788, 2007.

[31] ISO-14040, *Environmental management–life cycle assessment-Principles and framework*. International Organization for Standardization, 2006.

[32] P. S. Matheu, K. Ellis, and B. Varela, "Comparing the environmental impacts of alkali activated mortar and traditional portland cement mortar using life cycle assessment," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 96, no. 1, 2015.

[33] L. Nguyen, A. J. Moseson, Y. Farnam, and S. Spatari, "Effects of composition and transportation logistics on environmental, energy and cost metrics for the production of alternative cementitious binders.," *J. Clean. Prod.*, vol. 185, pp. 628–645, 2018.

[34] R. Robayo-Salazar, J. Mejía-Arcila, R. Mejía de Gutiérrez, and E. Martínez, "Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 103–111, Jul. 2018.

[35] A. Passuello *et al.*, "Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators," *J. Clean. Prod.*, vol. 166, pp. 680–689, 2017.

[36] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, and G. D. Corder, "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 9–10, pp. 1080–1090, 2011.

[37] TS EN 196-1, "Method of testing cement, Part 1.Determination of strength." Turkish Standards Institution, Ankara, 2009.

[38] TSE, "TS EN ISO 14044 standardı, Çevre yönetimi- Hayat boyu değerlendirme- Gerekler ve kılavuz," 2007.

[39] C. D. Atiş, E. B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. Ilkentapar, and E. Luga, "Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 673–678, Oct. 2015.

[40] G. Görhan and G. Kürklü, "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures," *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 371–377, 2014.

[41] Messina, Ferone, F. Colangelo, Roviello, and Cioffi, "Alkali activated waste fly ash as sustainable composite: Influence of curing and pozzolanic admixtures on the early-age physico-mechanical properties and residual strength after exposure at elevated temperature," *Compos. Part B Eng.*, vol. 132, pp. 161–169, Jan. 2018.

[42] U. Durak, O. Karahan, B. Uzal, S. İlkentapar, and C. D. Atiş, "Influence of nano SiO2 and nano CaCO3 particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolymer," *Struct. Concr.*, vol. 22, no. S1, pp. E352–E367, Jan. 2021.

[43] J. E. Oh, P. J. M. Monteiro, S. S. Jun, S. Choi, and S. M. Clark, "The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 189–196, 2010.

[44] E. D. Rodríguez, S. A. Bernal, J. L. Provis, J. Paya, J. M. Monzo, and M. V. Borrachero, "Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–11, 2013.

[45] J. L. Provis and S. A. Bernal, "Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 44, no. 1, pp. 299–327, 2014.

[46] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007.

[47] D. Khale and R. Chaudhary, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 3, pp. 729–746, 2007.

[48] A. Kul *et al.*, "Characterization and life cycle assessment of geopolymer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste," *J. Build. Eng.*, vol. 78, p. 107546, Nov. 2023.

[49] Q. Munir, M. Abdulkareem, M. Horttanainen, and T. Kärki, "A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of geopolymer concrete produced from industrial side streams in comparison with traditional concrete," *Sci. Total Environ.*, vol. 865, p. 161230, Mar. 2023.

[50] B. Gopalakrishna and P. Dinakar, "Life cycle assessment (LCA) and the influence of alkaline activator content on mechanical and microstructural properties of geopolymer mortar," *J. Eng. Res.*, Jan. 2024.

[51] B. Kanagaraj, N. Anand, U. Johnson Alengaram, and R. Samuvel Raj, "Engineering properties, sustainability performance and life cycle assessment of high strength self-compacting geopolymer concrete composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 388, p. 131613, Jul. 2023.

[52] R. Bajpai, K. Choudhary, A. Srivastava, K. S. Sangwan, and M. Singh, "Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 254, p. 120147, 2020.

[53] A. Petek Gursel, E. Masanet, A. Horvath, and A. Stadel, "Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 51, pp. 38–48, Aug. 2014.

[54] C. Li, J. Li, Q. Ren, Q. Zheng, and Z. Jiang, "Durability of concrete coupled with life cycle assessment: Review and perspective," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 139, p. 105041, May 2023.

[55] F. Schorcht, N. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, and L. D. Sancho, *BAT reference cement productie*. 2013.

Erciyes Üniversitesi
Enginoscope Dergisi
Cilt 1, Sayı 1, 2025

Erciyes University
Enginoscope Journal
Volume 1, Issue 1, 2025

Design of A Novel Device Measuring Testicular Consistency, Size and Temperature and Classification Algorithm Analysis of Data Compared to Urologist Examinations

Merve Örer[1], Mehmet Çağrı Soylu[1]*, Emre Can Akınsal[2], Oğuz Ekmekçioğlu[2]

[1]Biological & Medical Diagnostic (BioMeD) Sensors Laboratory, Department of Biomedical Engineering, Erciyes University, Kayseri, 38030, Turkey
[2]Faculty of Medicine, Department of Urology, Erciyes University, Kayseri, 38030, Turkey
*Corresponding Author: Mehmet Çağrı Soylu

(Alınış / Received: 12.12.2024, Kabul / Accepted: 13.01.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 31.01.2025)

Keywords
Infertility,
Heat stress,
Testicles Consistency
Machine Learning

Background and Objective: Infertility is a health problem that can be seen all over the world, originating from both men and women. In male infertility, many tests and examinations are performed in order to find the treatment method to solve the problem. The first of these is the physical examination, and the clinician cannot obtain numerical data and make comparisons as a result of this examination.
Methods: In this study, it is aimed to design a system that will reveal the physical differences of the testicles, which play an important role in the production of sperm and some special hormones, in about 1 minute. Thanks to this device, temperature, volume and consistency parameters of testicles from 50 different patients of different ages were measured in real time with different sensors on the device. The results were analysed with both statistical analysis and machine learning method.
Results: According to the results of this study, it has been revealed that the system designed can help clinicians in testicular examination. In terms of consistency and heat stress, the classification algorithm with the highest accuracy rate according to the 3 different cross validation rates applied is trees and it showed 92.0% accuracy according to validation 5 and 15, but 89.0% according to cross validation 10. In terms of testicle size, Trees and Ensemble with the validation rate of 15 showed the highest accuracy with 89%.
Conclusions: Although the applied methods showed high accuracy, the specificity rate is not optimal due to data limitations. This is because there is not enough data. It is clear that with more data, both the accuracy rates and the level of specificity will be higher.

Üroloji Uzmanı Muayeneleriyle Karşılaştırmalı Olarak Testis Sertliği, Boyutu ve Sıcaklığını Ölçen Yenilikçi Bir Cihaz Tasarımı ve Veri Sınıflandırma Algoritması Analizi

Anahtar Kelimeler
Kısırlık,
Isı Stresi,
Testis Kıvamı,
Makine Öğrenimi

Arka Plan ve Amaç: Kısırlık, dünya genelinde erkeklerde ve kadınlarda yaygın olarak görülebilen bir sağlık sorunudur. Erkek infertilitesinde, problemi çözmek için tedavi yöntemini belirlemek amacıyla birçok test ve inceleme yapılmaktadır. Bunların ilki fiziksel muayenedir, ancak bu muayene ile klinisyen çoğunlukla sayısal veriler elde edemez ve gerekli karşılaştırmaları yapamaz.
Yöntemler: Bu çalışmada, sperm üretimi ve bazı özel hormonların üretiminde önemli bir rol oynayan testislerin fiziksel farklılıklarını yaklaşık 1 dakika içinde ortaya koyacak bir sistem tasarlanması hedeflenmiştir. Bu cihaz sayesinde, farklı yaşlardan 50 farklı hastanın testislerinin sıcaklık, hacim ve tutarlılık parametreleri, cihazdaki farklı sensörlerle gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, hem istatistiksel analiz hem de makine öğrenimi yöntemi ile incelenmiştir.
Bulgular: Bu çalışmanın sonuçlarına göre, tasarlanan sistemin, kliniklerde testis muayenesine yardımcı olabileceği ortaya konulmuştur. Tutarlılık ve ısı stresi

açısından, uygulanan 3 farklı çapraz doğrulama oranına göre en yüksek doğruluk oranına sahip sınıflandırma algoritması "decision trees" (karar ağaçları) olup, doğrulama 5 ve 15'e göre %92,0 doğruluk, çapraz doğrulama 10'a göre ise %89,0 doğruluk göstermiştir. Testis boyutu açısından ise, karar ağaçları ve ansambl yöntemleri, doğrulama oranı 15'e göre en yüksek doğruluk oranı ile %89,0 doğruluk göstermiştir.
Sonuç: Uygulanan yöntemler yüksek doğruluk oranları gösterse de veri sınırlamaları nedeniyle özgüllük oranı optimal değildir. Bunun nedeni, örnek sayısının yetersiz olmasıdır. Daha fazla veri ile hem doğruluk oranlarının hem de özgüllük seviyelerinin daha yüksek olacağı düşünülmektedir.

1. Introduction

Most people who reach adulthood want to have children. However, some are unable to achieve pregnancy and seek help from clinics to understand and solve this problem. If pregnancy cannot be provided, although regular sexual intercourse in 12 months, this situation is called infertility and approximately 14% of couples from all around the world are called infertile because of this problem[1].

The cause of infertility can be from male-related, female-related or both. According to previous studies, every 1 couple out of 3, cannot achieve pregnancy because of solely male-related problems[2] and when both male-related problems and female-related factors are considered together, it can be said that the male factor in infertility is 50 percent[3]. The amount and quality of semen related to male infertility and it is affected by many factor, such as varicocele, cancer, cryptorchidism, idiopathic, genetic disorders, infections, toxic substances and drugs, etc[4, 5].

The testis, an organ found only in men, has two functions. The first of these tasks is the production of testosterone, the most well-known androgen hormone, and the other is the production and storage of sperm[6].
The testis is in the scrotum which is a bag of skin and is located relatively outside the body. The reason for this placement of the testis is to decrease the degree of the organ by 2-4 according to body temperature and to protect the producing of sperm from heat stress[7]. The issue of heat stress is really important to the testis because studies have shown that 1°C increase reduces sperm production by 14% [7].

In order to keep the temperature to which the testis is exposed at a certain level, the muscle and vascular structure in the scrotum has been customized. When Creamaster, a striated muscle that surrounds the testis and spermatic cord, senses an increase in temperature, it contracts involuntarily to protect the testicle from heat, and this contraction is called the Creamasteric Reflex[8]. While the Creamaster muscle provides thermoregulation by bringing the scrotum closer to and away from the abdomen, the Dartos muscle, which is also in the scrotum, keeps the temperature at the optimum level by increasing and decreasing the scrotal surface thanks to stimulation of temperature receptors on the scrotum's skin surface[9]. Because, spermatogenesis is a complex process affected easily by heat stress which is harmful for production of androgen, increase apoptosis of germ cells and can be reason of structural degradation of some enzymes which are related with producing testosterone and so on[10, 11].

In many studies, it has been stated that differences in testicular temperature and volume are associated with varicocele, which is a type of ventricular disorder and is associated with heat stress, and testicular cancer[12]. Because, thanks to varicocele, the hydrostatic pressure in the scrotum increases and this situation affects heat of testis At the same time, according to some studies, the tissues cannot reach enough oxygen due to varicocele, this affects the thickness and shape of the tissues[13], and the testicular volume decreases[14].

Another thing that changes the consistency of the testis is a testicular tumour. Huang et al. In a study where they used Tissue Elastography (TE) to diagnose testicular cancer, they noted that malignant cancer tissues were harder than surrounding tissues, and benign tumours were softer[15]. On the other hand, some studies have shown that benign tumours show normal or soft tissue characteristics[16].

Testicular cancer is the most common type of neoplasm in young men(15-44 years old)[16, 17]. It is a painless hard mass that is usually palpated during physical examination[18]. If a man has cryptorchidism or Klinefelter's syndrome at an early age, has testicular tumours in close relatives, has testicles smaller than 12 ml, has atrophic testicles and cannot have children, it indicates that the person is at risk for this disease[18]. Atrophy literally means shrinkage and is related to volume, and according to previous studies, testicular atrophy is one of the causes of poor quality semen, varicocele, tumor and cryptorchidism[19].

There are various types of testicular cancer, and both the disease itself and the treatment methods cause infertility [20]. Many studies have shown that germ cell testicular cancer directly causes infertility[21–23]. On the other hand, if the tumour is not germ cell, factors produced by the tumour itself or as a result of the body's response to defence or deterioration may also have an effect[22].

If the tumour is not germ cell, even in areas close to the area where the tumour is located, a decrease in sperm count and quality is observed[22]. At the same time, radiation, chemotherapy, surgical methods to remove the testicles and lymph nodes in the region also cause infertility[21]. For these reasons, people need additional measures such as sperm freezing for infertility. This is one of the requirements of early diagnosis of the disease.
In healthy males, the testis is egg-shaped, with a length, diameter, and width of 3-5 cm, 3 cm, and 2-4 cm, respectively[24]. While testicular volume is correlated with sperm count, motile sperm count, and sperm density, it is also inversely proportional to age[25][26][5]. Because sperm are produced in seminiferous tubules which make up nearly three quarters of the testis[27]. It is believed that as the number of seminiferous tubules increases, so does spermatogenesis[28]. Therefore many infertile male has smaller volume testes or bigger volume testes than healthy people and measurement of testis volume is a really important part of physical examination[1, 5].

Infertility examination is a complex study and includes many steps such as patient history taking, scrotal imaging, semen analysis and so on. According to Holstein et al.[29], the diagnostic steps of male infertility include detailed examination of testicular size and consistency, semen analysis and hormone levels.

Physical examination of the scrotal contents is an important step for both clinicians and patients. Because it is the first step to prediction reasons of the infertility. However, insufficient palpation accuracy has been reported for the examination of testicular consistency and volume measurement. During physical examination, it is very important to measure the size and consistency of the testis, especially for sub fertile individuals[30].

For testicular volume measurement ultrasonography, orchidometer (prader or punched-out) and callipers are used, but according to many studies comparing these different methods, ultrasonography is the more accurate way to measure[28]. Although the use of orchidometer is the most widely used method for volume measurements, the error rate is quite high[31]. Because if the orchidometer is used to measure volume, this means that some of the degrees not found in the orchidometer can be ignored and the clinician can obtain an estimated value after the measurement. On the other hand, more complex devices such as USG can be used to measure testicular volume, but they are expensive, take more time, and require people who can operate the system.

During the physical examination, there is no other method other than examining the testicular consistency with palpation. Palpation is a method that requires knowledge and experience. Quantitative data cannot be obtained after this method, only an estimated measurement is made, so it is not a suitable method for comparison.
For scrotal examinations other than palpation, scrotal sonography and colour Doppler techniques are used for testicular-related varicocele, tumours, microlithiasis and some abnormalities, and when scrotal examinations of infertile individuals are examined, it has been observed that 38-59 individuals out of 100 have abnormal scrotal features[3].

Seminoma is usually a non-painful stiffness, and the initial clinical evaluation is very important. Testicular sonography can distinguish this increased tissue stiffness from normal testicular tissue as it creates different patterns[32].

Although gray scale ultrasonography is quite useful in most testicular tumour cases, it is a fact that in some cases benign tissues cannot always be differentiated accurately because they appear as tumours on gray scale and colour and/or strong Doppler ultrasonography[16].

As a result of the pressure applied to the tissue, a tension occurs within the tissue and this tension occurs at different levels for soft and hard tissue[33]. Elastsonography, on the other hand, is a new method of ultrasonography and measures hardness by measuring the deterioration in tissue structure caused by a mechanical stress applied to the tissue[33].

Since malignant tissues change the properties of the tissue, US elastsonography has been used for diseases such as prostate, pancreatic, and breast cancer, but there are limited studies for testicular cancer [33]. On the other hand, according to a study, another scrotal examination method was considered as Elastosonography, but it was not considered sufficient to be applied alone without physical examination, without taking the patient's history and without tumour marker studies [33].

Today, many methods are used when measuring testicular temperature. these methods may be based on continuous measurement or on a single measurement. Thermocouples for the skin surface, thermistor needles for intrascrotal temperatures, infrared thermometry, thermography and liquid crystal thermometry are used for temperature measurement[7].

Statistical analysis methods are very important in terms of interpreting and explaining the data obtained by people as a result of their research. However, Machine learning methods can also reveal patterns and relationships among the data obtained that people may not notice. The most used algorithms in the literature for machine learning are[34]: k-Nearest Neighbourhood (KNN), Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Decision Tree (DT), Naive Bayes (NB) and Artificial Neural Network (ANN).
To summarize, the infertility diagnosis procedure applied to people with suspected infertility is a very long and costly process that requires a large number of trained people. Therefore, cost-effective, and easy-to-implement systems are needed. In this study, we focused on developing a very inexpensive, fast, sensitive instrument that can be used during physical examination, can take numerical results of three testicular parameters (volume, temperature, and consistency), and can be used on site, compared to applications that require very expensive and complex instrumentation. This developed system was also tested on volunteers with suspected infertility and the results were tried to be classified with appropriate classification methods.

2. Material and Methods

In this study, we aimed to measure three parameters of testis in real time by palpation method and for this purpose, three sensors were used as shown in figure 1.

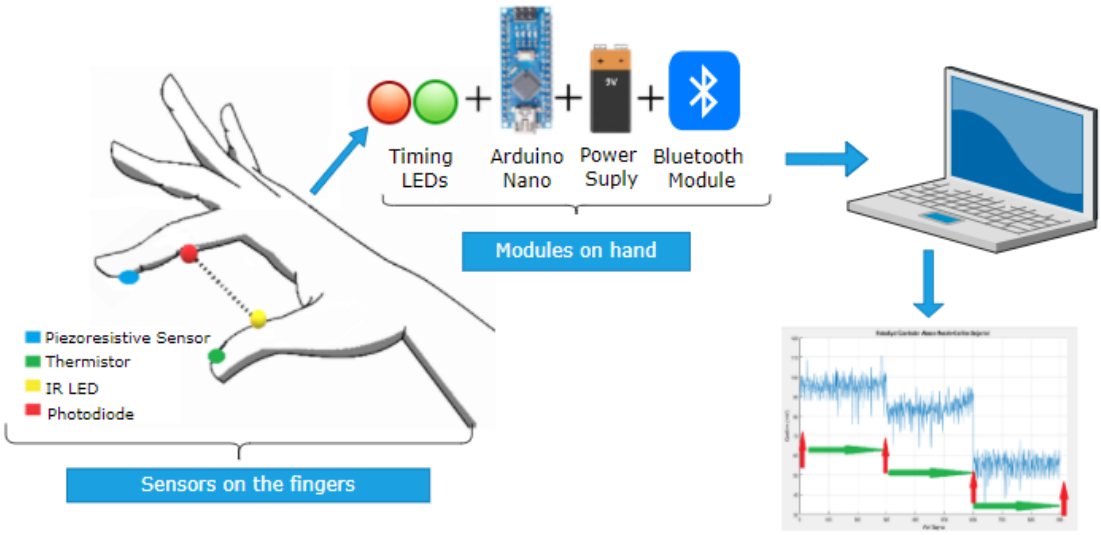


Figure 1. Circuit Diagram

2.1. Material and instrumentation

In this study, thermistor (MF11-50K 503) was used to measure of testicular stress, a piezoresistive sensor (BMP180) was used to measure of the consistency of the testis and a Photodetector (LTR-323DB) and an IR LED (L-7113F3C) were used to measurement of volume. Photodetectors contain both photodiode and transimpedance. Transimpedance is used to convert low current to voltage and achieve high signal-to-noise ratio. near infrared rays are between 780 nm and 1400 nm[30] and the IR led and detector used in this study work at 940nm. All these sensors were placed on finger-sized, long thin perforated pertinax so that they would not be affected by the joints in the fingers.

Data from these three sensors were transferred to the computer via Arduino Nano and Arduino Bluetooth Module (HC-05). Two LEDs (green and red) are used for the clinician to monitor the time. The power requirement of the system was provided by two 9V batteries. The cable between the computer and the device was removed thanks to the bluetooth module and a more comfortable experience for the user was obtained. All these elements were placed on a perforated pertinax and placed on the outer upper part of the hand.

The testis data presented in the study were obtained from real patients with the help of experienced clinicians working at Erciyes University Hospital. The analysis was first performed using SPSS to separate the soft tissue and normal tissue datasets, and then MATLAB to classify all the data.

2.2. Measurement of heat stress

The first sensor is used for the heat stress of the testis and for this purpose the sensor must be able to measure between 31.0°C and 36.0°C, does not need a calibration step for each repeated measurement, and has an accuracy of ±0.1°C[7]. A 50K NTC thermistor was used for this study due to its accuracy, small size, ease of use and suitability for non-invasive studies[35].
Temperature measurement and control aerospace, automotive, medical, laboratory applications, etc. It is a mandatory process and requirement for many fields, and today the most used electronic sensors for this purpose are thermistor, thermocouples and RTD (Resistance temperature detectors)[36, 37].

Regional metabolism and blood perfusion changes affect temperature measurements taken on human skin, and because of this effect, temperature measurement is of great importance in the diagnosis of many diseases such as cancer and diabetes[38].

Thermistors are used quite frequently in the medical field and are especially used for body temperature measurement[39]. For instance, Otahalova et al. have established a system aiming to examine vital data and used thermistor for temperature measurement in their studies[40]. In medical terms, the thermistor is not only used to measure body temperature directly, but also to measure other parameters. For example, in a study by Norman et al., a system that monitors respiratory flow using thermistor was designed in the diagnosis of respiratory disease[41].

Thermistors are a type of resistor made of ceramic and/or polymer. Normally, the resistance value is independent of temperature, and this is important in terms of protecting electronic devices from changing heat stress.
The equation between resistance and temperature is as follows.

$$\Delta R = \Delta T * K \tag{1}$$

ΔR and ΔT denote resistance and temperature changes, respectively. K is the temperature coefficient. According to the equation, it is clear that there is a relationship between temperature and resistance and this relationship depends on the value of K. Ideally for the normal resistor this K value is almost 0 to avoid the temperature effect, but for the thermistor it is completely different.

Since the main purpose of using thermistor is temperature measurement, the K value is not 0 and it is divided into two according to whether this value is negative or positive. If the thermistor is produced as K value < 0, an increase in temperature means a decrease in resistance and it is called NTC (Negative Coefficient Temperature). On the other hand, if the K value is > 0, it is called PTC (Positive Coefficient Temperature) and increasing temperature also increases the resistance.

Although thermistors have many advantages such as fast response, small size, and use over wide temperature ranges, they cannot produce linear results, and to solve this problem, there is an equation that directly converts the nonlinear internal resistance value according to temperature to the thermodynamic temperature[37][42][43]. It is called Steinhart-Hart Equation and showed in equation 2.

$$1/T = A + BlnR + C(lnR)\text{^}3 \tag{2}$$

As shown in Equation 2, A, B, and C are called Stein-Hart coefficients and vary with the thermistor model. T is the temperature as it is known, but it should be noted that it is in Kelvin. R is the resistance in ohms based on the current temperature.

2.3.Measurement of volume

Measuring the three axes of the testis is important in terms of the Lambert Equation ((a x b x c) x (0.71)) used to calculate the testicular volume[31]. In a study, a calipers were used to precisely measure these three axes (the superior-inferior, anterior-posterior, and medial-lateral axes) of the testis[30]. In this study, a simple distance sensor was developed to measure the distance between two fingers (thumb and index finger) using IR led, in on thumb, and photodiode which is on the index, similar to the calliper measurement mentioned.

Infrared rays(IR), which are between visible rays and microwave rays, cannot be detected by the human eye and are divided into three main groups as near, middle and far infrared rays[44, 45]. Since infrared rays have properties such as reflection and scattering, they are suitable for distance measurement for certain ranges[44, 46]. It is becoming more and more important to measure short distances without touching the surface of the measured objects[47]. In general, distance sensors using Infrared technology make measurements by using the properties of the reflected beam. If the reflectance of IR is used to measure of the distance, the user should know that the performance of the sensor depends on the reflectance properties of the object and the system has non-linear character[48]. In other words, the quality of the distance measurement depends on the quality of the reflected light, which is very much related to the scattering, absorption and reflection properties of the object surface[49]. Therefore, the person who wants to measure the distance using the reflection method with the IR sensor should work harder and find additional resources.

As shown in figure 2, the luminous intensity (E) means the number of photons falling on the surface of the object and is inversely proportional to the square of the distance.

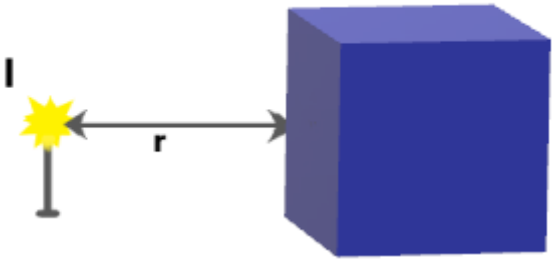


Figure 2. The light source and distance relationship of the illumination intensity on the object

As you move away from the light source, the intensity of light falling on the object decreases, and in this study, this optical law is taken as a reference for distance measurement. Based on this, IR LED was used as the light source in this study and a photodiode was placed instead of the object and the short distance between these two was tried to be measured.

$$E = I/r^2 \tag{3}$$

2.4.Measurement of consistency

The purpose of the third sensor is to measure the consistency of the testis and for this a piezoresistive sensor (BMP180) is used. The piezoresistive sensor was chosen because it has a suitable package for minimal application, does not contain much noise, has a fast response[50] and does not require any calibration process of the BMP180 sensor. The sensor output directly gives the pressure value in pascal. Since the BMP180 is an air pressure sensor, a pressure result according to tissue stiffness was obtained when the normal air pressure was subtracted from the tissue pressure measured in the study.

Pressure measurement is used in many areas such as muscle measurements such as the examination of the heart muscles, measuring the pressure value of the blood, examining the bone structure and skeletal system in the medical field[51].

Systems used to measure pressure today can be piezo-based, and they are divided into three: piezoelectric, piezocapacitive and piezoresistive[52]. Sensors working with piezoresistor logic are used in blood pressure measurements, heart rhythm monitoring and tissue analysis studies due to their advantages such as giving more linear results than other capacitive sensors, not needing too much power, and obtaining good results even at low pressure[52, 53].

Piezoresistive pressure sensors are also used in many areas such as aviation, biomedical applications and automotive, with the advantage of mass production, small size and good performance despite low power consumption[54].

The working principle of piezoresistive sensors is the measurement of the electrical resistance of the material, which changes according to the pressure, together with an external physical force. Against this mechanical stress, the electron and holes structure of the material therefore changes its resistance[55].

The resistance change of a rectangular electrically conductive material is as follows:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2v)\varepsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{4}$$

In the equation, R, ρ, ν and ε are resistance, resistivity, Poisson's ratio and voltage of the resistor, respectively[55]. Therefore, the pressure sensor has a surface area to be exposed to the impact. This surface can be in different geometric shapes depending on the purpose and the desired sensitivity. Four equal resistance piezoresistors are placed on the surface to form a Wheatstone bridge.

When a mechanical stress is applied to the surface, due to the special configuration of the Wheatstone bridge, the value of two of these equal piezoresistors decreases while the value of the other two increases. The resulting imbalance causes the output voltage to be formed, and the measurement of this voltage is also used in the measurement of mechanical stress. therefore, placing the piezoresistors on the surface is closely related to the pressure of the sensor, and using the Whetstone bridge allows for more precise measurements than bridges with one or two active arms[56].

Pressure sensors are divided into 3 according to the reference state and these are differential pressure, absolute pressure and gauge pressure[57]. The same sensor can be used for all measurements and the important point is here the reference for pressure[57]. Absolute pressure requires a perfect vacuum inside the sensor as a reference and is used in air pressure measuring sensors such as the BMP180. Beccani et al. designed a wireless palpation probe to help detect tumour tissue and stated that the BMP180 sensor can be used in the recommendation part of their study[58]. The pressure sensor used in this study directly gives the pressure value in pascal. However, before use, the current pressure in the environment should be measured by making an empty measurement and subtracted from the tissue pressure.

Expressing and positioning tissue differences with numerical data, especially for tumours, provides guidance for strategically administered drugs that will perform the surgery and be used during the treatment phase. Thus, new ways were sought to perform this procedure and studies were started to use palpation with robotic devices in different diagnostic areas[59]. For example, in one study, a testicular tonometry device was studied to be used in testicular consistency measurements. In the study performed on individuals diagnosed with varicocele by tonometry, it was observed that sperm concentration was consistent with the tonometry data obtained, and sperm morphology of healthy individuals was also compatible with the data obtained[30].

2.5.Getting data

All patients were evaluated in the same clinic and same device. All physical examinations were performed by a single observer (ECA). The mentioned parameters of the testis were measured over the scrotum. The consistency and volume of both testis of the patients and pressure before measurement were measured and recorded. Testicular volumes were determined by using Prader orchidometer. Testicular consistency was obtained using the palpation method.

In order to test whether the difference between testicles can be distinguished with the device, the patients whose testis measurements were made were selected by paying attention to the fact that they were individuals of different ages (range of ages = 6-70) and with different testicular structures.

Table 1. Means and Standard Deviation of Study Variables

Variables	Age		Right Testicular Volume		Left Testicular Volume		Number of Consistency			
							Right		Left	
	M	SD	M	SD	M	SD	Soft	Normal	Soft	Normal
İnfertile	26,6	8,3	17,6	7,18	16,4	7,35	1	14	4	11
Fertile	42,3	13,8	23,5	8,07	23,6	7,23	3	32	3	32

During testicular examinations, temperature, hardness, and 3-axis length measurements of the testicles were tried to be taken. so, a scheduling system was established.

As shown in Figure 3.c. the electronic board has timing LEDs (green and red) to aid control, with these LEDs clinicians can determine when to collect data. The red light first means the clinician has time to move his hand and then the green led turns on so the device starts collecting data and the user cannot move his hand. This process is repeated 3 times for each testicular examination (once for each axis) and takes only 1 minute in total (Figure 3.a and b).

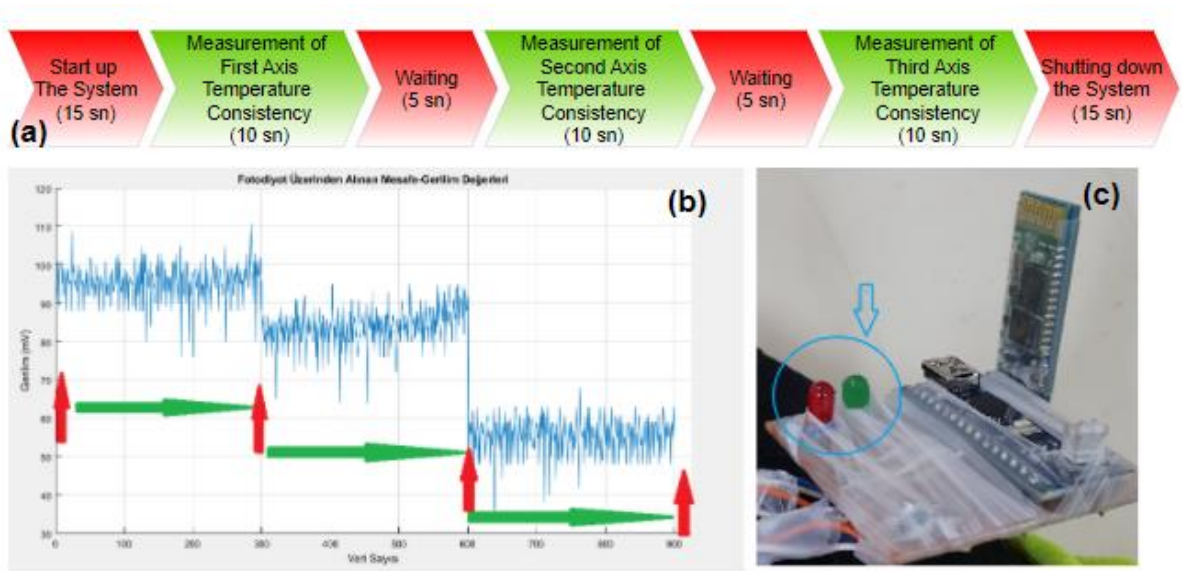


Figure 3. (a) Circuit flow chart (b) Using green, and red led for signal reception (c) Timing led on the board

2.5.Signal Analysis

One of the biggest problems in signal processing is denoising the signal. The collected signals for the study were first freed from noise. Single Spectrum Analysis (SSA) was used for noise elimination. At the same time, using the SSA technique will improve the modelling and forecasting situation[60]. When we look at the previous studies, it is seen that the SSA method is frequently used in this respect. For instance, Pilgrim et al. demonstrated noise elimination by working on a signal containing random noise[61].
SSA, which has attracted great attention recently, is a simple, high-performance time series analysis technique that does not require any special assumptions and is used in signal source separation, financial modelling, many engineering branches and especially in biomedical applications[60, 62].

To briefly mention the SSA, it includes two steps: decomposition and reconfiguration. The N-element signal obtained in the first step is converted to a Hankel matrix and it is called embedding. The column and number of this matrix conform to formula K= N-L+1. K and L are the number of rows and columns of the Hankel matrix, respectively. Then the resulting matrix is divided into three matrices. This division operation is called SVD. SVD is the last action applied in my first step. In the second step, eigentriple grouping and diagonal averaging are applied respectively. As a result of the applied process, a noise-eliminated signal is obtained.

In the study, signals were taken in real time and the final data is obtained by averaging the noise-free signal with the SSA process. This average, which will be statistically analysed or used in classification, is obtained by taking the average of each part divided into three to separate the axes.

2.7.Data analysis using machine learning

In the article, algorithms in Matlab were used while doing machine learning studies. These are KNN, SVM, Trees, Naive Bayes, and Ensemble. There are 5 features applied to machine learning in the study. These are the length of the 3 axes, temperature and consistency data for each testis measured by the device.

Then, it has been tried to be presented by calculating the F score, specificity, precision, and recall values according to the bar graphs showing the accuracy rates of these algorithms and the data obtained from the confusion matrices of these algorithms. The formulas used for these values are as follows:

$$\text{F1 Score} = 2 * (\text{Recall} * \text{Precision}/(\text{Recall} + \text{Precision})) \quad (5)$$

$$\text{Specifity} = \text{True Negative} / (\text{True Negative} + \text{False Positive}) \quad (6)$$

$$\text{Recall} = \text{True Positive} / (\text{True Positive} + \text{False Negative}) \quad (7)$$

$$\text{Precision} = \text{True Positive} / (\text{True Positive} + \text{False Positive}) \quad (8)$$

2.8.Statistical analysis

Statistical applications are used to examine the numerical or verbal data obtained as a result of any study and to find out whether there is a semantic difference between the data. In the proposed model, Mann Whitney U Test was used for consistency data.

When only soft and normal tissue testes were examined in the study, there was only one dependent and one independent variable. If two different groups want to be examined whether they differ from each other, statistically, there are two methods. These are the T test and the Mann Whitney U test. Before starting statistical studies, it is checked whether the data are normally distributed and appropriate test selection is made accordingly[63].

There are two different methods to examine the distribution of data and these methods are to look at the value of kurtosis or skewness of the data and to apply the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests. Skewness is the relationship between the median and the mean of the data, and it is desired that these two values be close to each other, while kurtosis is related to the frequency of the data, and it is desired that the peak of the frequency and the mean value be close to each other[63].

When Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests are applied, a significance value of $p < 0.005$ indicates that the data are abnormally distributed. If we look at the skewness and kurtosis values, the fact that these values are between -1 and 1 indicates a near-perfect distribution of the data[64], according to some sources, the obtained values are between -1.5 and +1.5[63] or between -2 and 2. values were considered acceptable in terms of normality of the data[65].

3. Results and Discussion

As mentioned before, the testicular abnormalities are emphasized during the physical examination. In this study, on the detection of these abnormalities, data obtained from volunteers were studied. Scrotal contents were examined with the device by palpation, and this examination includes evaluation of testicular temperature, size, and consistency.

3.1.Consistency

First, we tried to find out whether the piezoresistive sensor can be used to separate soft and normal subjects. Then, Mann Whitney U test was used for this step.

Tablo 3. Mann Whitney U Test results of normal and soft tissue data

Consistency	N	Variance	Median (hPa)	Mean (hPa)	Std. Error of Mean	U	z	P
Normal	89	,372	2,75	2,9770	,06468	209	-3,092	,002
Soft	11	,029	2,53	2,5682	,05104			
Total	100	,350	2,74	2,9320	,05919			

According to table 1, it can be shown that there is a statistical difference between normal tissue and soft tissue data (U = 209, p = .002). It is obvious that the mean of the normal tissue (2,97 hPa) is bigger that the soft tissue data (2,56 hPa).

In this study, we showed that the consistency of a tissue can be measured using a piezoresistive sensor by statistical methods. And according to the results of these data, the piezoresistive sensor shows high pressure when it presses on a hard tissue.

3.2.Volume

The other purpose of the study is to measure the distance between the IR LED and the photodiode. For this reason, 3 measurements were made with 0.5 steps between 0-6 cm and these data were combined in a graph to provide the interpolation equation (Figure 4).

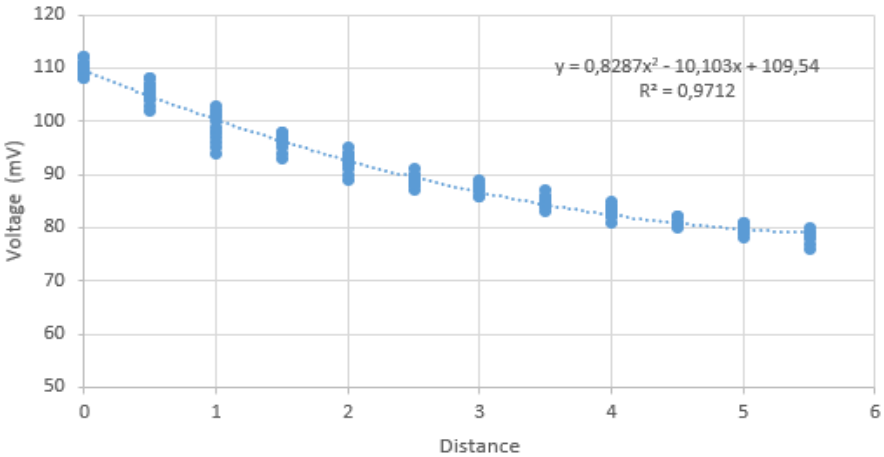


Figure 4. The regression curve obtained according to the measurement results between 0-6 cm

The resulting equation is a polynomial regression and its accuracy rate $R^2 > 0{,}95$ shows that both the system and the equation are suitable for measuring the distance between two fingers.

It has been concluded that the system used to measure the distance shows high accuracy, that each axis of the testis can be measured precisely, and the volume can be calculated according to the Lambert equation as a result of these measurements.
For this study, as mentioned before, 100 testicles from 50 men were examined and the result of 100 volumes obtained is shown in figure 5 where the three axes converge (black points). According to both figures 4 and 5, the amount of tension obtained decreases as the volume and distance increase.

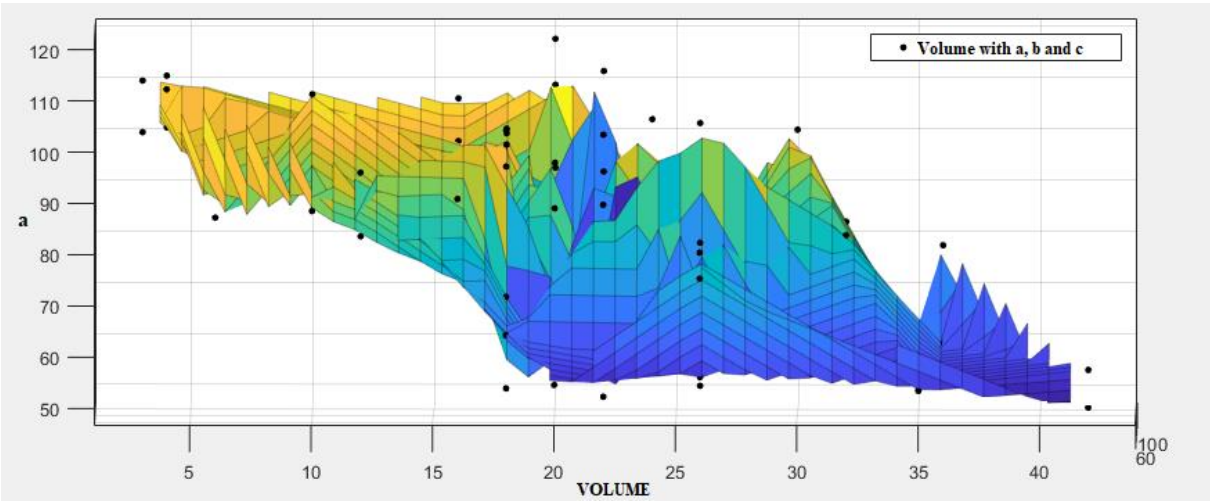


Figure 5. Distribution of 3-axis data from 100 testes by volume of the combination (black dots)

Experimental results have shown that the device can measure all testicular axes. This means that these data can be easily converted into volume values thanks to the Lambert equation.

3.3. Classification results

In this part of the study, accuracy rates were tried to be obtained by using classification algorithms. Algorithms in Matlab were applied to the data and different cross validation rates were applied to all algorithms.

3.3.1. Classification of consistency and heat stress measured with the device and consistency data obtained by palpation

The consistency and heat stress numerical data of the testicles obtained with the help of the device were labelled as soft and hard by palpation method, and the study results for the classification of these two groups are shown in figure 6.

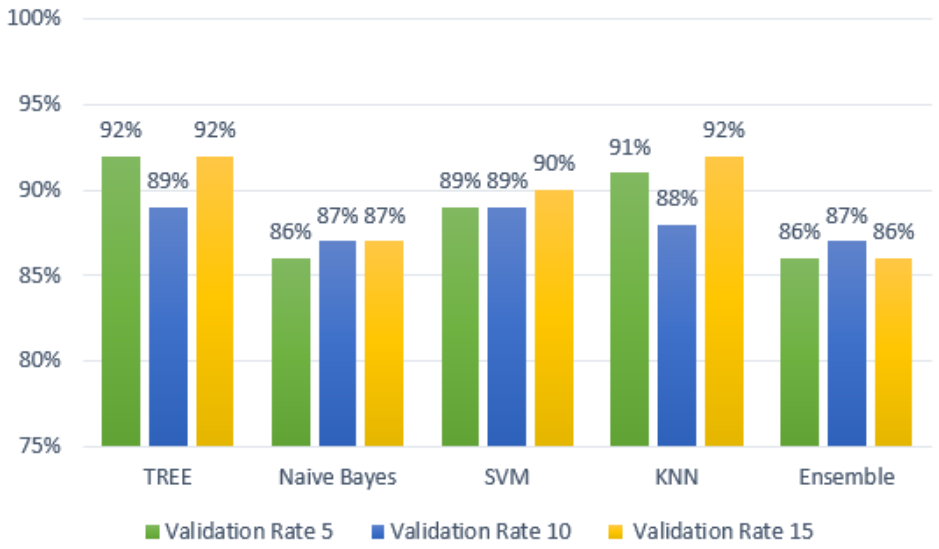


Figure 6. Statistical comparison of experimental results in terms of accuracy for consistency

In the statistical analysis part of the article, it was shown that there was a significant difference between the consistency data (Table 2). Figure 6 contains the results of the classification of the temperature and consistency results measured by the device according to 3 different validation rates for each testicle (total of 100 testicles) labelled according to the consistency information obtained by palpation.

The classification algorithm with the highest accuracy rate according to the 3 different cross validation rates applied is trees and it showed 92.0% accuracy according to validation 5 and 15, but 89.0% according to cross validation 10. The algorithms that show the least accuracy according to each validation rate are naive bayes and ensemble methods (around 87%).

Table 3. Comparison of classification algorithms in terms of consistency and heat stress

Method	**Tree**			**Naive Bayes**			**SVM**			**KNN**			**Ensemble**		
Validation Rate	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Accuracy (%)	92.0	89.0	92.0	86.0	87.0	87.0	89.0	89.0	90.0	91.0	88.0	92.0	86.0	87.0	86.0
F1 Score	0,94	0,93	0,94	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,92	0,94	0,92	0,92	0,92
Specificity	0,66	0,50	0,66	0	0,25	0	0,50	0,50	0,55	0,60	0,46	0,71	0,36	0,40	0,57
Recall	0,94	0,93	0,94	0,88	0,89	0,88	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,92
Precision	0,96	0,94	0,96	0,96	0,96	0,97	0,95	0,94	0,95	0,95	0,92	0,97	0,92	0,93	0,92

Table 3 shows the F-score, Specificity, Recall and Precision values of the algorithms shown in figure 6, according to their confusion matrix. Among all algorithms and validation rates, trees with 5 cross validation rates have the highest F score of 0.94. The lowest value belongs to Naive Bayes which has 5 cross validation rates with 0.91.

Another important point in the table is specificity, and in general, algorithms cannot be said to have very high specificity. KNN with 15 cross validation rate provides the highest specificity with 0.71. Again, with the worst specificity, Naive Bayes provides 0 at a cross validation rate of 5 to 15.

3.3.2.Classification of the small and normal testicular volume with 3 axes of testis by the device

Since our main aim in this study was to measure testicular volume differences, regardless of whether they were infertile or not, the testes, whose 3-axis distances were measured by the LED and photodetector, were labelled as small and normal, and classification algorithms were applied. While this labelling was done, data with a volume less than 20 mL as a result of orchidometer were labelled as small according to the literature[66]. Other testes were also labelled as normal.

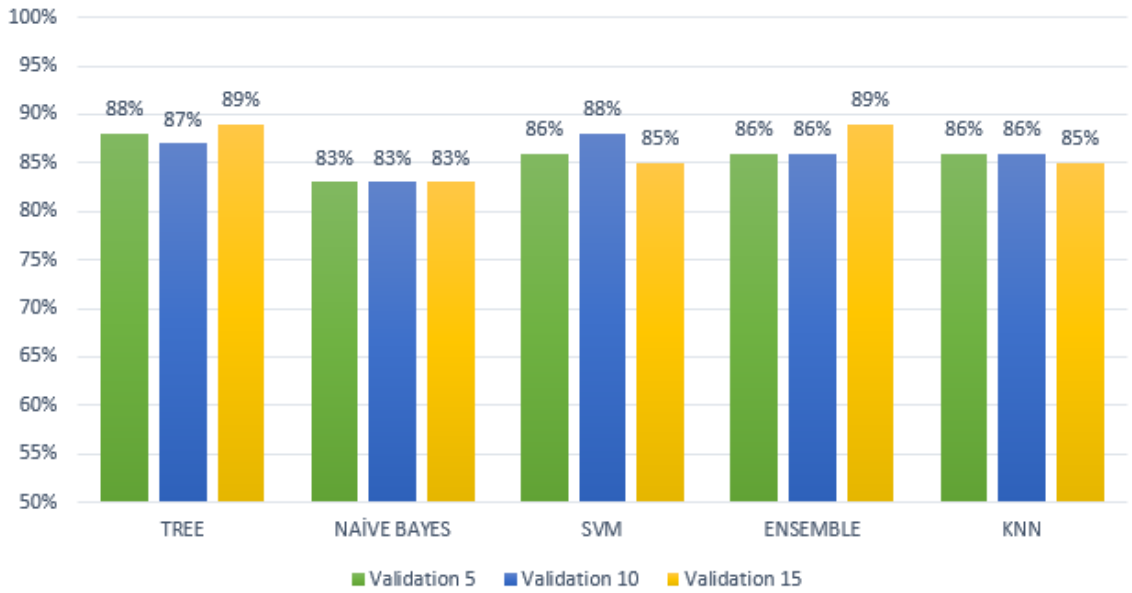


Figure 7. Statistical comparison of experimental results in terms of accuracy for volüme

Figure 7, the algorithms in Matlab were applied to the numerical data in mV of the 3-axis measured with the help of the device for each testis labelled as small or normal according to the volume information obtained by the orchidometer measurement. Again, classification processes were carried out using 3 different cross validation rates.

As seen in Figure 7, the accuracy rates of all algorithms on axis measurement are very close to each other. Compared to the cross validation 5 rate, the highest accuracy rate is 88% in trees. As a result of the study, when the ratio was 10, SVM showed the highest accuracy rate with 88%. Finally, looking at the rate of 15, Trees and Ensemble showed the highest accuracy with 89%.

Table 4. Comparison of classification algorithms in terms of testicle size

Method	**Tree**			**Naive Bayes**			**SVM**			**Ensemble**			**KNN**		
Validation Rate	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Accuracy (%)	88.0	87.0	89.0	83.0	83.0	0,83	86.0	88.0	85.0	86.0	86.0	89.0	86.0	86.0	85.0
F1 Score	0,92	0,89	0,92	0,87	0,88	0,88	0,91	0,91	0,90	0,90	0,91	0,92	0,89	0,91	0,90
Specificity	0,83	0,71	0,83	0,52	0,54	0,55	0,85	0,70	0,61	0,66	0,72	0,83	0,70	0,70	0,66
Recall	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	0,88	0,86	0,91	0,90	0,89	0,87	0,89	0,88	0,88	0,87
Precision	0,97	0,91	0,97	0,86	0,87	0,90	0,98	0,93	0,91	0,93	0,96	0,97	0,91	0,95	0,95

Table 4 shows the F-score, Specificity, Recall and Precision values of the algorithms shown in figure 7, according to their confusion matrix. Among all algorithms and validation rates, trees with 5 and 15 cross validation rates

have the highest F score of 0.92. The lowest value belongs to Naive Bayes which has 5 cross validation rates with 0.87.

As said before, another important point in the table is specificity. Looking at Table 3, it can be said that the algorithms applied to the data taken for the distance measurement in table 4 generally have higher specificity. Ensemble with 15 cross validation rate and Tree with 5 cross validation rates provide the highest specificity with 0.83. Again, with the worst specificity, Naive Bayes provides 0,52 at a cross validation rate of 5.

4. Conclusion

There are many people all over the world who want to have children but cannot have children due to various problems. These mentioned problems can occur as a result of both male and female factors. Finding the source of infertility is very important both in taking preventive measures and in reaching the necessary treatment without losing time.

Determining the causes of male infertility is a very laborious and long process. The physical examination is the first step of this research, and during this examination, the testicles responsible for sperm production are examined. During the examination, the focus is on testicular consistency and volume. However, during the physical examination, the person performing the examination should be experienced in this regard. Because palpation is unfortunately relative. The physician cannot obtain any numerical data as a result of palpation. The orchidometer used in volume measurement also gives comparative measurements, while some intermediate values are not taken into account. There are more complex systems for measuring both testicular consistency, volume, and testicular temperature. However, these systems also require trained people, are time-consuming and expensive.

In this study, a system that has never been done before is designed. In this system, testicular abnormalities were tried to be revealed by measuring the temperature, volume and consistency of the testis in just one minute at the same time, and the results obtained by the doctor with the palpation method were compared. When the data obtained from the patients were examined, it was seen that there was a significant difference between soft and hard testicular tissue. The distance sensor designed for short distance measurement used in testicular volume examination has also shown that it makes a healthy measurement. However, the system, which was successful in the empty measurement, could not show the same sensitivity when trying to measure the testicular axes. For this reason, the volume calculation could not be made according to the Lambert equation from the measurements taken. The problem affecting this may be that the sensors did not show sufficient sensitivity, or the location of the sensors may be considered to be not suitable for such a measurement. Changing the sensors for the system or making a more suitable positioning will allow the volume calculation to be made according to the equation.
Finally, another issue in the study is the use of machine learning methods. Although the applied methods showed high accuracy, the specificity rate is not optimal due to data limitations. This is because there is not enough data. It is clear that with more data, both the accuracy rates and the level of specificity will be higher.

Conflict of interest statement

Authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgment

We would like to thank our volunteers who have made the greatest contribution to our work.

References

[1] Kobayashi, H., Nagao, K., & Nakajima, K. ,2012. Focus issue on male infertility. Advances in Urology.

[2] Meacham, R. B., Joyce, G. F., Wise, M., Kparker, A., & Niederberger, C. ,2007. Male Infertility. Journal of Urology,177(6), :2058–2066.

[3] Qublan, H. S., Al-Okoor, K., Al-Ghoweri, A. S., & Abu-Qamar, A. ,2007. Sonographic spectrum of scrotal abnormalities in infertile men. Journal of Clinical Ultrasound,35(8), :437–441.

[4] Brugo-Olmedo, S., Chillik, C., & Kopelman, S. ,2001. Definition and causes of infertility. Reproductive BioMedicine Online,2(1), :173–185.

[5] Armstrong, J. M., Keihani, S., & Hotaling, J. M. ,2018. Use of Ultrasound in Male Infertility: Appropriate Selection of Men for Scrotal Ultrasound. Current Urology Reports 2018 19:8,19(8), :1–9.

[6] Makele, J.-A., Koskenniemi, J. j, Virtanen, H. E., & Toppari, J. ,2019. Testis Development. Endocrine Reviews,40(4), :857–905.

[7] Durairajanayagam, D., Agarwal, A., & Ong, C. ,2015. Causes, effects and molecular mechanisms of testicular heat stress. Reproductive BioMedicine Online,30(1), :14–27.

[8] Sengul, G., & Ertekin, C. ,2020. Human cremaster muscle and cremasteric reflex: A comprehensive review. Clinical Neurophysiology,131(6), :1354–1364.

[9] Gibson, A., Akinrinsola, A., Patel, T., Ray, A., Tucker, J., & McFadzean, I. ,2002. Pharmacology and thermosensitivity of the dartos muscle isolated from rat scrotum. British Journal of Pharmacology,136(8), :1194–1200.

[10] Schoor, R. A., Elhanbly, S. M., & Niederberger, C. S. ,2001. The pathophysiology of varicocele-associated male infertility. Current Urology Reports 2001 2:6,2(6), :432–436.

[11] Eisenberg, M. L., & Lipshultz, L. I. ,2011. Varicocele-induced infertility: Newer insights into its pathophysiology. Indian Journal of Urology : IJU : Journal of the Urological Society of India,27(1), :64.

[12] Lewis, R. W., & Harrison, R. M. ,1979. Contact scrotal thermography: Application to problems of infertility. Journal of Urology,122(1), :40–42.

[13] Karakaş, E., Karakaş, Ö., Boyacı, F. N., Doğan, F., Kılıçaslan, N., Çeçe, H., & Badem, Ö. F. ,2014. Varikoselli Erişkin Hastalarda Bilateral Testiküler Volümlerin Ultrasonografi İle Değerlendirilmesi. Düzce Tıp Fakültesi Dergisi,16(3), :30–32.

[14] Sakamoto, H., Ogawa, Y., & Yoshida, H. ,2008. Relationship Between Testicular Volume and Varicocele in Patients With Infertility. Urology,71(1), :104–109.

[15] Huang, D. Y., & Sidhu, P. S. ,2014. Focal testicular lesions: colour Doppler ultrasound, contrast-enhanced ultrasound and tissue elastography as adjuvants to the diagnosis. http://dx.doi.org/10.1259/bjr/30029741,85(SPEC. ISSUE 1).

[16] Aigner, F., De Zordo, T., Pallwein-Prettner, L., Junker, D., Schäfer, G., Pichler, R., … Frauscher, F. ,2012. Real-time sonoelastography for the evaluation of testicular lesions. Radiology,263(2), :584–589.

[17] Purdue, M. P., Devesa, S. S., Sigurdson, A. J., & McGlynn, K. A. ,2005. International patterns and trends in testis cancer incidence. International Journal of Cancer,115(5), :822–827.

[18] Albers, P., Albrecht, W., Algaba, F., Bokemeyer, C., Cohn-Cedermark, G., Horwich, A., … Pizzocaro, G. ,2005. Guidelines on Testicular Cancer. European Urology,48(6), :885–894.

[19] SAKAMOTO, H., SAITO, K., SHICHIZYO, T., ISHIKAWA, K., IGARASHI, A., & YOSHIDA, H. ,2006. Color Doppler ultrasonography as a routine clinical examination in male infertility. International Journal of Urology,13(8), :1073–1078.

[20] Brydøy, M., Fosså, S. D., Klepp, O., Bremnes, R. M., Wist, E. A., Wentzel-Larsen, T., & Dahl, O. ,2005. Paternity Following Treatment for Testicular Cancer. JNCI: Journal of the National Cancer Institute,97(21), :1580–1588.

[21] Djaladat, H., Burner, E., Parikh, P. M., Beroukhim Kay, D., & Hays, K. ,2014. The Association Between Testis Cancer and Semen Abnormalities Before Orchiectomy: A Systematic Review. Journal of Adolescent and Young Adult Oncology,3(4), :153–159.

[22] Ho, G. T., Gardner, H., Mostofi, K., DeWolf, W. C., Loughlin, K. R., & Morgentaler, A. ,1994. The effect of testicular nongerm cell tumors on local spermatogenesis. Fertility and Sterility,62(1), :162–166.

[23] Ho, G. T., Gardner, H., DeWolf, W. C., Loughlin, K. R., & Morgentaler, A. ,1992. Influence of testicular carcinoma on ipsilateral spermatogenesis. Journal of Urology,148(3 I), :821–825.

[24] Kantarci, F., & Mihmanli, İ. ,2015. Skrotal Görüntüleme. In Türk Radyoloji Derneği (pp. 59–70).

[25] Kim, W., Rosen, M. A., Langer, J. E., Banner, M. P., Siegelman, E. S., & Ramchandani, P. ,2007. US-MR imaging correlation in pathologic conditions of the scrotum. Radiographics,27(5), :1239–1253.

[26] Simmons, L. W., Firman, R. C., Rhodes, G., & Peters, M. ,2004. Human sperm competition: Testis size, sperm production and rates of extrapair copulations. Animal Behaviour,68(2), :297–302.

[27] Han, S., Zhao, L., Yang, C., Xu, J., Yao, C., Huang, C., … Li, Z. ,2021. Vitrification with microinjection of single seminiferous tubules: an efficient cryopreservation approach for limited testicular tissue. Reproductive BioMedicine Online.

[28] H, S., K, S., M, O., K, I., Y, O., & H, Y. ,2007. Testicular volume measurement: comparison of ultrasonography, orchidometry, and water displacement. Urology,69(1), :152–157.

[29] Holstein, A. F., Schulze, W., & Breucker, H. ,1994. Histopathology of Human Testicular and Epididymal Tissue. Male Infertility. Springer, London.

[30] Lewis, E. L., Rasor, M. O., & Overstreet, J. W. ,1985. Measurement of human testicular consistency by tonometry. Fertility and Sterility,43(6), :911–916.

[31] Lin, C. C., Huang, W. J. S., & Chen, K. K. ,2009. Measurement of testicular volume in smaller testes: How accurate is the conventional orchidometer? Journal of Andrology,30(6), :685–689.

[32] Ghiraldi, E. M., Salami, S. S., Gilbert, B. R., & Vira, M. A. ,2015. Impalpable Testicular Seminoma Identified on Sonoelastography. Journal of Medical Ultrasound,23(3), :150–153.

[33] Grasso, M., Blanco, S., Raber, M., & Nespoli, L. ,2010. Elasto-sonography of the testis: Preliminary Experience. Archivio İtaliano di Urologia e Andrologia ,82(3), :160–163.

[34] Behera, B., & Kumaravelan, G. ,2020. Performance evaluation of Machine learning algorithms in Biomedical Document Classification . International Journal of Advanced Science and Technology,29(5), :5018.

[35] Chen, W., Dols, S., Oetomo, S. B., & Feijs, L. ,2010. Monitoring body temperature of newborn infants at neonatal intensive care units using wearable sensors. In Proceedings of the 5th International ICST Conference on Body Area Networks (pp. 188–194).

[36] Jadhav, R. N., Mathad, S. N., & Puri, V. ,2012. Studies on the properties of Ni0.6Cu0.4Mn2O4 NTC ceramic due to Fe doping. Ceramics International,38(6), :5181–5188.

[37] Lavenuta, G. J. (n.d.). Negative Temperature Coefficient Thermistors. QTI Sensing Solutions

[38] Okabe, T., Fujimura, T., Okajima, J., Aiba, S., & Maruyama, S. ,2018. Non-invasive measurement of effective thermal conductivity of human skin with a guard-heated thermistor probe. International Journal of Heat and Mass Transfer,126, :625–635.

[39] Narczyk, P., Siwiec, K., & Pleskacz, W. A. ,2016. Precision human body temperature measurement based on thermistor sensor. In Formal Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems, DDECS 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

[40] Otahalova, T., Slanina, Z., & Vala, D. ,2012. Embedded sensors system for real time biomedical data acquisition and analysis. In IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) (Vol. 11, pp. 261–264). IFAC Secretariat.

[41] Norman, R. G., Ahmed, M. M., Walsleben, J. A., & Rapoport, D. M. ,1997. Detection of Respiratory Events During NPSG: Nasal CannulaJPressure Sensor Versus Thermistor. Sleep,20(12), :1175–1176.

[42] Feteira, A. ,2009. Negative temperature coefficient resistance (NTCR) ceramic thermistors: An industrial perspective. Journal of the American Ceramic Society,92(5), :967–983.

[43] Matus, M. ,2011. Temperature Measurement in Dimensional Metrology –Why the SteinhartHart Equation works so well. In Proceeding of Macroscale . Bern-Wabern, Switzerland.

[44] Bi, X. ,2021. Infrared Sensors and Ultrasonic Sensors (pp. 143–168). Springer, Singapore.

[45] Datta, A. K., & Almeida, M. ,2005. Properties Relevant to Infrared Heating of Foods. In M. A. Rao, S. S. H. Rizvi, A. K. Datta, & B. Raton (Eds.), Engineering Properties of Foods (pp. 209–235). Florida: CRC Press.

[46] Novotny, P. M., & Ferrier, N. J. ,1999. Using infrared sensors and the Phong illumination model to measure distances. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation,2, :1644–1649.

[47] Kassim, A. M., Jaafar, H. I., Azam, M. A., Abas, N., & Yasuno, T. ,2013. Performances study of distance measurement sensor with different object materials and properties. In Proceedings - 2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology, ICSET 2013 (pp. 281–284).

[48] Mohammad, T. ,2009. Using Ultrasonic and Infrared Sensors for Distance Measurement. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering,3(3), :267–272.

[49] Benet, G., Blanes, F., Simó, J. E., & Pérez, P. ,2002. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. Robotics and Autonomous Systems,40(4), :255–266.

[50] Kalantari, M., Ramezanifard, M., Ahmadi, R., Dargahi, J., & Kövecses, J. ,2011. A piezoresistive tactile sensor for tissue characterization during catheter-based cardiac surgery. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery,7(4), :431–440.

[51] Pramanik, C., Saha, H., & Gangopadhyay, U. ,2006. Design optimization of a high performance silicon MEMS piezoresistive pressure sensor for biomedical applications. Journal of Micromechanics and Microengineering,16(10), :2066.

[52] Gao, L., Zhu, C., Li, L., Zhang, C., Liu, J., Yu, H.-D., & Huang, W. ,2019. All Paper-Based Flexible and Wearable Piezoresistive Pressure Sensor. ACS Applied Materials & Interfaces,11(28), :25034–25042.

[53] Marco, S., Samitier, J., Ruiz, O., Morante, J. R., & Esteve, J. ,1996. High-performance piezoresistive pressure sensors for biomedical applications using very thin structured membranes. Measurement Science and Technology,7(9), :1195–1203.

[54] Chen, S., Zhu, M. Q., Ma, B. H., & Yuan, W. Z. ,2008. Design and optimization of a micro piezoresistive pressure sensor. In 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS (pp. 351–356).

[55] Kumar, S. S., & Pant, B. D. ,2014. Design principles and considerations for the 'ideal' silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review. Microsystem Technologies,7(20), :1213–1247.

[56] Reverter, F., Horak, G., Bilas, V., & Gasulla, M. ,2009. Novel and low-cost temperature compensation technique for piezoresistive pressure sensors. In BIPM (Ed.), XIX IMEKO World Congress (pp. 2355–2359).

[57] Singh, R., Ngo, L. L., Seng, H. S., & Mok, F. N. C. ,2002. A silicon piezoresistive pressure sensor. In Proceedings - 1st IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications, DELTA 2002 (pp. 181–184). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

[58] Beccani, M., Di Natali, C., Benjamin, C. E., Bell, C. S., Hall, N. E., & Valdastri, P. ,2015. Wireless tissue palpation: Head characterization to improve tumor detection in soft tissue. Sensors and Actuators A: Physical,223, :180–190.

[59] Ahn, B., Kim, Y., Oh, C. K., & Kim, J. ,2012. Robotic palpation and mechanical property characterization for abnormal tissue localization. Medical & Biological Engineering & Computing ,50(9), :961–971.

[60] Iranmanesh, S. H., Miranian, A., & Abdollahzade, M. ,2012. Signal processing using singular spectrum analysis for nonlinear system identification. In 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications, ISSPA 2012 (pp. 722–727).

[61] Pilgram, B., Schappacher, W., & Pfurtscheller, G. ,1992. A noise reduction method using singular value decomposition. In Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS (Vol. 6, pp. 2756–2758). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

[62] Saeed, M., Took, C. C., & Alty, S. R. ,2020. Efficient Algorithm to Implement Sliding Singular Spectrum Analysis with Application to Biomedical Signal Denoising. In ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings (Vol. 2020-May, pp. 1026–1029). Barcelona, Spain: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

[63] Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. ,2014. Using multivariate statistics . Pearson2012 (Vol. 6). Boston: Pearson.

[64] Hair, J. F., Black, W., Babin, B., Anderson, R., & Tatham, R. ,2013. Multivariate Data Analysis (2013th ed., Vol. 7). Essex, England: Pearson Education Limited.

[65] George, D., & Mallery, P. ,2016. SPSS for Windows step by step : a simple guide and reference. Published in 2010 in Boston by Allyn & Bacon (Vol. 14). Boston : Taylor & Francis .

[66] Carmignani, L., Gadda, F., Mancini, M., Gazzano, G., Nerva, F., Rocco, F., & Colpi, G. M. ,2004. Dedection of Testicular Ultrasonographıc Lesions in Severe Male Infertility. The Journal of Urology,172(3), :1045–1047.