



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdersi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdersi
Cilt: 16, Sayı: 1, Mart 2025 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Atilla Gencer Devocioğlu
İdris Bedirhanoğlu
Mehmet Nergiz
Hasan Polat
Hüseyin Fırat
Hüseyin Acar
Fevzi Önen
Dilek Eren Akyüz
Abdulkadir Albayrak
Bilal Gümüş
Senem Çetin Yılmaz
Murat Erdemoğlu
Ömer Türk

Teknik Editör / Technical Editor
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi

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

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

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

Hakem Listesi / Reviewers List

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

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

- Merve Açıkgenç Ulaş (Fırat Üniversitesi)
Emre Akarslan (Afyon Kocatepe Üniversitesi)
Merve Nur Barun (İstanbul Üniversitesi)
Ceren Kaya (Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi)
Murat Işık (Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi)
Salih Dağlı (Sinop Üniversitesi)
Bilal Çolak (Karabük Üniversitesi)
Yunus Santur (Fırat Üniversitesi)
Emrullah Acar (Batman Üniversitesi)
Eray Arslan (Vienna University of Technology)
Mehmet Eker (Tarsus Üniversitesi)
Baran Aydın (Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)
Handan Çakar (Ege Üniversitesi)
Selim Doğan (Konya Teknik Üniversitesi)
Esra Kavalcı Yılmaz (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi)
Canan Oral (Amasya Üniversitesi)
Ebru Sayılğan (İzmir Ekonomi Üniversitesi)
Ahmet Elbir (YTU)
Serdar Çiftçi (Harran Üniversitesi)
Kenan Gençol (Hitit Üniversitesi)
Mücahit Çalışan (Bingöl Üniversitesi)
Mehmet Daş (Fırat Üniversitesi)
Abdullah Keçeciler (Dumlupınar Üniversitesi)
Ömer Türk (Mardin Artuklu Üniversitesi)
Gürkan Kavuran (Turgut Özal Üniversitesi)
Ümit Budak (Bitlis Eren Üniversitesi)
Ahmet Benli (Bingöl Üniversitesi)
Esra Tuğrul Tunç (Fırat Üniversitesi)
Recep Yurtal (Çukurova Üniversitesi)
Nur Yağmur (Gebze Teknik Üniversitesi)
Ender Emir (Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi)
Burak Özdemir (Turgut Özal Üniversitesi)
Şahin Güneş (Solihull College and University Center)

Macit Yurtsever (Boğaziçi Üniversitesi)
Nihal Eratlı (ITU)
Ferhat Erdal (Akdeniz Üniversitesi)
Taha Etem (Çankırı Karatekin Üniversitesi)
Yavuz Gül (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi)
Kamil Hakan Derin (Adıyaman Üniversitesi)
Şükrü Aykat (Mardin Artuklu Üniversitesi)
Hasan Zan (Mardin Artuklu Üniversitesi)
Mir Rahib Hussain (Sindh Agriculture University)
Halit Çetiner (Isparta Üniversitesi)
İhsan Tuğal (Muş Alparslan Üniversitesi)
Cihan Özel (Fırat Üniversitesi)
Erdoğan İkinciogulları (Bingöl Üniversitesi)
Ömerul Faruk Dursun (İnönü Üniversitesi)
Mehmet Enver Aydın (DU)
Emre Arı (DU)
Kasım Şimşek (DU)
Sedat Bingöl (DU)
Zeynel Fuat Toprak (DU)
Orhan Arpa (DU)
Ömer Faruk Söylemez (DU)
Cem Haydaroglu (DU)
Emrah Aslan (DU)
Şeyhmus Tümmür (DU)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

Predicting CPU Performance Score with Regression Analysis (Research Article) Güney Kaya, İzzet Emre Şen, Osman Altay	1
Mum Çubuğu Grafik Gösterimi, Minimum Artıklık Maksimum İlgililik Algoritması ve XGBoost Modeline Dayalı Rüzgâr Hızı Tahmini (Araştırma Makalesi) <i>Wind Speed Forecasting Based on Candlestick Chart Representation, Minimum Redundancy Maximum Relevance Algorithm and XGBoost Model (Research Article)</i> Seçkin Karasu	13
A Novel Hybrid Attention VGG Method For Benign and Malignant Breast Cancer Classification (Research Article) Mustafa Salih Bahar	27
Elma Yaprak Hastalıklarının Sınıflandırılması için Genetik Algoritma ile Otomatik ESA Mimarisi Tasarımı (Araştırma Makalesi) <i>Design of Automatic CNN Architecture with Genetic Algorithm for Apple Leaf Disease Classification (Research Article)</i> Özge Nur Özaras, Asuman Günay Yılmaz, Eyüp Gedikli	49
Duygu tanımda akustik verilerle derin öğrenme modellerinin karşılaştırılması: LSTM ve DenseNet üzerine bir inceleme (Araştırma Makalesi) <i>Comparison of deep learning models with acoustic data in emotion recognition: a study on LSTM and DenseNet (Research Article)</i> Buket İşler, Fahreddin Raşit Kılıç	59
Preprocessed Vision Transformers and Classical Classifiers in Diagnosing Skin Diseases (Research Article) Bilal Şenol, Uğur Demiroğlu	69
A better way to detect sybil attacks in vehicular ad hoc networks (Research Article) Ziya Cihan Tayşi	81
Examination of the Effect of Shading on a Photovoltaic System Performance (Research Article) Zeynep Bala Duranay, Hanifi Güldemir	89
Bankruptcy Prediction with Optuna-Enhanced Ensemble Machine Learning Methods: A Comparison of Oversampling and Undersampling Techniques (Research Article) Vahid Sinap	97
Detection of Flatfoot Deformity from X-Ray Images using Image Filtering and Transfer Learning Approaches (Research Article) Merve Kokulu, Hanife Göker, Ömer Kasım	115
A Novel Deep Feature Extraction Approach Based on DenseNet201 and ResNet50 for Cotton Leaf Disease Detection (Research Article) Nursena Baygın	125

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

- Experimental Investigation of Roughness Transfer Behavior of AA2024-T3 Aluminum Alloys in Cold Rolling (Research Article)
Batuhan Özakin, Kürşat Gültekin **139**
- Pseudospektral Chebyshev yöntemi ile fonksiyonel dereceli çubukların deformasyon analizi (Araştırma Makalesi)
Deformation analysis of functionally graded rods by pseudospectral Chebyshev method (Research Article)
Özlem Cerit, Durmuş Yarımpabuç **147**
- GO, GNP ve hBN nanoparçacık katkılı sodyum asetat trihidrat faz değişim malzemesinin farklı soğutma koşulları altında T-history yöntemi kullanılarak erime ve supercooling davranışının incelenmesi (Araştırma Makalesi)
Investigation of the melting and supercooling behavior of GO, GNP and hBN nanoparticle-doped sodium acetate trihydrate phase change material using the T-history method under different cooling conditions (Research Article)
Sinem Kılıçkap Işık **157**
- Kafes yapılı femur plakların stres kalkanı üzerindeki etkisinin sonlu elemanlar ile incelenmesi (Araştırma Makalesi)
Investigation of the effect of lattice-structured femoral plates on stress shielding using finite elements (Research Article)
Ömer Faruk Uzunyol, Erkan Bahçe **167**
- Karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının basma testi analizi (Araştırma Makalesi)
Compression test analysis of carbon fiber coated TPMS lattice structures (Research Article)
Özgün Ceren Akbay, Burak Özdemir, Erkan Bahçe, Mehmet Akif Oymak **177**

Maden Mühendisliği / Mining Engineering

- Yerüstü Madencilik Delme-Patlatma Faaliyetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)
Evaluation of Surface Mining Drilling and Blasting Activities in Terms of Occupational Health and Safety (Research Article)
Sümevra Cevheroğlu Çıra, Özgür Akkoyun **185**

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- Volkanik cüruf modifiyeli betonlarda hasarsız deney yöntemleri ile basınç dayanımı tahmini (Araştırma Makalesi)
Prediction of compressive strength in volcanic slag modified concrete using NDT methods (Research Article)
İlker Bekir Topçu, İsmail Hacıoğlu **199**
- Rainwater Harvesting for Lawn Irrigation: A Case Study in Diyarbakır Province (Research Article)
Muhammed Nimet Hamidi **207**

Evsel atıklardan biyogaz üretimi ve enerji potansiyeli: Diyarbakır Örneği (Araştırma Makalesi) <i>Biogas production from domestic waste and energy potential: Diyarbakir sample (Research Article)</i> Şeyhmus Tümür	217
Nevşehir taşı tozunun kendiliğinden yerleşen harçlarda portland çimentosu ikamesi olarak değerlendirilmesi: erken yaşta mukavemet ve reoloji (Araştırma Makalesi) <i>Evaluation of Nevşehir stone powder as a portland cement substitute in self-compacting mortars: early-age strength and rheology (Research Article)</i> Mustafa Demir, Merve Şahin Yön, Mehmet Karataş	229
Seyhan Barajı su kotunun belirlenmesi ve mevsimsel analizi: Uzaktan algılama teknikleriyle 30 yıllık bir çalışma (Araştırma Makalesi) <i>Determination and seasonal analysis of water levels in Seyhan Dam: A 30-year study using remote sensing techniques (Research Article)</i> Nihal Adigüzel, Muhammed Furkan İnce, Arzu Özkaya	235
Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevelerde Kapasite Tasarımı Yaklaşımının ve Deprem Performansının Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi ile Değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi) <i>Capacity Design and Nonlinear Time History Analysis Approach to Seismic Performance of Eccentrically Braced Steel Frames (Research Article)</i> Alpay Işın, Cüneyt Vatanserver	243
A Parametric Study on the Design of Multi-Storey Steel Buildings (Research Article) Bartu Duran, Güliz Bayramoğlu, Sibel Gürel	257
Eğrisel Savaklarda Kret Yüksekliğinin ve Savak Uzunluğunun Su Yüzü Profiline Etkisi (Araştırma Makalesi) <i>Effect of Crest Height and Weir Length on Water Surface Profile in Curvilinear Weirs (Research Article)</i> Eralp Öbek, M. Emin Emiroğlu	265

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

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



Predicting CPU Performance Score with Regression Analysis

Güney Kaya^{1*}, İzzet Emre Şen², Osman Altay³

¹ Manisa Celal Bayar University, Department of Software Engineering, guneykaya2002@gmail.com ORCID: 0009-0007-7687-7350

² Manisa Celal Bayar University, Department of Software Engineering, emre.senn83@gmail.com ORCID: 0009-0006-8640-8374

³ Manisa Celal Bayar University, Department of Software Engineering, osman.altay@cbu.edu.tr ORCID: 0000-0003-3989-2432

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 May 2024
Received in revised form 8 January 2025
Accepted 10 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Regression Analysis, Machine Learning, Data Mining, CPU, CPU Performance

ABSTRACT

A central processing unit (CPU) is the core component of a computer that processes data and executes commands, directly impacting the system's performance. Choosing the right processor is crucial, as it ensures efficient, rapid operation and supports the overall system's functionality. An optimal processor choice significantly influences device performance, making it a critical factor in system design. In this research, the CPU's performance score was predicted using regression analysis, based on its features. Support Vector Regression (SVR), Random Forest Regression (RFR), Multiple Linear Regression (MLR), Gradient Boosting Regression (GBR) and Neural Network Regression (NNR) are used to estimate the CPU's performance score. As a result, the NNR has the highest coefficient of determination score, which is 0.9765, followed by GBR, 0.9588. MLR, RFR, and SVR algorithms have the R-squared score of 0.9522, 0.9346, and 0.8658, respectively.

Doi: 10.24012/dumf.1493049

* Corresponding author

Introduction

In our modern world, computers are so widely used that evaluating the performance of a computer system, or more specifically, the central processing unit (CPU) of a computer, is incredibly important in various decisions [1]. A computer's CPU performs various functions such as calculations, logical decisions, transferring data from one place in the computer's memory to another, and multitasking between applications running on your desktop. Therefore, CPU performance is not only incredibly important for choosing your next computer, but also for computer system configuration and system design.

Research has explored the use of performance counters and power weights to create a prediction model for CPU power consumption and potential applications in power-aware embedded systems, mapping hardware performance counter values to processor power consumption and utilizing this model to predict runtime and CPU power consumption [2]. Machine learning regression algorithms are increasingly used to predict CPU performance based on hardware components and other observable data. Regression analysis enables indirect prediction of resource consumption and performance based on easily observed

data [3]. For example, one study proposed a number of methods to predict CPU performance based on hardware characteristics such as the amount of memory and processor speed [4].

In our case, we decided that it would be appropriate for us to use regression analysis to understand how CPU performance scores vary with CPU specifications. Regression analysis is a statistical method that helps understand how one variable changes with respect to another variable. This research paper aims to predict CPU performance scores from CPU features using regression analysis. To do so, a dataset containing various CPU features will be used to create a regression model. The accuracy and reliability of the model will then be evaluated using test data. This research will help to predict CPU performance scores more accurately, providing computer users with better purchasing options. Users will be able to avoid wasting money and time by selecting a CPU that fits their desired performance level.

Additionally, this research might benefit the CPU production process and contribute to optimized CPU production. It can provide manufacturers with the opportunity to create an optimal design, produce fewer

faulty products, and increase customer satisfaction. This will increase the competitiveness of these companies and lead to positive results for end-users and firms alike.

Materials and Methods

Data Gathering

There are several features that affect the performance of a CPU. At the top of these are features such as core speed and clock speed. The whole list of features is explained below.

1. **Base Clock:** Base clock defines the speed at which the processor's transistors open and close. Base clock is the operating point at which Thermal Design Power (TDP) is defined. It is calculated in Gigahertz (GHz) or cycle per second.
2. **CPU Mark [5]:** CPU Mark/CPU Point refers to the score of the processor after benchmarking tests. This will be output for our models.
3. **Date:** Release date of CPU.
4. **Lithography [6]:** It refers to the thickness of the processor's print on the silicon.
5. **L3 Cache:** It refers to part in the processor where fast memory is located.
6. **Max. Boost Clock:** Maximum boost clock is the maximum single-core frequency at which the processor can operate using various technologies, if available. It is calculated in Gigahertz (GHz) or cycle per second.
7. **Number of Cores:** The number of cores of the CPU. Cores are a hardware term that indicates the number of individual central processing units in a single computing component (chip).
8. **Number of Threads:** The number of threads of the CPU. Thread and thread processing are software terms for a simple regular sequence of instructions that pass through or are processed by a single CPU core.
9. **Platform:** Target platform of CPU.
10. **Series:** Series of CPU

11. **TDP:** TDP reflects the average power, in watts, that the processor dissipates at Base Clock with all active cores under a high complexity workload.

12. T_{jmax} : T_{jmax} is the maximum temperature allowed in the processor chip.

The CPUs in our collected dataset are the Intel [7] and AMD [8] branded CPUs, which are currently the two most commonly used brands. The data for these CPUs were collected from the official websites of the brands. The CPUs selected for use in the dataset have benchmark scores between 2749 and 63599. The statistical data related to the dataset is shown in Table 1. Although the range value of the date feature is 12, it can be seen that relatively new processors were selected by looking at the mean and mode values. The values of the base clock, max. boost clock, and series features did not vary much among the selected CPUs and remained in a narrow range. Although T_{jmax} values are mostly clustered around the mean, the wide range indicates the presence of extreme values. The core and thread counts are also centered around the mean, but since the median values are lower than the mean and the range values are higher, we can conclude that they are more widely distributed. The output value, the CPU Mark value, is in a wide range and the variance value is quite high. In the light of all this data, it can be concluded from Table 1 that the slightest change in the input values can make a big difference in the CPU Mark value.

Methods

Data Collection and Pre-processing

Data mining in computer science is a field that involves the automated extraction of valuable patterns and knowledge from large datasets. It is an interdisciplinary subfield of computer science that utilizes techniques from artificial intelligence, statistics, and database management [9].

Data is considered to be of good quality if it meets the requirements of the intended use. Apart from this, there are three elements that define data quality: accuracy, completeness and consistency [10]. Different attribute types and data properties can help detect false values and outliers. This will be useful in data cleaning and integration steps. Data processing techniques, when applied before mining, can significantly improve the overall quality of the

Table 1. Statistical Data

Base Clock	CPU Mark	Date	Litography	L3 Cache	Max. Boost Clock	# of Cores	# of Threads	Platform	Series	TDP	Tjmax	
3.10	14743.98	2018.54	12.92	13.37	4.00	6.80	12.17	6.26	6.20	66.06	97.51	Mean
0.58	10648.6	3.11	5.69	10.64	0.75	3.75	6.92	1.70	1.89	45.92	6.81	STD
3.10	12714.00	2019.00	14.00	12.00	4.00	6.00	12.00	7	7.00	56.5	100.00	Median
3.00	16979.00	2022.00	14.00	8.00	4.00	4.00	8.00	7	7.00	65.00	100.00	Mode
3.20	63591.1	12.00	27.00	61.00	2.00	22.00	32.00	6	8.00	247.00	41.00	Range
0.33	1.13E+08	9.67	32.39	113.41	0.56	14.11	48.00	2.89	3.57	2109.44	46.41	Variance

extracted patterns and/or the time required for actual mining [11].

Data mining methods and techniques cover various areas such as classification, clustering, exploratory analysis, relationship analysis, prediction and text mining. These methods are used to transform complex data sets into meaningful information and improve decision-making processes.

The steps in the data mining process can be listed as follows:

1. Data Cleaning: The removal of meaningless data from the dataset.
2. Data Integration: The meaningful combination of different data.
3. Data Reduction: Determining the data to be used for obtaining meaningful information.
4. Data Transformation: Preparing the data to be applied to data mining, making it suitable for the data mining algorithm to be used.
5. Data Mining: Applying a machine learning algorithm to the dataset that has been prepared for data mining.
6. Pattern Evaluation: Identifying different patterns within the pattern obtained as a result of the used algorithm.
7. Knowledge Representation: Presenting the new information obtained as a result of data mining to the user.

The dataset used in this study has categorical data alongside numerical data. Platform and series features are encoded to representative numbers during preprocessing phase. Processors produced for the desktop platform tend to have higher benchmark scores than those produced for the laptop platform. Similarly, Series feature indicates the generation of CPU. That means the higher the series, the higher the performance tends to be.

Algorithms

The data, which has been made suitable for the use of machine learning algorithms, has been processed through regression analysis algorithms to predict performance scores. The algorithms used are as follows:

Support Vector Regression

The Support Vector Machine was presented in 1995 [12] and generalizes to Support Vector Regression (SVR) by creating an ε -tube, an ε -insensitive region around the function. SVR is a machine learning technique that involves training a model to predict a continuous output variable by finding a hyperplane that best fits the data. In support vector regression, the goal is to find a hyperplane that fits the data while allowing some points to be on the wrong side of the hyperplane, within a certain margin of error. These points are called support vectors, and they are used to define the hyperplane [13].

The SVR using a linear kernel function is shown in Equation 1 [14].

$$y = \omega x + b \quad (1)$$

The Error Function (Equation 2) can be minimized based on the target being z_i [14].

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\| + c \sum_{i=1}^n (\xi_j + \xi_i^*) \quad (2)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} z_i - (\omega x + b), & \leq \varepsilon + \xi_i \\ (\omega \cdot x) + b - z_i, & \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i \xi_i^*, & \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

The linear kernel function can be described as follows [14]:

$$K(x, y) = \langle x, y \rangle \quad (4)$$

Random Forest Regression

Random Forest Regression (RFR) is a machine learning technique that involves creating an ensemble of unpruned decision trees through the use of bootstrap samples of the training data and random feature selection during tree induction [15]. This method, first developed by Breiman in 2001 [16] and has been shown to outperform linear regression in terms of fitting observed data due to its ability to handle variance in the data more effectively [17]. It is capable of handling relatively small samples with a large number of variables, making it a robust choice for various applications [18].

The process of constructing a RFR model involves tuning several hyperparameters, such as the number of trees in the forest and the maximum depth of each tree. These hyperparameters can be optimized using techniques such as grid search or random search [19].

Multiple Linear Regression

Multiple Linear Regression (MLR) is a statistical technique used to analyze the relationship between multiple independent variables and a single dependent variable. It extends the concept of simple linear regression by allowing for more than one predictor variable to be included in the model [20]. In computer science, linear and multiple linear regression finds various applications such as in developing predictive models, analyzing sensor data, and calibrating sensor technologies [21][22]. MLR can be used to understand the relationship between CPU performance and different hardware components and other observable data.

The mathematical model of multiple linear regression can be explained as follows [23]:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

Here, y is the dependent variable and x is the independent variable. β_0 represents the constant, and β_n represents the coefficients.

Gradient Boosting Regression

Gradient boosting is a technique in ensemble learning where numerous weak learners, like decision trees, are merged to form a powerful learner [24][25]. In Gradient Boosting Regression (GBR), each decision tree is trained to predict the residual error of the previous tree, and the final prediction is obtained by adding the predictions of all the trees. This approach allows the model to focus on the most difficult cases and improve its performance over time.

The algorithm operates by iteratively incorporating decision trees into the model, [26], with each new tree trained to predict the negative gradient of the loss function with respect to the output variable. The negative gradient represents the direction in which the loss function is decreasing, and thus helps the algorithm to focus on the most difficult cases.

Neural Network Regression

Neural Networks was first proposed in 1943 and inspired by the biological nervous system [27]. Lately, they have become extensively used in classification, regression, pattern recognition, forecasting, and time series problems [28]-[30].

Neural Network Regression (NNR) is a method in machine learning where a neural network is trained to forecast a continuous output. A neural network comprises interconnected nodes, known as neurons, arranged in layers. The input layer receives data, while the output layer generates predictions. Intermediate hidden layers allow the network to grasp intricate non-linear connections between input and output variables. The objective in neural network regression is to minimize the disparity between predicted and actual outputs through training.

Neural networks can be tuned by adjusting several hyperparameters, such as hidden layer sizes, solver class and the learning rate of the optimization algorithm [31-37].

Feature Scaling

Min-Max Scaling

Due to the differences in scales between the CPU features in the dataset, it was decided to use data scaling. The Min Max Scaler method was applied for this purpose.

Min Max Scaler performs the scaling (normalization) of values in a dataset within a certain range. This is similar to standardizing the data, but while standardization scales the data based on the mean value, Min Max Scaler squeezes the data into a specified minimum and maximum range [38].

This can be useful, especially when there are many outliers in the dataset.

Min Max Scaler scales each feature in the dataset (which includes the attributes used by the learning algorithm) using the following formula:

$$x' = \frac{(x - \min(x))}{(\max(x) - \min(x))} \quad (6)$$

Here, x is the value of a feature in the dataset, and $\max(x)$ and $\min(x)$ are the maximum and minimum values of that feature. This formula scales the values of each feature in the dataset between 0 and 1 [38].

Evaluation Metrics

In this model, Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE) [39], and R-Squared (R^2) [40] metrics used to measure the difference between the predicted value and the actual value.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_j (t_j - o_j)^2}{\sum_j (o_j)^2} \quad (10)$$

Experimental Results & Discussion

In the collected dataset, 70% of the 206 data points were separated for training and 30% for testing, randomly.

Support Vector Regression

SVR results were the worst out of all five algorithms we compared. Results of each metric for SVR shown below.

- MAE: 2268.27
- MSE: 18808394.80
- RMSE: 4336.86
- R^2 : 0.8658

In SVR, the hyperparameters that need to be tuned includes the choice of kernel function, gamma value and the regularization parameter that controls the trade-off between the margin and the error. These hyperparameters can be optimized using techniques such as grid search or random search. In our case, 'linear', '1' and '1000' values were the best fit for these parameters in order.

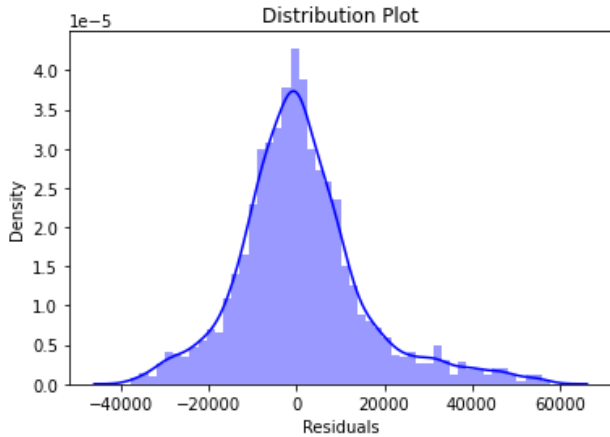


Figure 1. Distribution Plot of SVR.

Figure 1 shows the distribution of the residuals. Ideally the residuals should be symmetric around the zero line. If the residuals are skewed to one side, it suggests that the model is overpredicting or underpredicting the target variable in that region. We can see that residuals we have slightly skewed to right which means the model is not capturing some patterns in the data, or there may be outliers in the data that are affecting the model's performance.

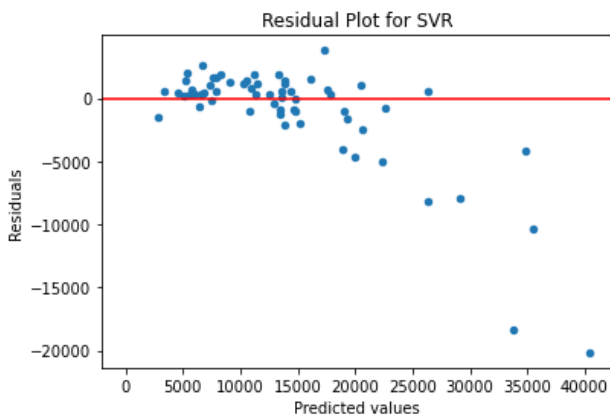


Figure 2. Residual Plot of SVR.

The Figure 2 appears to have a roughly asymmetric distribution around zero, which suggests that the SVR model is not making predictions that are on average equally overpredicting and underpredicting the true values.

It is clear that there are some outliers in the residual plot, particularly at the higher end of the x-axis, which suggests that the SVR model is struggling to accurately predict these extreme values.

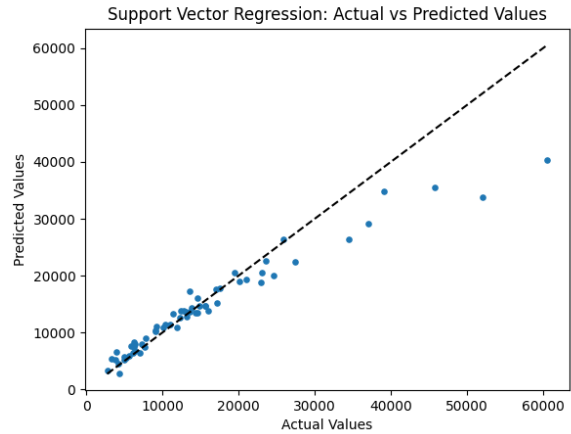


Figure 3. Scatter Plot of SVR.

Figure 3 shows us the scatter plot of the predicted and actual values. The dashed line represents the ideal prediction where actual and predicted values are the same. Points above the dashed line indicate that the model has over-predicted the target variable, whereas points below the line indicate under-prediction. The scatter plot can be used to identify areas where the model is performing well and where it needs improvement. For this instance, the SVR model heavily under-predicts values over 20000, making it unreliable for predicting high-end CPUs scores.

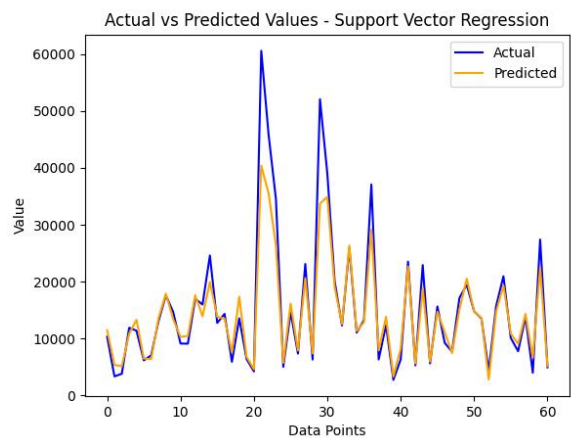


Figure 4. Actual vs Predicted Values of SVR.

This Figure 4 displays the comparison of the predicted and actual values of test CPUs. The blue line represents the actual values, while the orange line represents the predicted values. Ideally, these lines would overlap, with the predicted line covering the actual line, indicating that the model is providing accurate results. It is clear that the predicted values are significantly inaccurate for CPUs with score values of 20000 and above.

Random Forest Regression

RFR gave the second worst results out of all five algorithms we compared. Results of each metric for RFR shown below.

- MAE: 1828.75
- MSE: 9210826.03

- RMSE: 3034.93
- R²: 0.9346

In RFR, after tuning several hyperparameters, we found that the number of trees parameter '100' and the function to measure the quality of a split 'squared error' gave better results than others we tried.

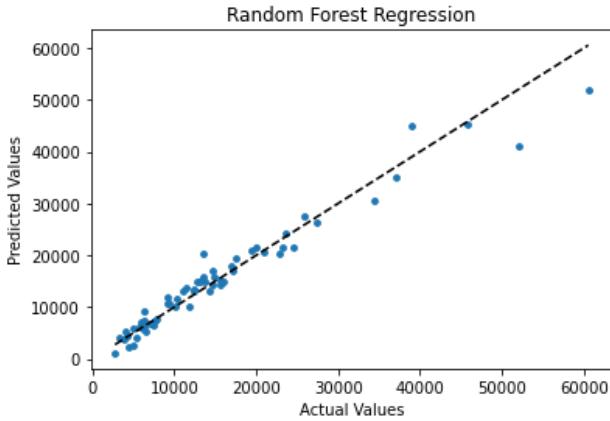


Figure 5. Scatter Graph of RFR.

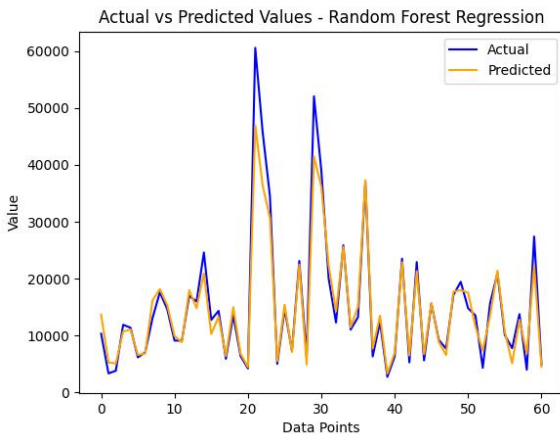


Figure 6. Actual vs Predicted Values of RFR.

Both Figure 5 and Figure 6 show us the comparison of predicted and actual values for their respective data points. It is clear that the RFR algorithm provides good results for lower values of CPU Score while still heavily under-predicting most values above 30000.

Multiple Linear Regression

MLR results showed that this algorithm was the third best among all the algorithms we compared. Results of each metric for MLR are demonstrated below.

- MAE: 1724.65
- MSE: 6701067.82
- RMSE: 2588.64
- R²: 0.9522

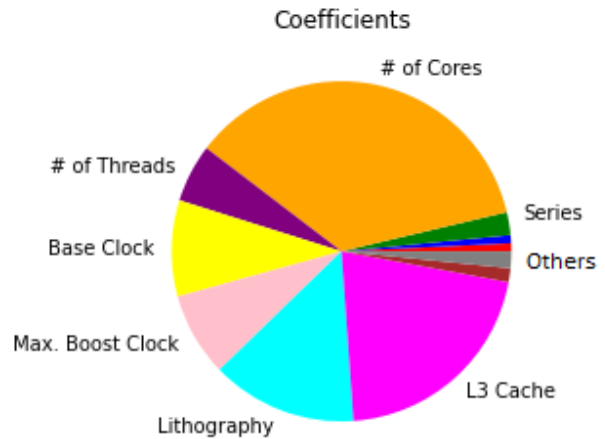


Figure 7. Coefficients Pie Chart of MLR.

Coefficient plots can be used to understand how each feature affects the outcome (Figure 7). In this pie chart, we can see the coefficients of 11 features that affect the target variable. According to the results, the most influential features are the number of cores and L3 cache, while the least influential ones are release date and platforms. Assuming that the features indicating the number of cores, CPU clock speed, L3 cache, and lithography of the CPU are also the most repeated and highlighted features in the introduction and advertisements of newly released CPUs, we can confirm that their impacts on the result are quite high as expected.

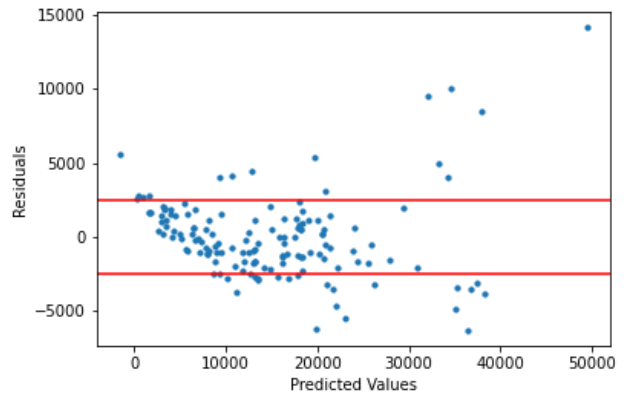


Figure 8. Residuals / Predictions Scatter Graph of MLR.

In Figure. 8, it is shown that the predicted values and their difference with actual values. Looking at the area between the +2500 and -2500 difference lines we drew, it can be understood that the absolute difference between most of the predicted values and the actual values is not more than 2500.

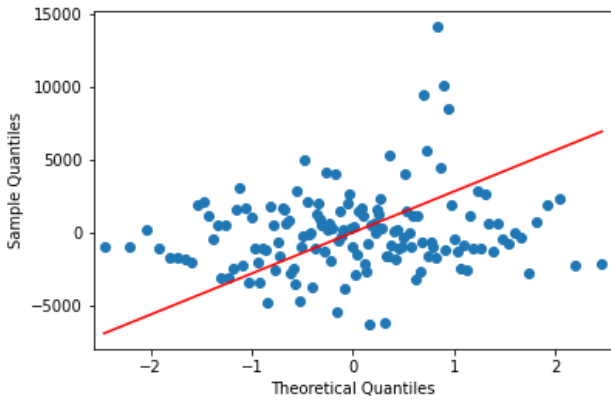


Figure 9. Q-Q Plot of MLR.

This Q-Q plot of MLR allows us to compare the status of our data's normal distribution with its theoretical quantity (Figure 9). The closer the data is to the center line, the closer the spread of the data is to a normal distribution.

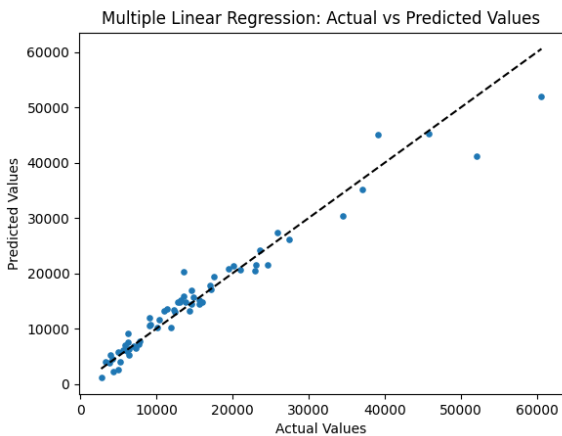


Figure 10. Scatter Plot of MLR.

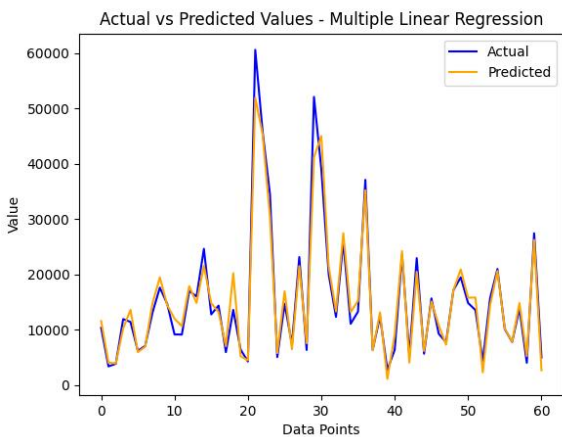


Figure 11. Actual vs Predicted Values of MLR.

Figure 10 and Figure 11 show that the model makes more mistakes in predicting CPU scores above 40000 on average. This may be due to the fact that these processors are relatively new, powerful, and rare, and there may not be enough data for them in the dataset for training.

Gradient Boosting Regression

GBR has the second-best results among all the five algorithms we compared. Results of each metric for GBR are shown below.

- MAE: 1608.57
- MSE: 5776080.55
- RMSE: 2403.34
- R²: 0.9588

The process of constructing a gradient boosting regression model involves tuning several hyperparameters, such as loss function, the number of boosting stages to perform (n-predictors), the maximum depth of each tree, and the learning rate of the optimization algorithm. In our case, we found 'squared-error', '143', '1', '0.1' values were the best fit for these parameters in order.

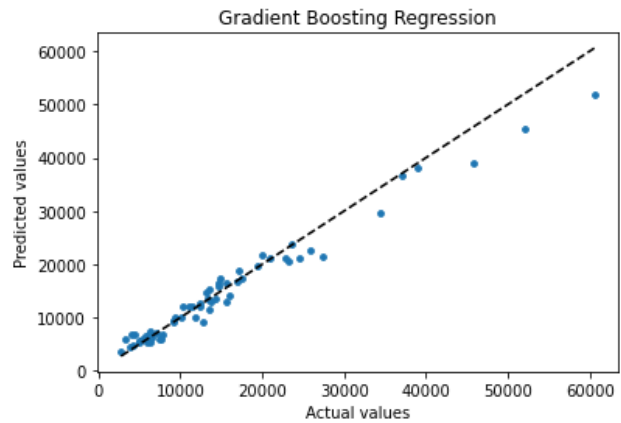


Figure 12. Scatter Plot of GBR.

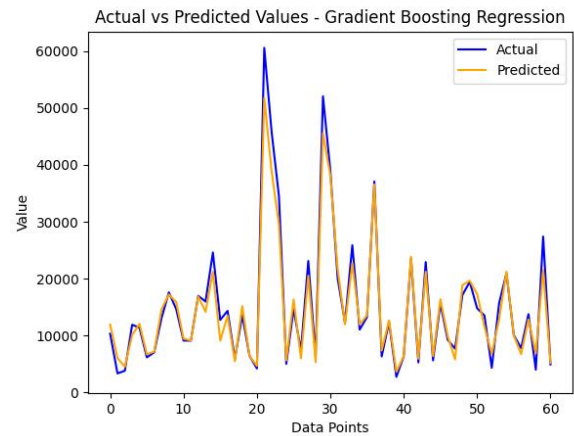


Figure 13. Actual vs Predicted Values of GBR.

Figure 12 and Figure 13 show the actual values of the target variable against the predicted values using GBR model for each data point. It is clear that this model's accurate prediction rate is higher than others we compared, which is also seen from metric results as well. We can see that the higher values of target variable show slightly under-predicted results, although not as much as the first three algorithms.

Neural Network Regression

NNR gives the absolute best results out of all the five algorithms that were discussed. Results of each metric for NNR are demonstrated below.

- MAE: 1245.61
- MSE: 3358348.46
- RMSE: 1832.57
- R²: 0.9765

As mentioned earlier, neural networks can be tuned by adjusting several hyperparameters, such as hidden layer sizes, solver class, and the learning rate of the optimization algorithm.

Using hyperparameter tuning, it was found that '(10,)', 'lbfgs', and 'constant' values were the best fit for these parameters in order.

We used the L-BFGS optimization algorithm for our NNR model, as it provided better results compared to the other well-known solver 'Adam'. We chose L-BFGS because our dataset was relatively small, and L-BFGS is known to work well with small datasets. L-BFGS is a gradient-based method that uses limited memory to approximate the inverse Hessian matrix and update the weights in each iteration. It is particularly effective in handling non-convex problems, which are common in NNR [41].

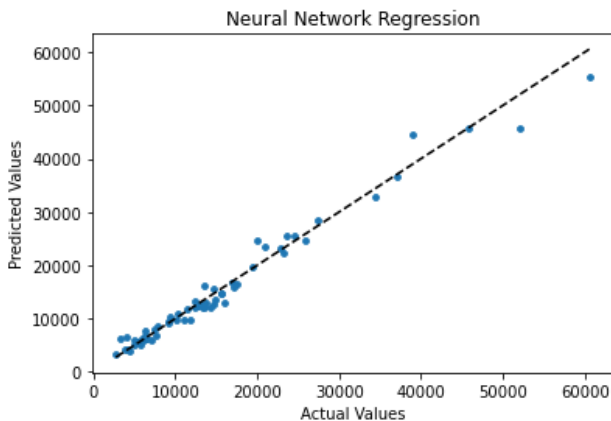


Figure 14. Scatter Plot of NNR.

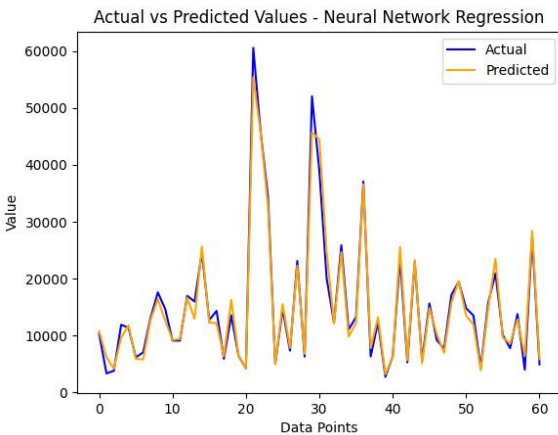


Figure 15. Actual vs Predicted Values of NNR.

NNR model gave the most accurate predictions, noticeably better than other algorithms. We know that the closer the points to the dashed line for Figure 14, and the more the lines overlap for Figure 15, the better the model's prediction performance. It is demonstrated that NNR has great accuracy on both lower values of CPU Score and higher values of CPU Score. Since dataset has more training data with lower values, the prior algorithms had a rough time to accurately predict, most of them ended up greatly under-predicting higher values, while NNR gave almost spot on predictions.

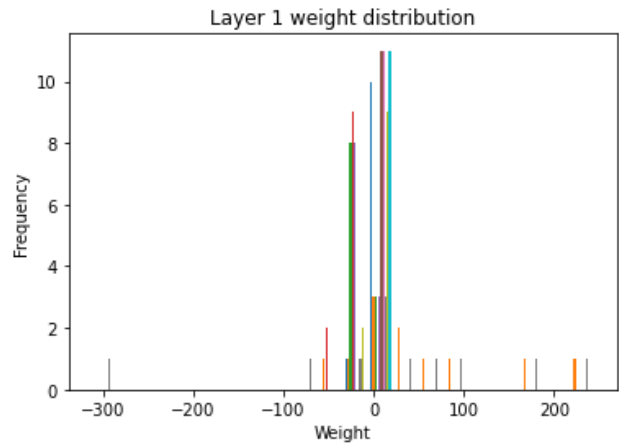


Figure 16. Histogram of Layer 1 Weight Distribution.

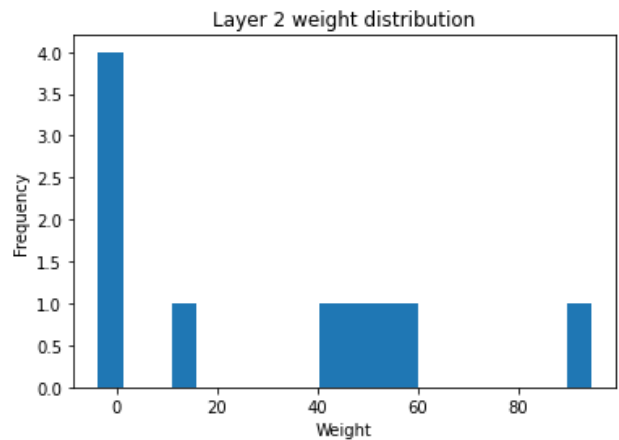


Figure 17. Histogram of Layer 2 Weight Distribution.

Figure 16 and Figure 17 are visual representations of the weights assigned to the nodes in a neural network model's layers. These graphs can be used to analyze how the weights change during training and to identify patterns or anomalies in the weight distribution.

The weights shown in Figure 16 and Figure 17 correspond to the connections between the input and hidden layers (layer 0 to layer 1) and the connections between the hidden and output layers (layer 1 to layer 2).

We can see on the layer 2 weight distribution Figure 17 that 4 out of 11 features have weights close to 0 on nodes, while 5 features have weight values of 40-60, and one feature has a weight value of more than 80. These results align well with what we have seen on coefficient charts, assigning

corresponding weight values to features that matter most like Number of Cores and Threads, L3 Cache, Clock Speeds, and features that matter least like Platform, Series, and T_{jmax} .

Comparison of these algorithms is shown in Table 2.

Table 2. Comparison of the results of the models used.

	SVR	RFR	MLR	GBR	NNR
	2268.2				
MAE	7	1828.75	1724.65	1608.57	1245.61
	188083	9210826.	6701067	5776080	3358348
MSE	94.80	03	.82	.55	.46
	4336.8				
RMSE	6	3034.93	2588.64	2403.34	1832.57
R ²	0.8658	0.9346	0.9522	0.9588	0.9765

Conclusion

In this study, we attempted to predict the performance scores of CPUs ranging from 2749 to 63599 using regression analysis with a dataset consisting of 11 features. We evaluated several regression algorithms, including SVR, RFR, MLR, GBR and NNR.

Our results showed that the NNR algorithm achieved the best performance on the dataset. NNR achieved a value of 0.97 according to the R-Squared value. This result indicates that the NNR algorithm was able to capture the underlying relationships in the dataset more accurately than the other algorithms we tested. However, other algorithms such as MLR, RFR, GBR, and SVR also yielded moderate to good performance results, with R-squared values ranging from 0.8658 to 0.9588. These findings suggest that different algorithms may be suitable for different datasets, and the selection of the appropriate algorithm can have a significant impact on the accuracy of the predictions.

In conclusion, our study demonstrates the potential of using machine learning algorithms to predict the performance scores of CPUs. The NNR algorithm showed the best performance in our study, but the results from other algorithms also suggest that a variety of approaches should be considered when applying regression analysis to similar datasets. Future research could investigate the performance of these algorithms on larger or more diverse datasets, as well as the potential for further optimization of the algorithms themselves.

Furthermore, predicting a processor's benchmark score based on its features can be useful for evaluating performance without running benchmarks, saving time and resources. It allows users to make informed decisions about CPU's capabilities for specific tasks, such as gaming or data processing, by comparing predicted performance across models. This approach is particularly valuable for system builders and buyers looking to optimize cost and performance before purchasing.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

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

Authors' Contributions

- Study conception and design: Kaya & Şen
- Acquisition of data: Kaya & Şen
- Analysis and interpretation of data: Kaya & Şen
- Drafting of manuscript: Kaya & Şen & Altay
- Critical revision: Kaya & Altay

References

- [1] J. Cao, J. Fu, M. Li, and J. Chen, "CPU load prediction for cloud environment based on a dynamic ensemble model," *Software, Practice & Experience/Software, Practice and Experience*, vol. 44, no. 7, pp. 793–804, Oct. 2013, doi: 10.1002/spe.2231.
- [2] G. Contreras and M. Martonosi, "Power prediction for intel XScale® processors using performance monitoring unit events," Jan. 2005, doi: <https://doi.org/10.1145/1077603.1077657>.
- [3] W. Wang, X. Huang, X. Qin, W. Zhang, J. Wei, and H. Zhong, "Application-Level CPU Consumption Estimation: Towards Performance Isolation of Multi-tenancy Web Applications," Jun. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/cloud.2012.81>.
- [4] C. Fooks, P. Pal, R. Datta, and A. Segev, "CPU Hardware Classification and Performance Prediction using Neural Networks and Statistical Learning," *International Journal of Artificial Intelligence & Applications*, vol. 11, no. 4, pp. 1–13, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.5121/ijai.2020.11401>.
- [5] "Unbiased hardware comparisons," *technical.city*. <https://technical.city/> (accessed Nov 25, 2022).
- [6] "PassMark - CPU Benchmarks - CPU Mega Page - Detailed List of Benchmarked CPUs," *www.cpubenchmark.net*. https://www.cpubenchmark.net/CPU_mega_page.html (accessed Nov 25, 2022)
- [7] "Intel® Processors for PC, Laptops, Servers, and AI," *Intel*. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/processors.html> (accessed Nov 25, 2022)
- [8] AMD Processors | AMD. <https://www.amd.com/en/processors/>. [Accessed: Nov 25, 2022]
- [9] L. Manikandan and R. Selvakumar, "A review on data mining concepts and tools", *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering*

- and Information Technology, p. 600-605, 2022. <https://doi.org/10.32628/cseit228683>
- [10] S. Garcia, J. Luengo, and F. Herrera, Data preprocessing in data mining. 2015. doi: 10.1007/978-3-319-10247-4
- [11] J. Han, J. Pei, and H. Tong, "Data mining: concepts and techniques," Morgan Kaufmann, 2022.
- [12] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, Sep. 1995, doi: <https://doi.org/10.1007/bf00994018>.
- [13] M. Awad and R. Khanna, "Support Vector Regression," *Efficient Learning Machines*, pp. 67–80, 2015, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9_4.
- [14] Kavitha S, Varuna S, and Ramya R, "A comparative analysis on linear regression and support vector regression," *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, Nov. 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/get.2016.7916627>.
- [15] A. Ali, R. Darvishzadeh, A. Skidmore, T. Gara, & M. Heurich, "Machine learning methods' performance in radiative transfer model inversion to retrieve plant traits from sentinel-2 data of a mixed mountain forest", *International Journal of Digital Earth*, vol. 14, no. 1, p. 106-120, 2020. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1794064>
- [16] L. Breiman, "Random Forests," *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001, doi: <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>.
- [17] E. Melišová, A. Vizina, M. Hanel, P. Pavlík, & P. Šuhájková, "Evaluation of evaporation from water reservoirs in local conditions at czech republic", *Hydrology*, vol. 8, no. 4, p. 153, 2021. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040153>
- [18] Yang, D., Li, S., Chong, Y., Li, M., Hu, W., Wang, B., ... & Liu, P. (2020). Applying random forest model algorithm to gfr estimation.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-22422/v1>
- [19] F. Hutter, Lars Kotthoff, and J. Vanschoren, *Automated machine learning : methods, systems, challenges*. Cham Springer, 2019.
- [20] P. Pandit, P. Dey, & K. Krishnamurthy, "Comparative assessment of multiple linear regression and fuzzy linear regression models", *SN Computer Science*, vol. 2, no. 2, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00473-3>
- [21] O. Altay, T. Gurgenc, M. Ulas, and C. Özel, "Prediction of wear loss quantities of ferro-alloy coating using different machine learning algorithms," *Friction*, vol. 8, no. 1, pp. 107–114, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0249-z>.
- [22] Thorson, J., Collier-Oxandale, A., & Hannigan, M. P. (2019). Using a low-cost sensor array and machine learning techniques to detect complex pollutant mixtures and identify likely sources. *Sensors*, 19(17), 3723. <https://doi.org/10.3390/s19173723>
- [23] D. A. Freedman, *Statistical Models: Theory and Practice*, -2nd ed. Cambridge University Press, 2009.
- [24] J. H. Friedman, "Stochastic gradient boosting," *Computational Statistics & Data Analysis*, vol. 38, no. 4, pp. 367–378, Feb. 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/s0167-9473\(01\)00065-2](https://doi.org/10.1016/s0167-9473(01)00065-2).
- [25] C. Bentéjac, A. Csörgő, and G. Martínez-Muñoz, "A comparative analysis of gradient boosting algorithms," *Artificial Intelligence Review*, vol. 54, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09896-5>.
- [26] Y. Veisani, H. Sayyadi, A. Sahebi, G. Moradi, F. Mohamadian, and A. Delpisheh, "Comparison of machine learning algorithms to predict intentional and unintentional poisoning risk factors," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e17337, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17337>.
- [27] W. S. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, no. 4, pp. 115–133, Dec. 1943, doi: <https://doi.org/10.1007/bf02478259>.
- [28] Z. Feng and W. Niu, "Hybrid artificial neural network and cooperation search algorithm for nonlinear river flow time series forecasting in humid and semi-humid regions," *Knowledge-Based Systems*, vol. 211, p. 106580, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.106580>.
- [29] A. Ameri, M. A. Akhaee, E. Scheme, and K. Englehart, "Regression convolutional neural network for improved simultaneous EMG control," *Journal of Neural Engineering*, vol. 16, no. 3, p. 036015, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab0e2e>.
- [30] V. W. Y. Tam, A. Butera, K. N. Le, L. C. F. D. Silva, and A. C. J. Evangelista, "A prediction model for compressive strength of CO2 concrete using regression analysis and artificial neural networks," *Construction and Building Materials*, vol. 324, p. 126689, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126689>.
- [31] H. Hristov and G. Momcheva, "Hyperparameter adjustment in regression neural networks for predicting support case durations," *AIP conference proceedings*, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0041936>.
- [32] L. N. Smith, "A disciplined approach to neural network hyper-parameters: Part 1 -- learning rate, batch size, momentum, and weight decay," *arXiv.org*, Apr. 24, 2018. <https://arxiv.org/abs/1803.09820v2> (accessed Nov. 17, 2023).
- [33] Gurgenc, E., Altay, O., and Altay, E. V. (2024). AOSMA-MLP: A Novel Method for Hybrid Metaheuristics Artificial Neural Networks and a New Approach for Prediction of Geothermal Reservoir

- Temperature. *Applied Sciences*, 14(8), 3534. doi: <https://doi.org/10.3390/app14083534>
- [34] Altay, O., and Gurgenc, T. (2024). GJO-MLP: A Novel Method for Hybrid Metaheuristics Multi-Layer Perceptron And A New Approach For Prediction Of Wear Loss Of Az91d Magnesium Alloy Worn At Dry, Oil, And H-Bn Nanoadditive Oil. *Surface Review and Letters (SRL)*, 31(06), 1-16. doi: <https://doi.org/10.1142/S0218625X24500483>
- [35] Altay, O., and Varol Altay, E. (2023). A novel hybrid multilayer perceptron neural network with improved grey wolf optimizer. *Neural Computing and Applications*, 35(1), 529-556. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07775-4>
- [36] Altay, E. V., Gurgenc, E., Altay, O., and Dikici, A. (2022). Hybrid artificial neural network based on a metaheuristic optimization algorithm for the prediction of reservoir temperature using hydrogeochemical data of different geothermal areas in Anatolia (Turkey). *Geothermics*, 104, 102476. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102476>
- [37] Gurgenc, T., and Altay, O. (2022). Surface roughness prediction of wire electric discharge machining (WEDM)-machined AZ91D magnesium alloy using multilayer perceptron, ensemble neural network, and evolving product-unit neural network. *Materials Testing*, 64(3), 350-362. doi: <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2034>
- [38] L. A. Shalabi, Z. Shaaban, and B. Kasasbeh, "Data Mining: A Preprocessing Engine," *Journal of Computer Science*, vol. 2, no. 9, pp. 735–739, Sep. 2006, doi: <https://doi.org/10.3844/jcssp.2006.735.739>.
- [39] C. Willmott and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance," *Climate Research*, vol. 30, no. 1, pp. 79–82, 2005, doi: <https://doi.org/10.3354/cr030079>.
- [40] D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation," *PeerJ Computer Science*, vol. 7, no. 5, p. e623, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.
- [41] Y. Shao, F. M. Dietrich, C. Nettelblad, and C. Zhang, "Training algorithm matters for the performance of neural network potential: A case study of Adam and the Kalman filter optimizers," *Journal of chemical physics online/The Journal of chemical physics/Journal of chemical physics*, vol. 155, no. 20, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0070931>.



Araştırma Makalesi / Research Article

Mum Çubuğu Grafik Gösterimi, Minimum Artıklık Maksimum İlgililik Algoritması ve XGBoost Modeline Dayalı Rüzgâr Hızı Tahmini

Wind Speed Forecasting Based on Candlestick Chart Representation, Minimum Redundancy Maximum Relevance Algorithm and XGBoost Model

Seçkin Karasu^{1*}¹ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, seckin.karasu@beun.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5277-5252>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Haziran 2024
Revizyon 21 Kasım 2024
Kabul 25 Aralık 2024
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

Rüzgâr Hızı Tahmini,
Mum Çubuğu Grafiği,
XGBoost,
MRMR,
Osilatörler

ÖZ

Günümüz elektrik şebekelerinde fosil enerji kaynaklarına bağımlılığı azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretim tesislerinin sayısı giderek artmaktadır. Rüzgâr türbinleri (RT) sayesinde rüzgâr enerjisi elektrik enerjisine çevrilmekte ve RT'lerin günlük elektrik ihtiyacını karşılama noktasında elektrik şebekesine entegrasyonu sağlanmaktadır. RT'nin yüksekliği, rüzgâr türbininin kanat yapısı, jeneratör çıkış gücü, mekanik ve elektrik dönüştürücü verimliliği gibi iç faktörler ile birlikte rüzgâr hızı ve yönü gibi dış faktörlere bağlı olarak RT'nin çıkış gücü etkilenmektedir. Rüzgâr hızını tahmin etmek rüzgâr çiftliği operatörlerinin elektrik üretimini optimize etmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede rüzgâr enerjisi elektrik şebekesine daha iyi entegre edilebilmektedir. Mevcut çalışmalar, kısa vadeli tahmin yaklaşımlarının doğruluk açısından yetersiz kaldığını ve rüzgâr hızının doğrusal olmayan ve stokastik doğasının tam anlamıyla modellenemediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, tekil modeller yerine hibrit modellerin kullanımı giderek yaygınlaşmakta ve daha yüksek tahmin performansı sağlamak amacıyla tercih edilmektedir. Bu çalışmada, rüzgâr hızını tahmin etmek için mum çubuğu gösterimi, özneliklerin Minimum Artıklık Maksimum Uygunluk (Minimum Redundancy Maximum Relevance-MRMR) yaklaşımı ile değerlendirildiği XGBoost modeline dayalı yeni bir yöntem önerilmektedir. RT'de bulunan Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) sisteminden 10 dakikalık örnekleme zamanı için 1 yıllık zaman dilimi içerisinde toplanan veri seti kullanılmaktadır. Veri seti öncelikle ön işleme adımından geçirilerek rüzgâr yönü, rüzgâr hızı dağılımı gibi değerler ile istatistiksel değerlere bakılmaktadır. Daha sonra zaman serisine mum çubuğu gösterimi işlem adımı uygulanmaktadır. Elde edilen gösterim için trend ve osilatör tabanlı öznelikler uygulanarak MRMR yaklaşımı ile öznelik grubu değerlendirilmiştir. XGBoost yöntemi ile rüzgâr hızı tahmin modeli oluşturulmakta ve model karmaşıklığının az ve tahmin hatasının en düşük olduğu durum elde edilmektedir. Özellikle mum çubuğu grafik gösterimine dayalı olarak önerilen bu hibrit yaklaşım, kısa vadeli rüzgâr hızı tahmininde doğruluğu artırmayı ve geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşmayı hedeflemektedir. Önerilen yöntem, tüm diğer modellere göre en düşük hata oranı (RMSE: 0.0644) ve en yüksek korelasyon katsayısı (R: 0.8601) ile en iyi performansı göstermektedir. Bu, modelin doğruluk ve hata oranları açısından üstün olduğunu göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 June 2024
Received in revised form 21 November 2024
Accepted 25 December 2024
Available online 26 March 2025

Keywords:

Wind Speed Forecasting,
Candlestick Chart,
XGBoost,
MRMR,
Oscillators

Doi: 10.24012/dumf.1496080

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In today's electricity networks, the number of electricity generation facilities based on renewable energy sources is increasing in order to reduce the dependence on fossil energy sources. Thanks to the Wind Turbine (WT), the wind energy is converted into electrical energy and the integration of WT into the electricity network is ensured at the point of meeting the daily electricity needs. WT output power is affected by external factors such as wind speed and direction, as well as internal factors such as WT's height, blade structure, generator output power, mechanical and electrical converter efficiencies. Forecasting wind speed allows wind farm operators to optimize electricity production. In this way, wind energy can be better integrated into the electricity network. Existing studies reveal that short-term forecasting approaches are inadequate in terms of accuracy and the nonlinear and stochastic nature of wind speed cannot be fully modeled. For this reason, the use of hybrid models, rather than standalone models, is becoming increasingly prevalent as they offer superior predictive performance. In this study, a novel approach based on candlestick representation, features evaluated with Minimum Redundancy Maximum Relevance (MRMR) approach and XGBoost model proposed for wind speed prediction. The dataset collected from the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system in WT for a sampling time of 10 minutes within a 1-year period is used. The data set is first passed through the preprocessing step and the wind direction, wind speed distribution and statistical values are examined. Then, the candlestick representation process step is applied to the time series. Afterwards, candlestick representation is utilized to derive trend and oscillator-based features, the feature group is evaluated with the MRMR approach. A wind speed prediction model is created with the XGBoost method and a situation with low model complexity and lowest prediction error is achieved. This proposed hybrid approach, especially based on candlestick chart representation, aims to increase the accuracy in short-term wind speed forecasting and overcome the limitations of traditional methods. The proposed method shows the best performance with the lowest error rate (RMSE: 0.0644) and the highest correlation coefficient (R: 0.8601) compared to all other models. This shows that the model is superior in terms of both accuracy and error rate.

Giriş

Temiz ve yeşil enerji olarak tanımlanan rüzgâr enerjisi, birçok ülke tarafından diğer enerji türlerine göre daha çok tercih edilmeye başlamıştır [1]. Son zamanlarda özellikle fosil kaynaklara bağımlı enerji üretim santrallerinin yerini yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretim santralleri almaktadır [2]. Rüzgâr enerjisine dayalı santrallerin düşük maliyetli, verimli ve ileri teknoloji ürünü olması yatırımcılar için de tercih edilme sebepleri arasında sıralanmaktadır [2-3]. Rüzgâr santrali kurulumu yüksek başlangıç sermayesi gerektirse de özellikle Avrupa ve Amerika'da rüzgâr türbini maliyetleri giderek azalmaktadır. [4]. Tüm bu avantajlar göz önünde bulundurularak kuvvetli rüzgârların olduğu alanlarda rüzgâr çiftlikleri kurulumu giderek yaygınlaşmaktadır [5].

Rüzgâr hızının doğru tahmini, rüzgâr santrallerinin istikrarlı çalışması için kritik bir öneme sahiptir [6]. Doğru tahmin işlemi rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretimini optimize etmeyi ve kaynakları en etkin şekilde kullanmayı sağlamaktadır [6-8]. Böylelikle rüzgâr enerjisine bağlı elektrik üretim santrallerinin elektrik şebekesine entegre edilmesi için bu işlem daha iyi olanak sunmaktadır. Tahmin işlemi doğru bir şekilde yapılarak rüzgâr santrali operatörlerinin elektrik şebekesindeki talep dalgalanmalarını planlamasına katkı sağlamaktadır. Genel olarak incelendiğinde, rüzgâr hızının doğru tahmini ile rüzgâr enerjisinin bir elektrik kaynağı olarak etkin ve verimli kullanmak mümkün olmaktadır. Bunun yanında rüzgâr hızının tahmini ile türbinlerin ne zaman yüksek stres altında olacağını belirlenmesi sağlanarak durum tabanlı bakım yapılabilmektedir [9]. Aşırı rüzgâr hızlarının türbinlere zarar verme riski de tahminlerle önceden tespit edilerek, arıza önleme stratejileri geliştirilebilmektedir. Böylece bakım ve onarım gibi işlerinde planlanmasına yardımcı olmaktadır [2], [9]. Rüzgâr çiftliği operatörlerinin operasyonlarını yönetmelerine yardımcı olmanın yanı sıra, rüzgâr gücünün doğru tahmin edilmesi ile şebekedeki arz ve talebi dengelemek için kamu hizmetleri ve diğer elektrik şebekesi operatörleri tarafından da tahmin bilgisi kullanılabilir [4],[10]. Şebeke operatörleri, herhangi bir zamanda bir rüzgâr çiftliğinin ne kadar elektrik üreteceğini tahmin ederek, talebi karşılamak için diğer elektrik üretim kaynaklarının nasıl dağıtılacağı konusunda daha bilinçli kararlar alabilmektedir [4],[10].

Literatür incelendiğinde farklı yaklaşımlar kullanılarak rüzgâr hızının tahmini çalışmasının yapıldığı görülmektedir. Rüzgâr çiftliklerinin planlanması ve uygulanabilirliğini artırmak için rüzgâr hızını daha doğru tahmin etmek üzerine yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Beş yıl boyunca bir dağlık bölgedeki rüzgârlı bir şehirden elde edilen veriler kullanılarak, çekirdek Ridge Regresyon (Ridge Regression-RR) modeli önerilmiş ve geleneksel Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines-SVM) ve Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks-ANN) gibi diğer tahmin modelleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada RR yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuç verdiği gösterilmektedir [11]. Bir başka çalışmada yeni bir rüzgâr hızı tahmini yöntemi olan Ampirik Dalga Dönüşümü (Empirical Wavelet Transform-EWT) kullanılarak orijinal rüzgâr hızı sinyali birden çok İçsel Mod Fonksiyonu (Intrinsic

Mode Function-IMF)'na ayrılmıştır. Ardından, her bir modelin üstünlüğüne dayanarak, Otoregresif Entegre Hareketli Ortalamalar (Autoregressive Integrated Moving Average-ARIMA) istatistiksel modeli ile En Küçük Kareler Destek Vektör Makinesi (Least Squares Support Vector Machine-LSSVM) ve Gauss Süreç Regresyonu (Gaussian Process Regression-GPR) gibi yapay zekâ modelleri de dahil olmak üzere çeşitli tahmin modelleri kullanılarak IMF'nin sırayla düşük frekanslıdan yüksek frekanslıya kadar tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Yapay zekâ tahmin modellerinin LSSVM ve GPR hiper parametrelerini optimize etmek için Diferansiyel Evrim (Differential Evolution-DE) ve Gri Kurt Optimizasyon (Grey Wolf Optimizer-GWO) yöntemlerinin birleşiminden oluşan DE-GWO algoritması kullanılmıştır. Önerilen yöntemin ölçüm verileriyle doğrulanarak hem doğruluk hem de kararlılık açısından üstün performans sergilediği gösterilmiştir [12]. Bir diğer çalışmada rüzgâr hızının zamana bağlı değişkenliğinin ve öngörülemezliğinin tahmin sonuçlarındaki olumsuz etkilerini gidermek için çoklu türbinler arasındaki mekânsal ve zamansal korelasyonların geliştirilmesi hedeflenerek, dijital ikiz ve nesnelerin interneti teknolojilerinin de kullanılması önerilmektedir. İlişkili türbinler için dinamik tarama ve tahmin sonuçlarının senkronize doğrulamasını içeren bir mimari önerilmekte ve çoklu türbinler korelasyon modeli, gerçek zamanlı rüzgâr hızı tahmini görevini formüle etmektedir. Çalışmanın sonuçları, tahmin modelinin doğruluğunu ve sağlamlığını artırdığını göstermektedir [13]. Bir başka çalışmada ise SCADA sisteminde rüzgâr hızını ve elektrik üretimini tahmin etmek için makine öğrenmesi tabanlı altı farklı tahmin modeli kullanılmıştır [14]. Ayrıca, makine öğrenmesi algoritmalarının sonuçları 4, 5 ve 10 kat çapraz doğrulama yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Üç aylık üretim gücünü tahmin etmede birlikte çalışma yönteminin 10 kat çapraz doğrulama ile en düşük RMSE değeri verdiği ve rüzgâr hızını tahmin etmede ise yine en düşük RMSE değeri ile elde edildiği belirtilmiştir [14]. Rüzgâr hızını tahmin etmek için gürültü (noise) işleme yöntemleri, istatistiksel teknikler, derin öğrenme çerçeveleri ve optimizasyon algoritmalarını içeren birlikte çalışma tahmin modeli sunulmuştur [15]. Önerilen birleşik model, gerçek dünya koşullarından elde edilen 10 dakikalık rüzgâr hızı verileriyle test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen modelin 10 dakikalık tahmin sonuçlarında diğer modellere kıyasla %17'lik bir iyileşme sağladığı ortaya çıkartılmıştır [15]. Bir başka çalışmada bulanık bilgi granülasyon teknolojisi kullanılarak veri boyutu azaltılmış ve rüzgâr hızı verilerindeki fazlalık giderilmiştir [16]. Ayrıca, çok amaçlı yusufçuk algoritması ile alt modeller birleştirilmiş ve doğruluk artırılmıştır. Penglai rüzgâr çiftliğinde yapılan testler sonucunda, önerilen sistemin diğer modellere kıyasla en iyi tahmin performansı gösterdiği ve ortalama iyileştirme oranının çoklu adım tahmin aşaması için üç sitede %14.97, %16.48 ve %19.11 olduğu bulunmuştur [16]. Bir diğer çalışmada adaptif arama stratejisine sahip Geliştirilmiş Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (Search Strategy Grey Wolf Optimizer-SAGWO) ve Uzun-Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory-LSTM) kombinasyonuna dayanan yeni bir yöntem önerilmiştir. İlk olarak, rüzgâr hızı verileri analiz edilerek yüksek benzerlik gösteren rüzgâr türbinleri seçilmiştir. Daha sonra, bu türbinlerin rüzgâr hızı verileri giriş olarak alınmış ve LSTM, SAGWO ile optimize edilerek

tahmin doğruluğu artırılmıştır. Son olarak, gürültü eklenmiş rüzgâr hızı verilerinin yeniden inşası için SAGWO-LSTM modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin rüzgâr hızı tahmini konusunda referans modellere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur [17]. Bir başka çalışmada rüzgâr çiftliklerinde ultra-kısa süreli rüzgâr hızı tahminlerinin doğruluğunu artırmak için EWT ve birleştirilmiş model tabanlı bir yöntem önerilmektedir. İlk olarak, ampirik dalgacık dönüşümü kullanılarak ultra-kısa vadeli rüzgâr hızı zaman serileri bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Daha sonra, örnek entropi ile bu bileşenlerin karmaşıklıkları hesaplanarak benzer seviyede karmaşıklığa sahip olanlar yeniden oluşturmuştur. Yeniden oluşturulan bileşenlerin analizi sonrası, Gelişmiş Serçe Arama Algoritması (Improved Sparrow Search Algorithm-ISSA) ile optimize edilmiş Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine-ELM) ve Kapılı Tekrarlayan Sinir Ağı (Gated Recurrent Neural Network-GRNN) tahmin modelleri kullanılmıştır. Son olarak her tahmin modelinin ağırlık katsayılarını optimize etmek için ISSA kullanılarak tahmin sonuçları elde edilmiştir. Deneysel doğrulamalar, önerilen yöntemin önceki tekli ve birleşik tahmin yöntemlerine göre daha yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir [18]. Bir diğer çalışmada kentsel alanlardaki rüzgâr hızlarını tahmin etmek için bina yüksekliği, bina hacim oranı ve yüzey alanı oranı gibi kentsel morfolojik parametreler ile rüzgâr hızı arasındaki ilişki çoklu regresyon analizi ile incelenerek bir tahmin yaklaşımı önerilmiştir. Üç farklı yerleşim alanı için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) ve Yerel Veri Asimilasyonu ve Tahmin Sistemi (Local Data Assimilation and Prediction System-LDAPS) yöntemleri ile kıyaslanmıştır. Önerilen yöntemin korelasyon katsayısı ortalama 0,805'lik benzerlik gösterdiği ortaya çıkartılmıştır [19]. Meteorolojik verilerin kullanıldığı ve Bayesyen Optimizasyon Algoritması (Bayesian Optimization Algorithm-BOA), Varyasyonel Mod Ayrıştırma (Variational Mode Decomposition-VMD), Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis-PCA) ve Rastgele Orman (Random Forest-RF) yaklaşımlarının harmanlandığı bir yöntemde ise rüzgâr hızının tahmini çalışmasında model hata değerlerinden RMSE değeri 0,3736 ve R değeri 0,8200 olarak elde edilmiştir [20]. Meteorolojik verilerin kullanıldığı bir diğer çalışmada ise ANN yaklaşımı ve Bayesyen Düzenleme (Bayesian Regularization-BR) yaklaşımının küresel yatay ışınım ve rüzgâr hızı tahminlerinde etkili bir yöntem olduğunu ve elde edilen model hata değerlerinin sırasıyla MSE değeri için 0.3023, RMSE değeri için 0.5498 ve korelasyon katsayısı değeri için ise 0.8353 olarak bulunduğu belirtilmiştir [21].

Rüzgâr hızı tahmin modelini oluşturmak için genel olarak belirli örnekleme hızında toplanan veriler model girişinde kullanılmaktadır. Bunun yanında mum çubuğu grafikleri, geleneksel bir grafikte hemen görünmeyebilecek kalıpları ve eğilimleri belirlemek için kullanılmaktadır. Bu gösterim finansal piyasaları analiz etmek için tüccarlar ve yatırımcılar arasında popüler bir araçtır. Ancak farklı alanlardaki çalışmalarda da bir araç olarak kullanıldığı görülmektedir [22-24]. Mikroblog faaliyetlerine dayalı olarak ergenlerdeki stres eğilimlerini tahmin etmek için mum çubuğu grafiklerinin kullanılması önerilmektedir. Çalışmada

ergenlerin mikroblog gönderilerinde ifade edilen düşünce ve duyguları analiz edilerek, stres seviyelerindeki eğilimleri belirlemek için mum çubuğu grafikleri kullanmanın mümkün olabileceği gösterilmektedir. Çalışmada test aşamasında, bir grup ergenden mikroblog verileri toplanmakta ve gönderilerden duygu durumu ile ilgili bilgi çıkartmak için doğal dil işleme teknikleri kullanılmaktadır. Daha sonra bu bilgilere dayalı olarak mum çubuğu grafikleri oluşturulmaktadır. Elde edilen veriler ile bildirilen stres seviyeleri birbiri ile karşılaştırılmaktadır. Genel olarak, mum çubuğu grafiklerinin popülasyondaki stres eğilimlerini tahmin etmek ve izlemek için yararlı bir araç olabileceği gösterilmektedir [22]. Bir diğer çalışmada mum çubuğu gösterimi kullanılarak PM2.5 (ince parçacıklı madde) seviyelerinin eğilimini tahmin etmek için bir yöntem sunulmaktadır. PM2.5 seviyelerinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi halk sağlığı ve çevre yönetimi için önemli olduğu bildirilmektedir. PM2.5 verilerinden ayırt edici özellikleri çıkarmak için finansal piyasalardaki fiyat hareketlerinin grafiksel temsilleri olan mum çubuğu grafiklerinin kullanılması önerilmektedir. Ardından, çıkartılan özellikleri sınıflandırmak ve PM2.5 seviyelerinin eğilimini tahmin etmek için Görsel Geometri Grubu (Visual Geometry Group-VGG) modeli kullanılmaktadır. Mum çubuğu gösterimi içeren yöntemin eğilim tahmininde etkili olduğu gösterilmektedir [23]. Amerikan futbolu oyunlarının sonuçlarını tahmin etmek için mum çubuğu gösterimi ile makine öğrenimi tekniklerinin harmanlandığı bir çalışma önerilmektedir. Çalışmada takımlar, oyun yeri ve oyun sonucu hakkında bilgiler dâhil olmak üzere toplam 652 Amerikan futbolu maçından elde edilen veriler kullanılmaktadır. Mum çubuğu gösteriminin katkısı ile oluşturulan modelin oyunların sonucunu yaklaşık %70 doğrulukla doğru bir şekilde tahmin edebildiği gösterilmektedir [24]. Bir diğer çalışmada finansal analiz tekniklerinden trend çizgileri ile Japon mum çubuklarının rüzgâr hızı tahmininde uygulanabilirliği incelenmiştir. İtalya'daki Capo Mele ve İspanya'daki Los Montes del Cierzo lokasyonlarından 2016 ve 2017 yıllarına ait rüzgâr hızı verileri analiz edilmiştir. Los Montes del Cierzo'daki veriler 10 dakikalık çözünürlükte ve 2 m ile 10 m yüksekliklerde, Capo Mele'deki veriler ise saatlik çözünürlükte toplanmıştır. Çalışmada, destek ve direnç çizgileri kullanılarak rüzgâr hızındaki ani artış ve azalışların tahmini yapılmıştır. Japon mum çubuklarıyla trend dönüş noktaları ve dalgalanma örüntüleri analiz edilmiştir. Destek ve direnç çizgileri, rüzgâr hızındaki dönüş noktalarını belirlemede etkili bulunmuş ve Japon mum çubuklarının desenleri ile birleştirildiğinde daha hassas tahminler elde edilmiştir. Özellikle uzun beyaz gövdeli mum çubukları artış eğilimini, siyah gövdeli mum çubukları ise azalış eğilimini temsil etmiştir. Çalışmada bu tekniklerin makine öğrenimi tabanlı modellerle entegre edilmesi durumunda rüzgâr hızı tahminlerinin doğruluğunu artırdığını gösterilmiştir [25]. Bu doğrultuda mum çubuğu gösteriminin, farklı alanlarda kullanımı düşünüldüğünde, rüzgâr hızı tahmininde de güçlü ve görsel olarak zengin bir yaklaşım sunabileceği ve makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin çalışması yapılarak tahmin doğruluğunun artırılacağı öngörülmüştür.

Bu çalışmada, rüzgâr hızının tahmini için yenilikçi bir hibrit yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde, zaman serisi

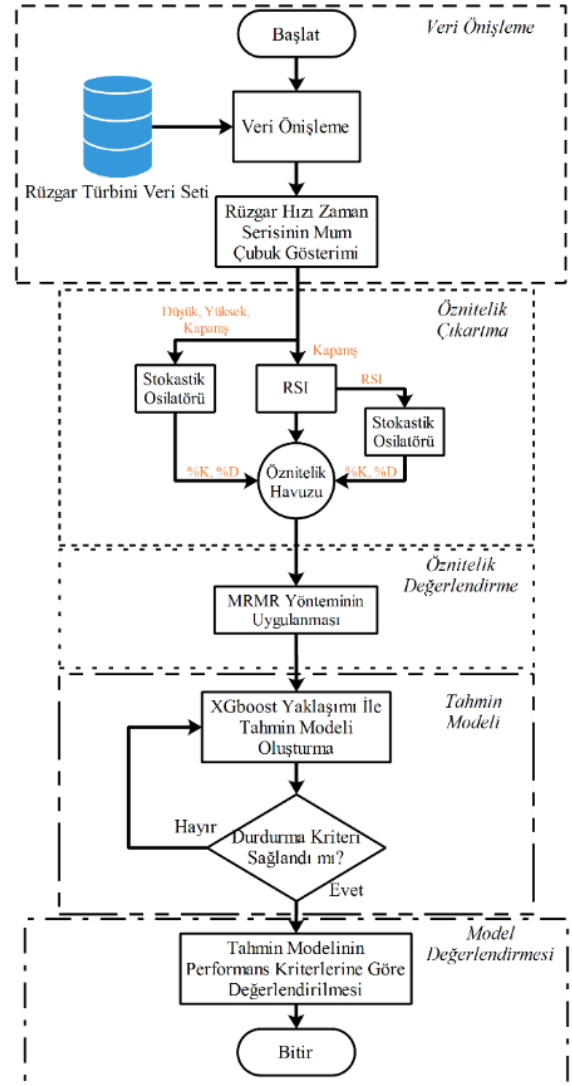
verileri üzerinde mum çubuğu gösterimi kullanılarak trend ve osilatör tabanlı göstergeler elde edilmiş ve bu öznitelikler Minimum Artıklık Maksimum Uygunluk (Minimum Redundancy Maximum Relevance-MRMR) yaklaşımı ile değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, öznitelik seçimini optimize ederek gereksiz verileri ortadan kaldırmakta ve rüzgâr hızı tahmini gibi doğrusal olmayan ve stokastik doğaya sahip karmaşık problemlerin çözümünde etkili olduğu kanıtlanan XGBoost modeli ile entegre edilmektedir. Literatürde, tek bir modelin rüzgâr hızının doğrusal olmayan ve dinamik doğasını tam anlamıyla yakalayamadığı belirtilmiştir; bu nedenle hibrit modellerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [8, 12]. Çalışmada, mum çubuğu gösteriminin görsel ve trend analizi avantajları ile MRMR ve XGBoost'un güçlü tahmin kapasitesinin birleştirilmesi, yöntemin tercih edilmesinin temel sebebidir. Önerilen hibrit yaklaşım, literatürde yaygın kullanılan yöntemlerin ötesine geçerek daha yüksek doğruluk ve düşük model karmaşıklığı sunmayı hedeflemektedir. Çalışmada rüzgâr türbinindeki Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) sistemi kullanılarak, 10 dakikalık örnekleme zamanı için 1 yıllık bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti, öncelikle ön işleme adımından geçirilmekte ve ardından, zaman serisine mum çubuğu gösterimi işlemi uygulanmıştır. Bu süreçte, elde edilen veriye trend ve osilatör tabanlı göstergeler uygulanarak öznitelik grubu elde edilmiştir. MRMR yaklaşımı ile öznitelikler kendi arasında değerlendirilerek 91 adet öznitelikten en yüksek skorlu 10 adet öznitelik belirlenmiştir. Geleneksel yöntemlerden Karar Ağaçları (Decision Trees-DT) modeli ile XGBoost modelinin performansları kıyaslanmış ve rüzgâr hızı tahmin modeli oluşturulmuştur. Sonuç olarak modelin karmaşıklığını azaltmak ve daha düşük tahmin hatası verecek bir model MRMR yaklaşımı ve XGBoost modeli ile elde edilmiştir. Oluşturulan model, farklı istatistiksel hata kriterleriyle değerlendirilmekte ve sonuç olarak rüzgâr hızı tahmininde yüksek performans sergilediği ortaya çıkarılmıştır. İkinci bölümde uygulanan metamateryal ve metotlar, üçüncü bölümde araştırma sonuçları ve tartışma, dördüncü bölümde ise sonuç detaylı olarak anlatılmıştır.

Materyal ve Metot

Çalışmada rüzgâr hızı tahmini için uygulanan adımlar Şekil 1'deki akış diyagramı ile verilmektedir. İşlem adımları veri ön işleme, öznitelik çıkartma, öznitelik değerlendirme, tahmin modeli oluşturma ve oluşturulan modelin değerlendirilmesi olmak üzere beş aşamadan oluştuğu söylenebilir. İlk aşamada veri, ön işleme adımına tabi tutulmaktadır. Daha sonra rüzgâr türbini zaman serisinin mum çubuk gösterimi yapılmaktadır. İkinci aşamada ise ayırt edici göstergeler işlenmiş zaman serilerine uygulanarak öznitelik çıkartma işlemi tamamlanmaktadır. Çıkarılan öznitelikler MRMR yaklaşımı ile değerlendirilmekte ve yüksek skorlananlar kullanılarak XGBoost yaklaşımı ile tahmin modeli oluşturulmaktadır. Model değerlendirme aşaması ile elde edilen modelin istatistiksel hata kriterlerine göre başarımı ölçülmektedir. MRMR yaklaşımı kullanılmadığı duruma göre tüm özniteliklerin başarıma olan etkisi de incelenmiştir. Ayrıca geleneksel makine öğrenmesi yaklaşımı olan DT ile XGBoost yaklaşımının performansı da kıyaslanmıştır. Devam eden kısımlarda bu bileşenler daha detaylı olarak açıklanmaktadır.

Rüzgâr Türbini Veri Seti

Çalışmada, konum bilgisi Şekil 2'deki gibi verilen Yalova ilinde bulunan rüzgâr türbininden 2018 yılı boyunca toplanan veri seti kullanılmıştır [26]. Veri toplamak için SCADA sistemi kullanılmıştır. SCADA sistemi, rüzgâr türbinlerinden veri toplamak, izlemek ve kontrol etmek için kullanılan kapsamlı bir otomasyon sistemidir. Rüzgâr türbinlerine entegre edilen sensörler, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, rotor dönüş hızı, jeneratör çıkış gücü gibi parametreleri gerçek zamanlı olarak ölçmektedir. Bu ham veriler, türbinlere bağlı programlanabilir mantık denetleyicileri (PLC) veya uzaktan terminal birimleri (RTU) tarafından toplanmakta ve dijitalleştirilerek SCADA sistemine iletilmektedir. Veriler, belirli aralıklarla örneklenmekte ve kaydedilmektedir [5,14, 26]. Elde edilen veri seti, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, teorik aktif güç ve gerçek aktif güç gibi temel giriş değişkenlerini içermektedir. Veriler, 10 dakikalık zaman aralıklarında toplanmış olup, toplam süre 1 Ocak 2018'den 31 Aralık 2018'e kadar uzanmaktadır. Bu süre boyunca toplanan veriler, rüzgâr türbinlerinin performansını incelemek, verimliliklerini ölçmek ve gelecekteki enerji üretimini tahmin etmek için değerli bir kaynak sunmaktadır.



Şekil 1. Çalışmada uygulanan yöntemin akış diyagramı

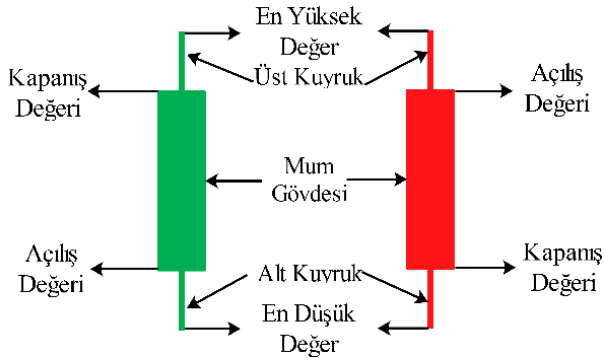


Şekil 2. Yalova ilinde bulunan rüzgâr türbininin konum gösterimi

Rüzgâr türbininin özelliklerinden bahsedilecek olursa Sinovel'in SL1500/90 modeli, 1,5 MW etiket gücüne sahip olup, 100 metre yüksekliğinde bir göbek ile donatılmıştır. Rotor yarıçapı 90 metre olan bu türbinin taranan alanı 6362 metrekare olup, üç kanata sahiptir. Türbinin devreye girmesi için gereken rüzgâr hızı 3 m/s iken, etiket rüzgâr hızı 10 m/s ve devreden çıkma rüzgâr hızı 22 m/s olarak belirlenmiştir. Bu karakteristikler, türbinin performansını etkileyen temel faktörlerdir.

Rüzgâr Hızı Zaman Serisinin Mum Çubuğu Grafik Gösterimi

Mum çubuğu grafiği, bir menkul kıymetin, türevin veya para biriminin belirli bir süre için en yüksek, en düşük, açılış ve kapanış fiyatlarının gösterildiği grafik türüdür. Fiyat hareketlerini ve zaman içindeki eğilimleri görselleştirmek için genellikle teknik analizde kullanılmaktadır. Şekil 3'te mum çubuğu gösterimi verilmektedir.



Şekil 3. Mum çubuğu gösterimi

Kapanış fiyatı açılış fiyatından yüksekse, şamdan tipik olarak beyaz veya yeşil renkte gösterilmektedir. Kapanış fiyatı açılış fiyatından düşükse, şamdan tipik olarak siyah veya kırmızı olarak gösterilmektedir. Şamdan gövdesi,

açılış ve kapanış fiyatları arasındaki aralığı temsil ederken, fitil veya kuyruk, dönemin en yüksek ve en düşük fiyatlarını temsil etmektedir [27].

Bir mum çubuğu grafiğindeki her bir mum tipik olarak tek bir günlük veri değerini temsil edebildiği gibi farklı zaman dilimleri içinde mum çubuğu grafiği oluşturmak mümkündür. Çalışmada 10 dakikalık aralıklarla toplanan veriler kullanılacağı için 10 dakikalık veriler 1 saatlik verilere çevrilmektedir.

Mum Çubuğu Gösterimine Uygulanan Göstergeler

Basit hareketli ortalama filtresi ve eksponansiyel hareketli ortalama filtresi olmak üzere çeşitli trend göstergeleri ile göreceli güç endeksi ve stokastik osilatörü gibi osilatör tabanlı göstergeler bu kısımda çıkartılan öznelikler olarak bahsedilecektir.

Basit Hareketli Ortalama Filtresi

Bu filtre belirli bir zaman diliminde mum çubuğu gösterimindeki kapanış değerlerinin toplamının toplam gün sayısına bölünerek hesaplanmaktadır [28]. N zaman dilimi için ortalama kapanış değeri hesabı Denklem 1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$BHO_N = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N}{N} \quad (1)$$

Eksponansiyel Hareketli Ortalama Filtresi

Eksponansiyel hareketli ortalama filtresi, temel olarak basit hareketli ortalama filtresinin bir türevi olarak ifade edilebilir [29]. Basit hareketli ortalamaya göre hesaplanmasında son fiyat değerinin ağırlığı yüksek olmaktadır. Denklem (2)'deki gibi N periyodu için hesaplanmaktadır.

$$EHO_N = \alpha \times C_N + (1 - \alpha) \times C_2 + EHO_{N-1} \quad (2)$$

Burada son değerin hesaplanabilmesi için önceki değerin bilinmesi gerekmektedir. Önceki değerin hesabı için algoritma ilk kez çalıştırıldığında BHO değeri hesaplanarak kullanılmaktadır.

Stokastik Osilatörü

Stokastik indikatörü 1950'lerde George Lane tarafından geliştirilen bir momentum indikatörüdür [30]. Stokastik indikatörü belirli bir periyod içerisinde yüksek ve düşük değerlerin mevcut fiyata olan yakınlığını göstermektedir. Stokastik indikatörü ile oluşan fiyatların yükselmeye veya düşmeye başladığı trendlerin başlangıçları daha kolay tespit edilebilmektedir. Trend dönüşlerinin yanı sıra aşırı alım veya aşırı satım seviyelerinin de tespit edilmesinde bu indikatör kullanılmaktadır. Denklem (3)'teki gibi Stokastik değeri hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{(Kapanış - Min(Kapanış))}{(Max(Kapanış) - Min(Kapanış))} \quad (3)$$

Bu ifadenin 100 ile çarpılmış hali %K değeri olarak isimlendirilmektedir. Bu değerin 3 günlük ortalaması alınarak hesaplanması durumunda ise %D çizgisi elde edilmektedir.

Göreceli Güç Endeksi İndikatörü

Göreceli Güç Endeksi (Relative Strength Index-RSI) bir finansal varlığın aşırı alım veya aşırı satım durumlarını belirlemek için kullanılan bir teknik göstergedir [31]. RSI, genellikle bir varlığın fiyat hareketlerinin hızını ve büyüklüğünü ölçmek için kullanılmaktadır RSI değeri Denklem (4)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$RSI = 100 - \frac{100}{1 + RS} \quad (4)$$

Burada RS, bir varlığın belirli bir dönemde yukarı yönlü hareketlerinin (örneğin kapanış değerinin önceki kapanış değerine göre artış) ortalamasının, aşağı yönlü hareketlerinin (kapanış değerinin önceki kapanış değerine göre azalma) ortalamasına oranı olarak Denklem (5)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$RS = \frac{\text{Pozitif Kapanışların Ortalaması}}{\text{Negatif Kapanışların Ortalaması}} \quad (5)$$

Stokastik RSI

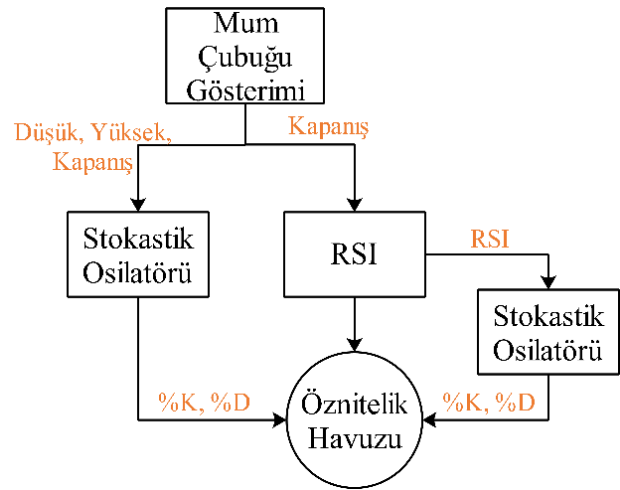
Stokastik RSI kavramından ilk defa, Stanley Kroll ve Tushar Chande tarafından ortaya çıkarılmıştır [32]. Stokastik RSI, bir enstrümanın fiyatını değil, doğrudan RSI değerini temel alarak o enstrümanın aşırı alım veya aşırı satım noktasında olup olmadığını anlamaya yarayan bir teknik analiz göstergesidir. Denklem 6'daki gibi ifade edilmektedir.

$$RSI = \frac{(RSI - Min(RSI))}{(Max(RSI) - Min(RSI))} \quad (6)$$

Finansal piyasalardaki bir varlık ile mum çubuğu gösterimi elde edilen rüzgâr türbininden toplanan veriler arasında bir

analoji kurulabilir. Örneğin rüzgâr enerji üretimi, rüzgâr hızının belirli bir aralıkta olmasıyla en verimli hale gelmektedir. Bir rüzgâr türbini, belirli bir rüzgâr hızında optimal verimlilik sağlar ve bu genellikle orta bir seviyededir. Eğer rüzgâr hızı çok düşükse, türbin dönmeyi ve enerji üretimi düşer, bu da aşırı satış benzeri bir duruma karışık gelmektedir. Aynı şekilde, rüzgâr hızı çok yüksekse, türbin aşırı yüklenir ve aşırı hızda dönmeye çalışır, bu da aşırı alım benzeri bir duruma işaret etmektedir. Stokastik RSI gibi bir gösterge, rüzgâr hızının genel eğilimini izleyerek, türbinin optimal performans noktasının nerede olduğunu belirlememize yardımcı olacaktır. Bu da rüzgâr enerji üretimi için etkin bir tahmin ve yönetim sağlamakla birlikte mum çubukları da belirli bir dönemdeki rüzgâr hızını temsil etmektedir. Bunun yanında Stokastik RSI gibi göstergeler daha genel bir perspektif sunmaktadır.

Çalışmada stokastik osilatörü, RSI ve Stokastik RSI göstergelerinin farklı periyotlar uygulanarak çıkartılan özneliklerinin oluşturduğu öznelik havuzunun gösterimi Şekil 4'teki gibidir.



Şekil 4. Mum çubuğu gösteriminden çıkartılan özneliklerden öznelik havuzunun oluşturulması

Karar Ağaçları Modeli

DT yaklaşımı hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılan temel ve sezgisel bir makine öğrenimi algoritmalarından biri olarak tanımlanmaktadır [33]. Bu yaklaşımda veri dallara ayrılarak her düğümde bir özelliğe göre karar verilmekte ve sınıflandırma veya tahmin işlemi yapılmaktadır. Ağaç yapısında, kökten başlayarak veriyi dallara ayırmakta ve her yaprakta nihai bir sınıf ya da değer tahmin edilmektedir [33].

XGBoost Modeli

Gradyen Artırma (Gradient Boosting) algoritması birçok zayıf tahminciyi bir araya getirerek güçlü bir tahminci oluşturmayı amaçlayan bir makine öğrenimi tekniğidir [34]. Gradyen Artırma, zayıf öğrenicileri, genellikle karar ağaçları olarak bilinen basit modelleri kullanarak bir araya getirir ve ardışık olarak eğitmektedir. Tablo 1'de Gradyen Artırma algoritmasının sözde kodu (pseudo kodu) verilmiştir.

Tablo 1. Gradyen Artırma Algoritması

Gradyen Artırma Algoritması
1. Veri setini yükle
2. Hedef değişkeni belirle
3. Başlangıç tahmini yap (örneğin, ortalama değeri kullan)
4. Başlangıç artıkları hesapla: Hedeflenen- Başlangıç tahmini
5. Döngü başlat
a. Zayıf öğrenici oluştur
- Veri setini ve artıkları kullanarak bir karar ağacı eğit
b. Yeni tahmin yap: Önceki tahmin + Zayıf öğrenicinin tahmini
c. Yeni artıkları hesapla: Hedeflenen- Yeni tahmin
d. Artıkları güncelle
e. Döngüden çıkma kriterini kontrol et (örneğin, belirli bir iterasyon sayısı veya artıkların belirli bir eşiği)
6. Döngüyü sonlandır

İlk aşamada, basit bir tahminci olarak veri setinin ortalaması kullanılmaktadır. Ardından, bu başlangıç tahmini ile gerçek değerler arasındaki farklar, artıklar olarak adlandırılmaktadır. Bu artıkları tahmin etmek için bir dizi zayıf öğrenici eğitilir, bu aşamada genellikle karar ağaçları tercih edilmektedir. Her bir ağaç, önceki ağaçların gerçek değerlerle yapılan tahminler arasındaki farkları minimize etmeye odaklanmaktadır. Son olarak, tüm zayıf öğrenicilerin tahminleri ağırlıklı olarak birleştirilir ve toplu bir tahmin yapılmaktadır. Bu yöntem, hedef değişkeninin karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkilerini modellemek için etkili bir yol sağlamakla birlikte sınıflandırma ile regresyon problemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

XGBoost modeli, Gradyen Artırma algoritmasını kullanarak, ağaç tabanlı modellerin performansını artırmak için optimize edilmiş ve paralel hale getirilmiş bir makine öğrenmesi uygulamasıdır [34]. Sınıflandırma ve regresyon problemlerinde yüksek performans ve hızlı eğitim süreleri sunmaktadır. Bu çalışmada model eğitimi için oluşturulan program için Python programlama dili kullanılmış olup DT, XGBoost modelleri için scikit-learn kütüphanesi kullanılmıştır.

Minimum Artıklık Maksimum Uygunluk Yöntemi

MRMR yöntemi bir veri kümesindeki özellikler arasından en uygun olanları seçmek için kullanılmaktadır [35]. MRMR, özelliklerin birbirleriyle olan ilişkilerini minimize ederken hedef değişkenle maksimum ilişkiyi sağlayan özellikleri seçmektedir. Yöntemde her bir öznelik ayrı bir rastlantı değişkeni olarak ele alınarak ve iki öznelik, X ve Y, arasındaki benzerlik seviyesini ölçmek için aralarındaki karşılıklı bilgiyi (mutual information) kullanılmaktadır. MRMR algoritmasında kullanılan karşılıklı bilgi formülü şu şekildedir:

$$I(X, Y) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} p(x, y) \log \left(\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right) \quad (7)$$

Burada $I(X, Y)$ X ve Y arasındaki karşılıklı bilgiyi temsil etmektedir. $p(x, y)$ ise X ve Y'nin birlikte gözlemlenme

olasılığını ifade etmektedir. $p(x)$ ve $p(y)$ ise sırasıyla X ve Y rastlantı değişkenlerinin olasılık dağılım fonksiyonlarını göstermektedir.

Model Başarımının Değerlendirilmesi

Çalışmada model performansını ölçmek için literatürde genel olarak kullanılan Ortalama Kare Hatası (MSE), Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve Pearson korelasyon katsayısı (R) kullanılacaktır.

MSE, her tahminin gerçek değerden farkını almakta ve bunların karelerinin toplamının ortalamasını almaktadır. Denklem (8)'de MSE formülü verilmektedir. Burada x_i gerçek değerleri, y_i ise model tarafından tahmin değerlerini göstermektedir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (8)$$

RMSE ise gerçek değerlerle tahmin edilen değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökü olarak Denklem (9)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

Pearson korelasyon katsayısı iki değişken arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü ölçen istatistiksel bir ölçüdür. Denklem (10)'daki gibi hesaplanmaktadır. Burada \hat{x}_i ve \hat{y}_i sırasıyla gerçek ve tahmin edilen zaman serisinin ortalama değeri olarak hesaplanmaktadır.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)(y_i - \hat{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}} \quad (10)$$

Bu değer 1 olması pozitif ilişkiyi, -1 olması ise negatif ilişkiyi göstermektedir. 0 ise herhangi bir ilişkinin olmadığını göstermektedir.

Araştırma Sonuçları ve Tartışma

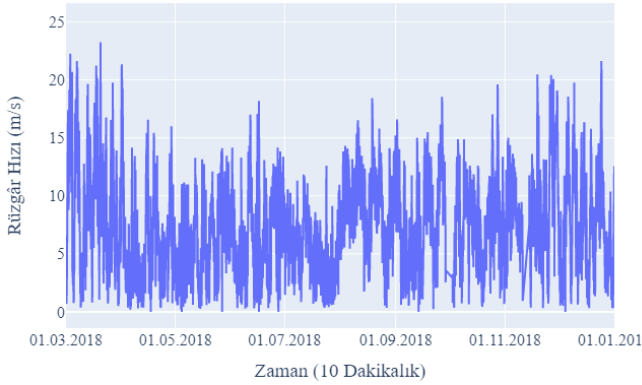
Bu çalışmada Yalova ilinde bulunan rüzgâr türbininden toplanan rüzgâr hızı verileri kullanılarak mum çubuğu gösterimi elde edilmiştir. Daha sonra bu gösterim kullanılarak trend ve osilatör tabanlı göstergeler ile öznelik havuzu oluşturulmuştur. MRMR algoritması ile özneliklerin kalitesi belirlenmiştir. Elde edilen özneliklerden yüksek skor değerine sahip olanlar kullanılarak makine öğrenimi yaklaşımlarından DT ve XGBoost modelleri ile rüzgâr hızının bir adım sonraki değerinin tahmini yapılmıştır. Farklı gösterge değerlerinin etkisi incelenerek tahmin başarımı yüksek bir model elde edilmiştir. Model doğrulama yaklaşımı olarak çapraz doğrulama methodu kullanılmıştır. Hata kriteri olarak MSE, RMSE ve R değerleri kullanılmıştır.

Veri seti 2018 yılını içerecek şekilde 1 yıl süre ile 10 dakikalık aralıklarla toplanan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, teorik güç eğrisi ve üretilen aktif güç değerlerinden oluşmaktadır [26]. Tablo 2'de toplanan verilerden rüzgâr hızının istatistiksel değerleri verilmektedir. Tablodaki

değerler incelendiğinde toplam örnek sayısı 50530, örneklerin ortalamasının 7.56, standart sapma değerinin 4.23, minimum değerinin 0 ve maksimum değerinin 25.21 olduğu görülmektedir. Ayrıca %25'lik, %50'lik ve %75'lik çeyreklikler incelendiğinde sırasıyla 4.20, 7.10 ve 10.30 olduğu görülmektedir. Şekil 5'te rüzgâr hızının zamana göre değişimi çizdirilmiştir.

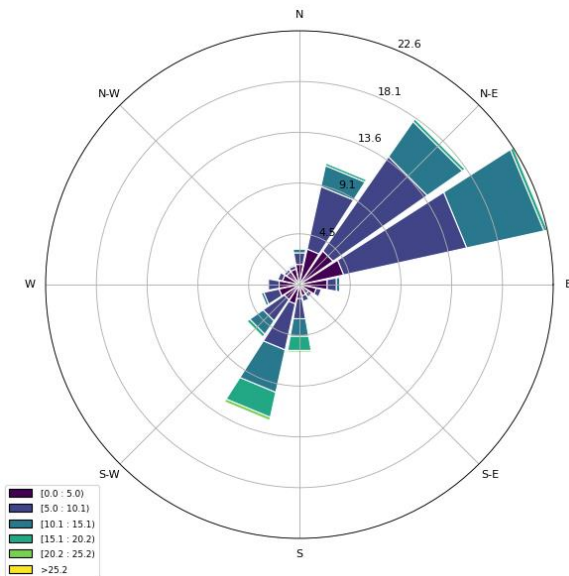
Tablo 2. Rüzgâr hızının istatistiksel değerleri.

Toplam	Ortalama	Standart Sapma	Minimum	Maksimum
50530	7,56	4,23	0	25,21



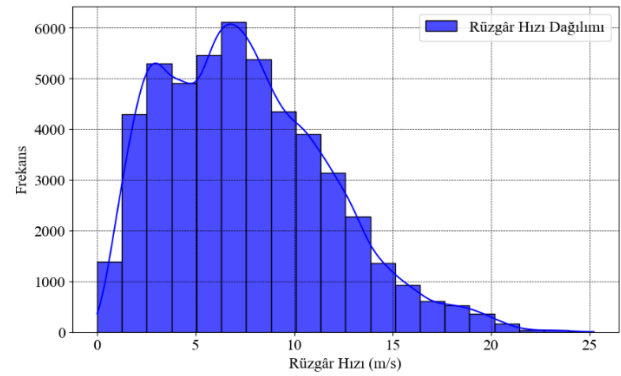
Şekil 5. Rüzgâr hızının zamana göre değişimi grafiği

Bu bölgedeki rüzgâr hızının ve yönünün aynı grafikte görselleştirilmiş hali ise Şekil 6'daki gibi rüzgâr gülü grafiği ile verilmiştir. Kuzeydoğu doğu (NE-E) yönünde rüzgâr hızı 13.6 ile 22.6 arasında büyük bir dilim ile en güçlü rüzgarlar buradan esmekte olup, rüzgâr hızı genellikle yüksek ve sık görülmektedir. Kuzeydoğu (N-E) yönünde de benzer şekilde 13.6 ile 22.6 arasında dilimler mevcut olup, güçlü rüzgarlar esmektedir. Güneybatı batı (SW-W) yönünde rüzgâr hızı 9.1 ile 13.6 arasında değişmekte ve doğu ile kuzeydoğu doğuya kıyasla biraz daha az güçlü rüzgarlar esmektedir, ancak yine de önemli miktarda güçlü rüzgâr esmektedir.



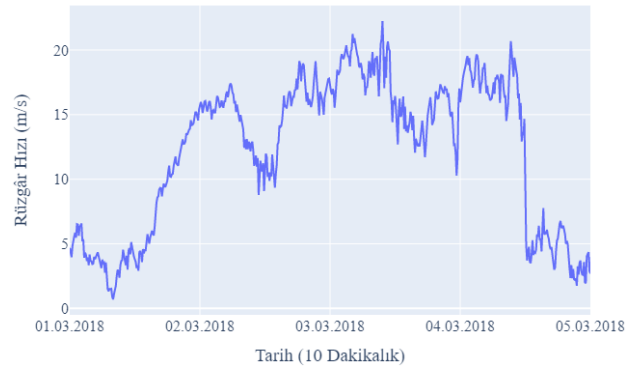
Şekil 6. Rüzgâr gülü grafiği

Rüzgâr hızının ağırlıklı olarak hangi aralıklarda yoğun olduğunu göstermek için ise Şekil 7'deki gibi histogram grafik kullanılmıştır. Rüzgâr hızı 0 ile 25 m/s arasında değişmektedir. En yüksek frekans 6000 civarında olup, bu değer 5-6 m/s aralığında gözlemlenmektedir. Bu durum, rüzgâr hızının en sık bu aralıkta görüldüğünü göstermektedir. Genel olarak, rüzgâr hızının frekansı 0 m/s'den başlayarak hızla artmakta, 5-6 m/s civarında zirveye ulaşmakta ve sonrasında rüzgâr hızı arttıkça frekans azalmaktadır, bu da daha yüksek rüzgâr hızlarının daha nadir olduğunu işaret etmektedir. Grafikte birkaç tepe noktası bulunmakta olup, rüzgâr hızının birden fazla modlu dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, rüzgâr hızının yüksek değerlerinde (20 m/s ve üstü) frekans oldukça düşüktür, yani bu hızlar nadir olarak gözlemlenmektedir. Bu dağılım, rüzgâr hızının çoğunlukla düşük ve orta hızlarda seyrettiğini, ancak zaman zaman yüksek hızlara da çıkabildiğini göstermektedir.



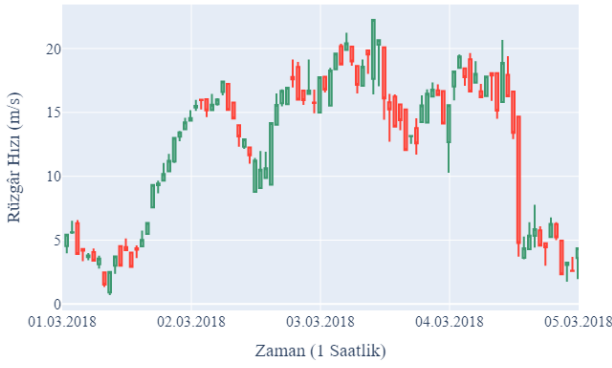
Şekil 7. Rüzgâr hızının dağılımı grafiği

Şekil 8'de 01.03.2018-05.03.2018 tarihleri arasında çizgi grafik ile gösterim verilmiştir. Şekil 9'da ise yine bu zaman aralığındaki rüzgâr verisine uygulanan dönüşüm neticesinde elde edilen mum çubuğu gösterimi verilmiştir.



Şekil 8. 01.03.2018-05.03.2018 tarihleri arasında rüzgâr hızının zamana göre değişiminin çizgi grafiği

Tablo 3'te Basit Hareketli Ortalama (BHO) ve Ekspansiyonel Hareketli Ortalama (EHO) yöntemlerinin MRRM yaklaşımı ile performans karşılaştırması yapılmıştır. EHO yöntemi ile genel olarak BHO yöntemine göre daha yüksek skorlar elde edildiği görülmüştür. Burada özellikler kısa dönemlerde, özellikle EHO(3) ile 1.6258 skoru en yüksek değeri gösterirken, BHO(3) 0.8279 skoru ile BHO yöntemindeki en yüksek değer elde edilmiştir.



Şekil 9. 01.03.2018-05.03.2018 tarihleri arasında rüzgâr hızının zamana göre değişiminin mum çubuğu grafiği

Tablo 4'te RSI yönteminin MRMR yaklaşımı ile elde edilen skor değerleri verilmiştir. RSI skorları dönem uzunluğu arttıkça daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. BHO ve özellikle EHO yöntemlerine kıyasla skor değeri olarak daha düşük değer aldığı görülmektedir. En yüksek RSI skoru, RSI(15) ile 0.7366 olarak belirlenmişken, en düşük skor RSI(4) ile 0.2878'dir. Tablo 5'te Stokastik %K ve %D değerlerinin MRMR yaklaşımı ile elde edilen skorları incelendiğinde, en yüksek skor Stokastik %K(15) için 0.8282 iken, Stokastik %D(15) için 0.7086 olarak belirlenmiştir. Stokastik %K ile genellikle %D'ye göre daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. BHO ve EHO ile karşılaştırıldığında, Stokastik %K'nın en yüksek skoru, BHO(3) ile benzer seviyede olup, EHO'ya göre skor değeri daha düşük kalmıştır.

Tablo 3. Basit hareketli ortalama ve Ekspansiyel hareketli ortalama göstergelerinin MRMR yöntemine göre elde edilen skor değerleri

Basit Hareketli Ortalama		Ekspansiyel Hareketli Ortalama	
	Skor		Skor
BHO(3)	0.8279	EHO(3)	1.6258
BHO(4)	0.7350	EHO(15)	0.8367
BHO(7)	0.7343	EHO(5)	0.7689
BHO(5)	0.7096	EHO(4)	0.7678
BHO(15)	0.6938	EHO(7)	0.7330
BHO(6)	0.6662	EHO(6)	0.6908
BHO(11)	0.6142	EHO(10)	0.6708
BHO(8)	0.6114	EHO(8)	0.6272
BHO(9)	0.5617	EHO(12)	0.6114
BHO(14)	0.5549	EHO(9)	0.6069
BHO(10)	0.5401	EHO(11)	0.5512
BHO(12)	0.4991	EHO(14)	0.5430
BHO(13)	0.4886	EHO(13)	0.5048

Tablo 4. RSI göstergelerinin MRMR yöntemine göre elde edilen skor değerleri

RSI	Skor
RSI(15)	0.7366
RSI(11)	0.6694
RSI(13)	0.6235
RSI(3)	0.5916
RSI(14)	0.5859
RSI(9)	0.5535
RSI(12)	0.5355
RSI(10)	0.4619
RSI(7)	0.4240
RSI(8)	0.3910
RSI(6)	0.3481
RSI(5)	0.3270
RSI(4)	0.2878

Tablo 5. Stokastik göstergelerinin MRMR yöntemine göre elde edilen skor değerleri

Stokastik %K	Skor	Stokastik %D	Skor
S-K(15)	0.8282	S-D(15)	0.7086
S-K(3)	0.7294	S-D(8)	0.6103
S-K(7)	0.6487	S-D(13)	0.4954
S-K(11)	0.5492	S-D(14)	0.4220
S-K(5)	0.4947	S-D(3)	0.3953
S-K(14)	0.4449	S-D(12)	0.3793
S-K(13)	0.4005	S-D(9)	0.3676
S-K(6)	0.3760	S-D(11)	0.3477
S-K(9)	0.3750	S-D(6)	0.3385
S-K(12)	0.3586	S-D(10)	0.3230
S-K(4)	0.3486	S-D(4)	0.3036
S-K(10)	0.3346	S-D(7)	0.3018
S-K(8)	0.3209	S-D(5)	0.2788

Tablo 6'da ise Stokastik RSI göstergelerinin MRMR yöntemine göre elde edilen skor değerleri verilmiştir. S-K ve S-D ile karşılaştırıldığında SRSI-K ve SRSI-D skorları oldukça farklı sonuçlar vermektedir. En yüksek skor, SRSI-K(6) ile 1.5358 olup, bu değer Stokastik %K'nın en yüksek skoru olan 0.8282'yi ve diğer yöntemlerin çoğunu (BHO'ya dahil ve EHO'ya yakın) önemli ölçüde aşmaktadır. SRSI-D(15) skoru da 1.4576 ile oldukça yüksektir. Genel olarak, SRSI-K'nın S-K'ya kıyasla en yüksek skoru aldığını göstermektedir. Ayrıca, SRSI-K ve SRSI-D skorlarının, S-K ve S-D ile elde edilen skor değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı zamanda RSI ile de kıyaslandığında skor değerinin yüksek olduğu görülmüştür.

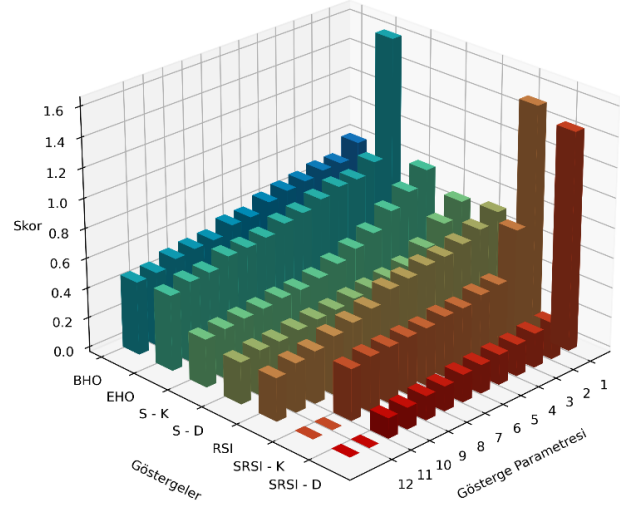
Tablo 6. Stokastik RSI göstergelerinin MRMR yöntemine göre elde edilen skor değerleri

Stokastik RSI %K	Skor	Stokastik RSI %D	Skor
SRSI-K(6)	1.5358	SRSI-D(15)	1.4576
SRSI-K(9)	0.7638	SRSI-D(5)	0.2441
SRSI-K(8)	0.4522	SRSI-D(6)	0.2297
SRSI-K(5)	0.4379	SRSI-D(8)	0.2114
SRSI-K(7)	0.4047	SRSI-D(12)	0.2012
SRSI-K(13)	0.4040	SRSI-D(9)	0.1911
SRSI-K(14)	0.3828	SRSI-D(14)	0.1841
SRSI-K(10)	0.3802	SRSI-D(13)	0.1650
SRSI-K(12)	0.3727	SRSI-D(11)	0.1601
SRSI-K(15)	0.3672	SRSI-D(10)	0.1433
SRSI-K(11)	0.3425	SRSI-D(7)	0.1341
SRSI-K(4)	0.0000	SRSI-D(3)	0.0000
SRSI-K(3)	0.0000	SRSI-D(4)	0.0000

Şekil 10'da farklı teknik göstergelerin (BHO, EHO, Stokastik %K, Stokastik %D, RSI, SRSI %K, SRSI %D) Tablo 3-6'da elde edilen parametre değerlerinin MRMR yaklaşımı ile aldığı skor değerlerinin yüksekten düşüğe doğru sıralanmış üç boyutlu sütun grafiği gösterimi verilmiştir. MRMR yaklaşımı ile 91 adet öznelik skor değerleri için büyükten küçüğe doğru sıralandığında ilk 10 adet öznelik olan EMA(3), SRSI-K(6), SRSI-D(15), EMA(15), K(15), MA(3), EMA(5), EMA(4), SRSI-K(9) ve RSI(15) model eğitimi yapılmıştır. Tablo 7-9'da DT, MRMR-DT, XGBoost, MRMR-XGBoost model başarımlarının MSE, RMSE ve R ölçütlerine göre sunulmuştur. Modelin performans ölçümleri incelendiğinde önerilen MRMR-XGBoost modelinin oldukça yüksek bir doğruluk ve tutarlılık sergilediği görülmüştür. MSE ve RMSE değerlerinin düşük olması, modelin tahminlerinin genel olarak gerçek değerlere çok yakın olduğunu ve hataların tutarlı bir şekilde düşük olduğunu ifade etmektedir. R değerinin yüksek olması ise, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu ortaya çıkartmaktadır. Standart sapmaların düşük olması, bu performans ölçümlerinin tutarlılığını doğrulamaktadır.

Tablo 7-9 ve Şekil 11-13 birlikte incelendiğinde, DT modelinin ortalama MSE, RMSE ve R değerlerinin sırasıyla 0.008390, 0.091594 ve 0.717523 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, DT modelinin diğer modellerle kıyaslandığında nispeten daha yüksek hata içerdiğini göstermektedir. MRMR-DT modelinin ortalama MSE, RMSE ve R değerleri sırasıyla 0.008223, 0.090677 ve 0.723312'dir. MRMR yaklaşımı kullanılarak elde edilen bu model, daha düşük MSE ve RMSE değerleri ile daha yüksek bir R değeri sunduğundan, bu modelin daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. XGBoost modelinin ortalama MSE, RMSE ve R değerleri sırasıyla 0.004664, 0.068289 ve 0.842987'dir. Bu model, diğer iki modelle kıyaslandığında daha düşük hata ve daha yüksek performans sergilemektedir. MRMR yaklaşımı ile iyileştirilmiş XGBoost modelinin ortalama MSE değeri 0.004157, ortalama RMSE değeri 0.064473 ve ortalama R değeri 0.860123'tür. Bu sonuçlar, MRMR-

XGBoost modelinin en düşük MSE ve RMSE ile en yüksek R değerine sahip olduğunu ve bu nedenle diğer modellere göre en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu model için rüzgâr hızının gerçek değer ile tahmin edilen değer üst üste çizdirilmiş hali Şekil 14'te verilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda modelin genel olarak güvenilir ve hassas tahminler yaptığı ortaya çıkartılmıştır.



Şekil 10. Skor değerlerinin gösterge tiplerine göre büyükten küçüğe sıralanmış halinin üç boyutlu bar grafik gösterimi

Tablo 7. Model başarımlarının MSE ölçütüne göre değerlendirilmesi

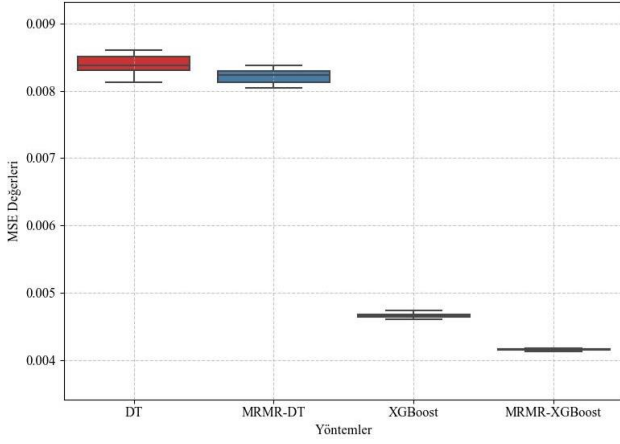
Modeller	Ortalama ± Standart Sapma
DT	0.008390 ± 0.000147
MRMR-DT	0.008223 ± 0.000099
XGBoost	0.004664 ± 0.000037
MRMR-XGBoost	0.004157 ± 0.000013

Tablo 8. Model başarımlarının RMSE ölçütüne göre değerlendirilmesi

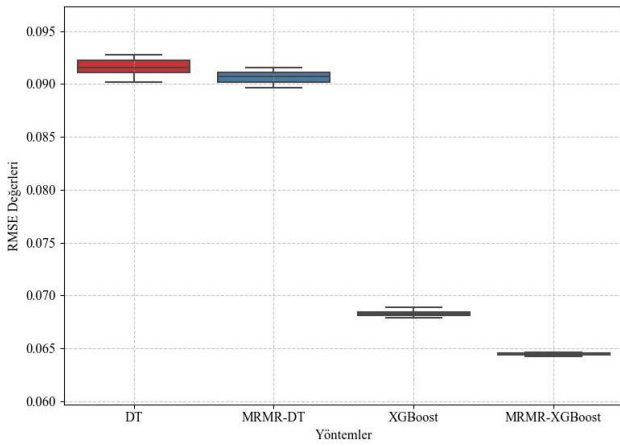
Modeller	Ortalama ± Standart Sapma
DT	0.091594 ± 0.000805
MRMR-DT	0.090677 ± 0.000547
XGBoost	0.068289 ± 0.000273
MRMR-XGBoost	0.064473 ± 0.000104

Tablo 9. Model başarımlarının R ölçütüne göre değerlendirilmesi

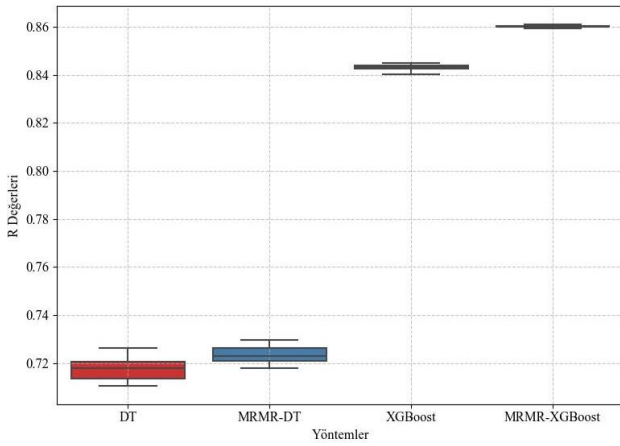
Modeller	Ortalama ± Standart Sapma
DT	0.717523 ± 0.004962
MRMR-DT	0.723312 ± 0.003335
XGBoost	0.842987 ± 0.001256
MRMR-XGBoost	0.860123 ± 0.000451



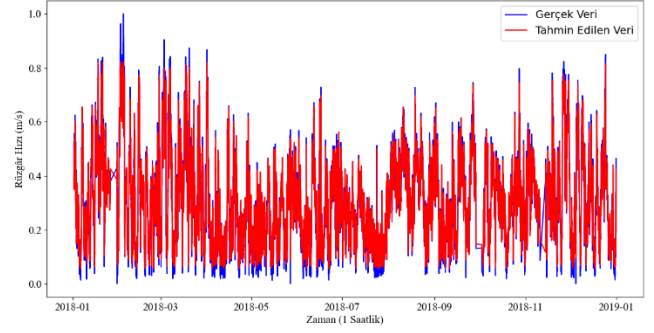
Şekil 11. Model başarımlarının MSE ölçütüne göre kutu bilyık grafiği ile gösterimi



Şekil 12. Model başarımlarının RMSE ölçütüne göre kutu bilyık grafiği ile gösterimi



Şekil 13. Model başarımlarının R ölçütüne göre kutu bilyık grafiği ile gösterimi



Şekil 14. Rüzgâr hızının gerçek değer ile tahmin edilen değerin üst üste çizdirimi

Tablo 10 incelendiğinde rüzgâr hızı tahmini için farklı yöntemlerin karşılaştırılması, önerilen MRMR-XGBoost modelinin üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır. [19]'daki çalışmada Çoklu Regresyon (RMSE: 0.8700, R: 0.8050) temel bir yöntem olarak değerlendirilmiş ancak yüksek hata oranı nedeniyle sınırlı bir doğruluk sunmuştur. [20]'deki çalışmada BOA+VMD+PCA+RF yöntemi (RMSE: 0.3736, R: 0.8200) hata oranını azaltarak performansı iyileştirmiştir. [21]'de ANN-BR modeli (MSE: 0.3023, RMSE: 0.5498, R: 0.8353) daha iyi bir korelasyon katsayısı sunarken hata oranı hala yüksektir. Önerilen MRMR-XGBoost yöntemi ise en düşük hata oranı (MSE: 0.0041, RMSE: 0.0644) ve en yüksek doğruluk (R: 0.8601) ile diğer modelleri geride bırakmıştır. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin, rüzgâr hızı tahmininde doğruluk ve güvenilirlik açısından literatürdeki mevcut yöntemlere kıyasla açık bir üstünlük sağladığını göstermektedir.

Tablo 10. Rüzgâr hızı tahmininde literatürdeki farklı modeller ile önerilen yöntemin performans karşılaştırması

Modeller	MSE	RMSE	R
Çoklu Regresyon [19]	-	0.8700	0,8050
BOA+VMD+PCA+RF [20]	-	0.3736	0,8200
ANN-BR [21]	0,3023	0,5498	0,8353
MRMR-XGBoost (Önerilen Yöntem)	0.0041	0.0644	0.8601

Sonuç

Bu çalışmada, Yalova ilinde bulunan rüzgâr türbininden elde edilmiş rüzgâr hızı verisi üzerinde mum çubuğu gösterimi uygulanarak 10 dakikalık veriler 1 saatlik veri haline getirilmiştir. Trend ve osilatör tabanlı finansal sinyal işleme yaklaşımları ile 91 adet öznitelik çıkartılmıştır. Trend tabanlı BHO ve EHO ile toplam 26 adet öznitelik çıkartılmıştır. Osilatör tabanlı RSI, stokastik ve stokastik RSI ile toplam 65 adet öznitelik çıkartılmıştır. Çıkartılan öznitelikler MRMR yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Model karmaşıklığını artırmamak için skor değerleri yüksek olanlardan 10 adet öznitelik model girişine uygulanmıştır. Bir adım sonraki rüzgâr hızının tahmini için model doğrulama yaklaşımı 10 katlı çapraz doğrulama yapılarak ve 20 kere tekrarlı eğitim ve test süreci adımları uygulanarak zaman serisi tahmini işlemi tamamlanmıştır. Rüzgâr hızı verisine mum çubuğu gösterimi uygulayarak finansal sinyal işleme yaklaşımı uygulanabilir hale getirilmiştir. Özellikle osilatör tabanlı göstergeler rahatlıkla

uygulanmıştır. MRMR yaklaşımı ile EHO'ya bağlı özellikler BHO'ya göre daha çok seçildiği görülmüştür. Ayrıca, RSI ve Stokastik osilatörlere dayalı özniteliklerin yanı sıra, Stokastik RSI'dan daha yüksek skor değerleri elde edilerek ve ilk 10 öznitelik içinde diğer öznitelik gruplarına göre daha fazla seçilerek, daha fazla çeşitlilik kattığı anlaşılmıştır. MRMR yaklaşımının uygulanmadığı 91 öznitelige göre eğitilen DT ve XGBoost modellerinin MSE, RMSE ve R ölçütleri kullanılarak yapılan performans kıyaslamalarında, XGBoost modelinin DT modeline göre daha yüksek bir performans sergilediği görülmüştür. 91 adet öznitelik yerine 10 adet özniteliğin MRMR yaklaşımı ile temsil edildiği MRMR-DT ve MRMR-XGBoost modellerinin performansı incelendiğinde DT ve XGBoost modellerine göre model karmaşıklığının azaltıldığı ve performansın yüksek olduğu düşük MSE, RMSE ve yüksek R değerleri ile ortaya çıkartılmıştır. Önerilen yöntemin MSE (0.0041), RMSE (0.0644) ve korelasyon katsayısı ($R = 0.8601$) değerleri, literatürdeki diğer yöntemlerden (Çoklu Regresyon, BOA+VMD+PCA+RF ve ANN-BR gibi) anlamlı derecede daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin yalnızca rüzgâr hızı tahmini doğruluğunu artırmakla kalmadığını, aynı zamanda hata oranını ciddi ölçüde düşürerek daha güvenilir bir tahmin aracı sunduğunu göstermektedir. Özetle, bu çalışmanın özgün katkısı, rüzgâr hızı tahmini için MRMR-XGBoost yönteminin birleştirilmiş bir model olarak hem düşük hata oranı hem de yüksek korelasyon katsayısı ile diğer yöntemleri geride bırakmasıdır. Literatürdeki mevcut yöntemlere kıyasla, önerilen modelin, özellikle tahmin doğruluğu gerektiren kritik uygulamalarda yeni bir standart belirlediği ve mevcut bilgi birikimine güçlü bir katkı sağladığı görülmüştür. Bu bağlamda, çalışma, rüzgâr hızı tahmininde daha yüksek doğruluk ve sağlamlık elde etmek için literatüre destekleyici ve yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Farklı model doğrulama ve optimizasyon yaklaşımlarının yanı sıra çeşitli modelleme tekniklerinin ve gerçek zamanlı uygulama imkanlarının araştırılması, gelecekteki çalışmalar için oldukça önemli olabilir. Bunun yanında tahmin modelinin genelleştirme kapasitesini artırmak adına tek bir rüzgâr santralinden alınan veriler yerine, farklı coğrafi bölgelerdeki birden fazla rüzgâr santralinden toplanan verilerin kullanılması düşünülebilir. Bu yaklaşım, modelin farklı rüzgâr rejimlerini ve çevresel koşulları daha iyi temsil etmesine olanak tanıyarak tahmin doğruluğunu artırabilir. Ayrıca, çeşitli santrallerden elde edilen verilerle mekânsal ve zamansal korelasyonların incelenmesi, model performansını ve güvenilirliğini daha da geliştirebilir.

Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Seçkin Karasu fikrin oluşması, tasarım yapılması ve literatür taraması, gerekli kodların oluşturulması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarından sorumludur.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

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

Kaynakça

- [1] Behera, S., Sahoo, S., & Pati, B. B. (2015). A review on optimization algorithms and application to wind energy integration to grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 214-227.
- [2] Shafiullah, G. M., Oo, A. M., Ali, A. S., & Wolfs, P. (2013). Potential challenges of integrating large-scale wind energy into the power grid—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 306-321.
- [3] MansourLakouraj, M., Shahabi, M., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. (2022). Optimal market-based operation of microgrid with the integration of wind turbines, energy storage system and demand response resources. *Energy*, 239, 122156.
- [4] Msigwa, G., Ighalo, J. O., & Yap, P. S. (2022). Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives. *Science of the Total Environment*, 157755.
- [5] Lin, Z., Liu, X., & Collu, M. (2020). Wind power prediction based on high-frequency SCADA data along with isolation forest and deep learning neural networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105835.
- [6] Suo, L., Peng, T., Song, S., Zhang, C., Wang, Y., Fu, Y., & Nazir, M. S. (2023). Wind speed prediction by a swarm intelligence based deep learning model via signal decomposition and parameter optimization using improved chimp optimization algorithm. *Energy*, 276, 127526.
- [7] Gong, Y., Jiang, Q., & Baldick, R. (2015). Ramp event forecast based wind power ramp control with energy storage system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(3), 1831-1844.
- [8] Neshat, M., Nezhad, M. M., Abbasnejad, E., Mirjalili, S., Groppi, D., Heydari, A., ... & Wagner, M. (2021). Wind turbine power output prediction using a new hybrid neuro-evolutionary method. *Energy*, 229, 120617.
- [9] Oh, S. Y., Joung, C., Lee, S., Shim, Y. B., Lee, D., Cho, G. E., ... & Park, Y. B. (2024). Condition-based maintenance of wind turbine structures: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 204, 114799.
- [10] Kisvari, A., Lin, Z., & Liu, X. (2021). Wind power forecasting—A data-driven method along with gated recurrent neural network. *Renewable Energy*, 163, 1895-1909.
- [11] Zheng, Y., Ge, Y., Muhsen, S., Wang, S., Elkamchouchi, D. H., Ali, E., & Ali, H. E. (2023). New ridge regression, artificial neural networks and support vector machine for wind speed prediction. *Advances in Engineering Software*, 179, 103426.
- [12] Yang, Q., Huang, G., Li, T., Xu, Y., & Pan, J. (2023). A novel short-term wind speed prediction method based on hybrid statistical-artificial intelligence model with empirical wavelet transform and hyperparameter optimization. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 240, 105499.

- [13] Li, Y., Shen, X., & Zhou, C. (2023). Dynamic multi-turbines spatiotemporal correlation model enabled digital twin technology for real-time wind speed prediction. *Renewable Energy*, 203, 841-853.
- [14] Malakouti, S. M. (2023). Improving the prediction of wind speed and power production of SCADA system with ensemble method and 10-fold cross-validation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100351.
- [15] Zhang, Z., Wang, J., Wei, D., Luo, T., & Xia, Y. (2023). A novel ensemble system for short-term wind speed forecasting based on Two-stage Attention-Based Recurrent Neural Network. *Renewable Energy*, 204, 11-23.
- [16] Wang, X., Wang, J., Niu, X., & Wu, C. (2024). Novel wind-speed prediction system based on dimensionality reduction and nonlinear weighting strategy for point-interval prediction. *Expert Systems with Applications*, 241, 122477.
- [17] Zhu, A., Zhao, Q., Yang, T., Zhou, L., & Zeng, B. (2024). Wind speed prediction and reconstruction based on improved grey wolf optimization algorithm and deep learning networks. *Computers and Electrical Engineering*, 114, 109074.
- [18] Wang, M., & Tian, Z. (2024). Ultra-short-term wind speed prediction based on empirical wavelet transform and combined model. *Earth Science Informatics*, 17(1), 539-560.
- [19] Wang, J. W., Yang, H. J., & Kim, J. J. (2020). Wind speed estimation in urban areas based on the relationships between background wind speeds and morphological parameters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205, 104324.
- [20] Zhou, S., Gao, C. Y., Duan, Z., Xi, X., & Li, Y. (2023). A robust error correction method for numerical weather prediction wind speed based on Bayesian optimization, variational mode decomposition, principal component analysis, and random forest: VMD-PCA-RF (version 1.0. 0). *Geoscientific Model Development*, 16(21), 6247-6266.
- [21] Malik, P., Gehlot, A., Malik, P. K., & Singh, R. (2023, April). Global horizontal irradiance and wind speed prediction using ANN: Comprehensive Study. In *2023 IEEE Devices for Integrated Circuit (DevIC)* (pp. 190-193). IEEE.
- [22] Li, Y., Feng, Z., & Feng, L. (2015). Using candlestick charts to predict adolescent stress trend on micro-blog. *Procedia Computer Science*, 63, 221-228.
- [23] Xu, R., Liu, X., Wan, H., Pan, X., & Li, J. (2021). A Feature Extraction and Classification Method to Forecast the PM_{2.5} Variation Trend Using Candlestick and Visual Geometry Group Model. *Atmosphere*, 12(5), 570.
- [24] Hsu, Y. C. (2020). Using machine learning and candlestick patterns to predict the outcomes of American football games. *Applied Sciences*, 10(13), 4484.
- [25] Guilizzoni, M., & Maldonado Eizaguirre, P. (2022). Trend lines and Japanese candlesticks applied to the forecasting of wind speed data series. *Forecasting*, 4(1), 165-181.
- [26] Erisen, B. Wind Turbine Scada Dataset. 2018. Available online: <http://www.kaggle.com/berkerisen/wind-turbine-scada-dataset> (accessed on 10 May 2024).
- [27] Chande, T. S., & Kroll, S. (1994). The new technical trader: boost your profit by plugging into the latest indicators.
- [28] Johnston, F. R., Boyland, J. E., Meadows, M., & Shale, E. (1999). Some properties of a simple moving average when applied to forecasting a time series. *Journal of the Operational Research Society*, 50(12), 1267-1271.
- [29] Klinker, F. (2011). Exponential moving average versus moving exponential average. *Mathematische Semesterberichte*, 58, 97-107.
- [30] Lane, G. C. (1984). Lane's stochastics. *Technical Analysis of Stocks & Commodities*, 2(3), 87-90.
- [31] Gumparthi, S. (2017). Relative strength index for developing effective trading strategies in constructing optimal portfolio. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(19), 8926-8936.
- [32] Chande, T. S., & Kroll, S. (1994). The new technical trader: boost your profit by plugging into the latest indicators.
- [33] De Ville, B. (2013). Decision trees. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 5(6), 448-455.
- [34] Yeşilyurt, Sefa, & Dalkılıç, Hüseyin. (2021). Xgboost ve gradient boost machine ile günlük nehir akımı tahmini. In *3rd International Symposium of III Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences*, Karabük, Türkiye.
- [35] Gülgezen, G., Çataltepe, Z., & Yu, L. MRMR Algoritması Kullanılarak Kararlı Öznitelik Seçimi Stable Feature Selection Using MRMR Algorithm.



A Novel Hybrid Attention VGG Method For Benign and Malignant Breast Cancer Classification

Mustafa Salih BAHAR^{1*}

¹ Yildiz Technical University, Computer Engineering Department, mustafasalihbahr@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-1625-9362

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 June 2024
Received in revised form 24 October 2024
Accepted 19 December 2024
Available online 26 March 2025

Keywords:

Hybrid Attention VGG, Benign, Malignant, Breast Cancer Classification, Deep Learning Models

Doi: 10.24012/dumf.1502403

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Worldwide, breast cancer is quite widespread among many types of cancer. Early detection is crucial for effective treatment. While early detection does not cure cancer or prevent its recurrence, it significantly improves treatment outcomes. Regular breast cancer check-ups, including mammograms, play a vital role in early detection. The type of the observed tumour is also crucial. Therefore, our study utilized a range of deep learning methods to accurately classify distinct forms of breast cancer cells, including both benign and malignant varieties. The problem addressed in the study relies on the classification of tumour images as either benign or malignant. We used the augmented MIAS and INBREAST datasets, implementing fourteen deep learning models by adjusting different hyperparameter values. Aside from these, we trained a new model we created, the Hybrid Attention VGG16 model, on the datasets by adjusting the batch size and learning rate values used in other models. Our research has shown that initially models like VGG16, VGG19, ResNet50, ResNet101, EfficientNetV2B0 and EfficientNetV2L performed better at different hyperparameter values, whereas our proposed model, the Hybrid Attention VGG model, achieved one of the highest performance among deep learning models across many hyperparameter values and on both datasets, especially on the Augmented INBREAST dataset. Our newly proposed model, with its unique skip connection and attention mechanism, surpasses the accuracy of models employed in earlier studies, as demonstrated when comparing them in the literature.

Introduction

Cancer is a highly lethal illness that, if not detected in its early stages, can rapidly spread to other cells, resulting in severe harm to vital organs such as the pancreas, lungs, breasts, and blood. Notably, breast cancer is the most widespread kind of cancer among women worldwide. Breast cancer is a type of cancer that has a high mortality rate when not diagnosed early and accurately. In particular, it is necessary to determine the shade of the detected tumour. Mammography is one of the most helpful imaging tools used by radiologists to correctly diagnose breast lesions by performing many tests under challenging conditions. With the emergence of deep learning models, as opposed to traditional machine learning methods, with fewer data preprocessing steps, more successful results have been achieved through more complex models. Machine learning relies on manual feature extraction, whereas deep learning and artificial neural networks depend upon automatic feature extraction. Convolutional neural networks are a renowned and extensively utilized model in deep learning. A Convolutional Neural Network (CNN) is a form of artificial neural network specifically created to reduce the requirement for lengthy preprocessing. It is a

deep, feed-forward network that utilizes a version of multilayer perceptrons.

Since the advent of deep learning, numerous studies have been published that utilize deep architectures [1]. The Convolutional Neural Network (CNN) is the predominant deep learning architecture. Arevalo et al. [2] conducted a study where they tested and compared various Convolutional Neural Networks (CNNs) to detect masses using two manually designed descriptors. Their experimentation was performed using the dataset from the Breast Cancer Digital Repository Film Mammography [3]. Huynh et al. [4] employed the pre-trained AlexNet [5] for mass diagnosis without additional fine-tuning. Jias et al. [6] propose a method that fine-tunes a pre-trained convolutional neural network (CNN) utilizing a part of the digital database specifically designed to screen mammography (DDSM) database. Ting et al. [7] have developed and trained their breast mass classification network. Rampun et al. [8] employed a modified pre-trained and fine-tuned variant of AlexNet on a carefully selected subset of breast images from the DDSM dataset, known as CBIS-DDSM. Benign and malignant tumours are distinctly different. Round or oval shapes characterize benign tumours, while malignant tumours have unpredictable outlines. Furthermore, a comparison is made between

support vector machines (SVM) and artificial neural networks [9] to classify healthy, aberrant tissues, benign tumours, and malignant tumours [10]. The breast cancer classification techniques are presented in reference [11]. Several CNN designs are accessible, including CiFarNet [12], AlexNet, GoogLeNet [13], ResNet, VGG16, and VGG19 [14]. Transfer learning refers to utilizing a pre-existing model, which has been trained on a particular problem, to address a different situation. Training an extensive neural network from the beginning requires substantial data and computational resources. Data augmentation is a method that enlarges the training dataset by generating additional samples by implementing random alterations to the existing data [15]. The advantages of this include accelerating the convergence process, avoiding excessive adjustment, and enhancing generalization capabilities [16]. A practical method is to make subtle modifications to limited datasets, such as translation, zooming, flipping, mirroring, rotation, and so on [17].

The primary focus of this research is to highlight the significance of the Hybrid Attention VGG model, which is a more efficient and innovative model for classifying benign and malignant breast cancer. This study stands out from others in its emphasis on this particular model. Our objective is to showcase the effectiveness of this model by conducting a comparative analysis with fourteen deep-learning models on two distinct datasets, applying a range of hyperparameter values. The models in examining are VGG16, VGG19, DenseNet121, DenseNet169, ResNet50, ResNet101, MobileNet, MobileNetV2, InceptionV3, InceptionResNetV2, Xception, NasNetMobile, EfficientNetV2B0 and EfficientNetV2L. The investigation used mammography images from the Mammographic Image Analysis Society (MIAS) and INBREAST databases. We acquired both datasets, which employed diverse augmentation strategies, in PNG format. We categorised the dataset into separate folders based on the benign and malignant classes; then, we retrieved the class labels from these folders.

The following sections of the article are arranged in the following manner: Section 2 provides a concise overview of the datasets utilised for mammography imaging and the augmentation strategies employed. Chapter 3 focuses on the deep learning models used in this classification assignment and comprehensively explains the newly presented model. Section 4 contains the performance criteria utilised to assess and compare the achievements of these models. Section 5 presents the performance metrics of the deep learning models employed and our proposed model across various hyperparameter values and datasets. It also includes graphical representations of accuracy and loss values during the training and validation stages for the most successful models and our proposed model. Additionally, the results of the confusion matrix are provided. Chapter 6 evaluates the results, examining the effectiveness of our model concerning prior studies and mentioning possible avenues for further research. Chapter 7 is a conclusion section that explains the reasons behind the success of the suggested model and presents information regarding future study.

Materials and Methods

Imbalanced Datasets and Data Augmentation Techniques

The problem of imbalanced datasets frequently arises in numerous classification tasks. An imbalanced dataset arises when one or more classes possess markedly fewer samples than others, resulting in disproportionate representation among the classes.

In breast cancer medical statistics, malignant tumour cells are typically significantly less than benign tumour cells. Data augmentation approaches represent a practical approach. This technique enhances the minority class or several classes using diverse augmentation methods.

In the dataset utilised, 106 images of breast masses were picked from the 410 mammograms in the INbreast database for this investigation. This study boosted the amount of breast mammography images to 7632 through data augmentation, comprising 2520 benign and 5112 malignant tumours. Primarily, horizontal or vertical flips and rotations between 30 and 330 degrees have been utilized. The augmented MIAS dataset includes 2376 benign and 1440 malignant masses, comprising 3816. Figure 1 provides information about the augmented datasets. Augmentation techniques have been used for both classes in the datasets [18].

Masses \ Dataset	The augmented MIAS dataset	The augmented INBREAST dataset
The number of Benign masses	2376	2520
The number of Malignant masses	1440	5112
Total masses	3816	7632

Figure 1. The augmented datasets and the counts of benign and malignant masses

Rotation involves adjusting the position of an image by a specified angle, either in a clockwise or anticlockwise direction. This method enhances the model's ability to identify things from various perspectives and augments data diversity. In medical imaging, rotating mammography images of masses enables the model to learn to recognize the same mass from several viewpoints, hence enhancing its generalization capability. Nevertheless, rotation can occasionally damage the inherent structure of the data, necessitating cautious use.

Flipping denotes the reflection of an image across a horizontal or vertical axis. Horizontal flipping reflects the image laterally, but vertical flipping reflects it vertically, so augmenting the dataset and enhancing its diversity. This enables the model to identify objects from various orientations. In medical imaging, such as mammograms, horizontal flipping can assist the model in accurately analyzing both breasts. Nonetheless, as flipping may modify the anatomical structure in certain instances, particularly in medical circumstances, it should be executed with prudence.

Dataset

The collection comprises mammography images depicting both benign and malignant tumours. The collection consists of 106 mass photographs obtained from the INBREAST dataset, 53 mass images from the MIAS dataset, and 2188 from the DDSM dataset. Subsequently, they utilize data augmentation and contrast-limited adaptive histogram equalization approaches to preprocess the images. The INBREAST dataset has 7632 photos after data augmentation, the MIAS dataset contains 3816 images, and the DDSM dataset contains 13128 images. Furthermore, they consolidate the INBREAST, MIAS, and DDSM datasets. The images' overall size was adjusted to 227*227 pixels [18].

This work utilized a dataset [18] in which each image was annotated with the matching breast density. The DICOM files containing the original pictures from the mammography database were transformed into PNG files. The initial 106 photos have undergone the application of contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE), a method used for image preparation. Furthermore, with CLAHE, the data is enhanced by rotating it at various angles (The values of θ are 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, and 330 degrees). Subsequently, the original and 11 rotated images are flipped horizontally and vertically. This approach has also been discovered to mitigate the problem of overfitting.

A breast cancer tumour can be categorized as either benign, indicating that it poses no threat to one's health, or malignant, indicating that it has the potential to be destructive and deadly. Benign tumours are non-malignant as their cells closely resemble normal cells; they grow gradually and do not infiltrate nearby tissues or metastasize to other body areas. Malignant tumours are characterized by their malignant nature. If left untreated, malignant cells have the potential to metastasize and spread to other regions of the body, extending beyond the boundaries of the initial tumour. Malignant tumours are lethal due to their dramatically faster growth rate compared to benign tumours.

Augmented MIAS Dataset

This study utilized the augmented MIAS dataset, which included PNG images. The dataset included 2456 samples labelled as Benign and 1440 as Malignant.

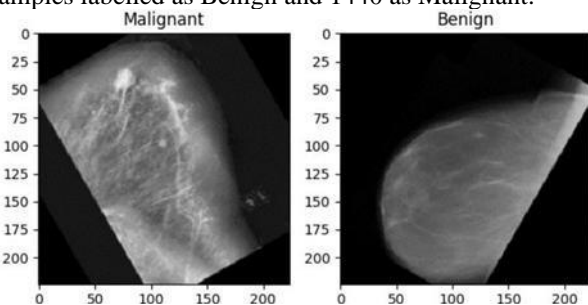


Figure 2. Some images from the Augmented MIAS dataset and their classes

Figure 2 shows two classes of mammogram images: benign and malignant. Benign is the type of tumour with good behaviour, while malignant is the tumour type with bad behaviour. Benigns often have a modest growth rate, a small geographic range, and a capsule surrounding them to prevent direct interaction with nearby tissues. Benign tumours do not exhibit metastases. Malignant is a type of tumour that can be considered cancer. A primary tumour is a malignant growth originating in a specific body location. Conversely, the tumours that develop in other parts of the body due to this tumour are called metastases.

Augmented INBREAST Dataset

For this investigation, we utilized the augmented INBREAST dataset, comprising 2520 images classified as Benign and 5112 images classified as Malignant.

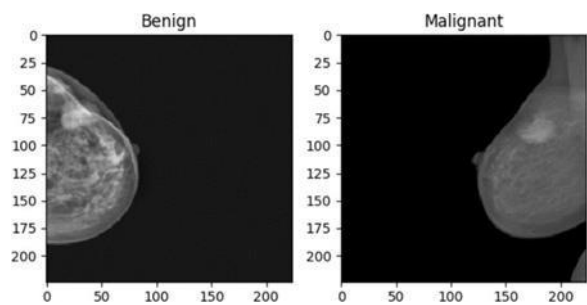


Figure 3. Some images extracted from the augmented INBREAST dataset and their corresponding class labels are displayed.

Figure 3 shows an image for each class of the augmented INBREAST dataset.

Deep Learning Models

Artificial Intelligence technologies are improving day by day. Deep learning models are beneficial when there is a high level of computational complexity and a need to classify massive datasets. Over the past ten years, deep learning in histopathology has gained interest due to its state-of-the-art performance in tasks including classification and localization. Convolutional neural networks are deep learning frameworks that produce impressive results in tissue image processing. Deep learning makes it possible to learn directly from data. Deep learning is a method of image classification that uses many data to achieve highly successful results using a complex model. In this study, we are therefore using fourteen deep learning models, described in more detail below, to classify images of breast cancer. Apart from the existing models, we developed a new Hybrid Attention VGG model, to increase success in this classification problem.

For this purpose, we used Google Colab and L4 cloud GPU, which has 24 GB VRAM memory for calculation. We set the hyperparameter values as epoch=25 and optimizer="Adam". We used models trained on the ImageNet [19] dataset through fine-tuning and Transfer Learning.

Transfer Learning[20] is a machine learning technique that leverages acquired information from one activity to enhance performance on a related task. This approach has been extensively implemented in diverse domains, including computer vision, natural language processing, and speech recognition.

This study tested different hyperparameter values for both datasets and deep learning models as hyperparameter optimization. We tried a learning rate of 0.001 and 0.0001. We conducted our analysis using batch size values of 16, 32, and 64. To get better results, during the training phase of the model, we assign the same values to the hyperparameters for all models. Within the data splitting stage, a specific portion of the data set, amounting to 15%, is allocated as the test set. The validation set comprises 20% of the data. During the training phase, the models processed the data in PNG image format containing only two class labels: Benign and Malignant. In the study, we classified the characteristics of the tumour images using only images with tumours. We utilized accuracy, precision, recall, f1-measure, Cohen Kappa score, and Roc auc score as performance metrics to compare and evaluate the classification models. In addition, we utilized a confusion matrix to assess the outcomes.

Vgg-16 : VGG16 comprises three completely connected layers and thirteen interconnected convolutional layers. The initial two convolutional layers consist of 64 filters, each with a dimension of 3×3 . Subsequently, there are two further layers, each composed of 128 filters, two layers with 256 filters, two layers with 512 filters, and ultimately, the last layer with 512 filters. Beyond the layers of convolution, there are three fully linked layers, each composed of 4096 neurons. Subsequently, there is a classification layer with 1000 neurons. [21].

Vgg-19 : VGG19 comprises 19 layers: 16 convolutional and three fully connected. The first two convolutional layers comprise 64 filters, measuring 3×3 pixels. These are then succeeded by two more layers, each containing 128 filters, followed by four layers with 256 filters, four layers with 512 filters, and finally, one layer with 512 filters. After the convolutional layers, there are three fully connected layers, each consisting of 4096 neurons, and a classification output layer with 1000 neurons. [22], [23].

DenseNet-121 : DenseNet contains two additional essential blocks in addition to the typical convolutional and pooling layers. The designs of the convolution block, pooling layer, transition layer, and classification layer are all shared by DenseNet's different versions. All DenseNet versions, however, have a distinct set of four DenseBlocks with various repeat times [24]. The first convolutional block consists of 64 filters with dimensions of 7×7 and a stride of two. Afterwards, a Max Pooling layer can be constructed with a stride of two and a 3×3 max pooling arrangement. A convolutional block is made up of the input layer, that is subsequently followed by the Batch Normalization, ReLU activation, and Conv2D layers. Every dense block has two convolutions with 1×1 and 3×3 kernel sizes.

DenseNet-121 [24] is a specific type of neural network architecture. The blocks denoted as "dense Block1," "dense Block2," "dense Block3," and "dense Block4" are iterated 6, 12, 24, and 16 times, correspondingly.

DenseNet-169 : DenseNet-169 [24] is a convolutional neural network architecture. The blocks denoted as "dense Block1," "dense Block2," "dense Block3," and "dense Block4" are replicated 6, 12, 32, and 32 times, respectively.

ResNet-50 : ResNet-50 [25] is a deep CNN design that circumvents the vanishing gradient problem by learning from deep networks through residual connections. Its fifty levels include convolutional layers, batch normalization layers, ReLU activation functions, and fully connected layers. Additionally, ResNet50 uses a skip connection to bypass a few network layers and efficiently learns high-level and low-level features.

ResNet-101 : The ResNet-101 architecture is composed of 101 layers. Based on the Residual neural network learning approach, this architecture is considered one of the most advanced architectures for ImageNet [19] due to its depth. Compared to other architectures, the primary distinguishing characteristic of Resnet-101 is its optimization of the discrepancies between the input and required convolution qualities. Obtaining desired characteristics is more effortless and effective than obtaining alternative designs. Therefore, residual optimization can be performed to decrease the number of parameters in a more complex network. To attain a more optimal result, it is possible to reduce the number of layers by minimizing the number of parameters [26].

The ResNet architecture incorporates a ResBlock layer to transfer information from the previous layer to the new layer, enabling the learning of information not captured in the prior layer. The ResBlock layer in the Resnet design transmits residual values to the subsequent layer. This skip connection, placed between the weight layers and the Relu activation code at every two-layer activation, modifies the system's output [27].

MobileNet : A deep learning architecture called MobileNet [28] is appropriate for quickly and precisely analyzing medical images, particularly regarding BC diagnosis. MobileNet's focus on computational efficiency makes it possible to extract information from mammography images efficiently, facilitating the identification of minute patterns or anomalies linked to breast cancer. MobileNet is perfect for contexts with limited resources since it optimizes memory consumption and computational effort through depthwise separable convolutions. Integrating the ReLU6 activation mechanism further improves efficiency and compatibility with medical imaging devices. MobileNet presents a valuable option for BC analysis, yielding precise outcomes with minimal computing overhead.

MobileNet-V2 : MobileNet-V2 [29] builds upon the Depthwise Separable technique used in MobileNetV1 and incorporates the residual structure. It has been discovered that the Rectified Linear Unit (ReLU) leads to significant information loss in feature maps with just a few channels. As a result, linear bottlenecks and inverted residuals were developed as solutions. MobileNet-V2 maintains the structural simplicity of MobileNet-V1, enabling the same level of precision without requiring additional specialised procedures. MobileNet-V2 is specifically designed to investigate the capabilities of neural networks and create a network architecture that is both simple and efficient. The research primarily focuses on two areas: the utilisation of optimization approaches, such as evolutionary algorithms and reinforcement learning, for conducting framework searches [30] and the management of the "BottleNeck" Structure [31]. MobileNet-V2 incorporates two crucial innovations: line bottlenecks and inverted residuals and implementing the 3×3 depth-separable convolution. The linear bottleneck arises due to the linear transformation of the "manifold of interest" region, which may have a non-zero value following the ReLU process. Furthermore, following the ReLU activation function, a portion of the channel information will be discarded. The rationale behind incorporating inverted residuals is that the bottleneck already encompasses the essential information. Hence, the shortcut immediately connects the two bottlenecks. Furthermore, initially increasing the dimensionality, followed by feature extraction and subsequent dimensionality reduction, is employed because of the higher significance of information in the low-dimensional space.

Inception-V3 : Inception-V3 model's input layer supports shape images (299, 299, 3). The input image performs spatial dimension reduction and fundamental attribute extraction by utilizing two convolutional layers, max pooling and batch normalization. Convolutional filters and pooling techniques are present in the Inception modules. The outputs of the concatenated modules pass on to the subsequent module. Modules 5 and 11 of the Inception introduce two more classifiers. Each consists of two fully connected layers with ReLU activation, a global average pooling layer, and a classification softmax layer. The ultimate layer includes a global average pooling layer, a classification softmax output layer, and a fully connected layer [32].

InceptionResNet-V2 : InceptionResNet-V2 is the combination of the Inception and ResNet networks. In its 164 layers, skip connections improve gradient propagation during training. The stem module, classification layer, and several Inception-ResNet-A, B, and C modules utilize convolutional, pooling, and activation layers to analyse images. The Inception-ResNet-A, B, and C modules gather features at various scales using max pooling and 1×1 convolutions. Ultimately, the classification layer generates class predictions using a fully linked layer and a global average pooling layer [33].

Xception: Xception is a complex neural network structure that utilizes Depthwise Separable Convolutions. Google employee researchers developed this technology. Google introduced the concept of Inception modules in convolutional neural networks as a transitional stage between ordinary convolution and the depthwise separable convolution operation, which involves doing a depthwise convolution followed by a pointwise convolution [34].

NasNetMobile : Nasnet is a convolutional neural network (CNN) architecture designed to be scalable. It is developed using a process called neural architecture search. The architecture comprises fundamental building blocks called cells optimised via reinforcement learning [35]. A cell consists of limited processes, including separable convolutions and pooling, and is iterated numerous times based on the desired network capacity. The mobile version, known as Nasnet-Mobile, comprises 12 cells and has 5.3 million parameters and 564 million multiply-accumulates (MACs).

EfficientNetV2B0 : EfficientNetV2B0 [41] is the smallest and most fundamental variant of the EfficientNet [41] series, engineered as a convolutional neural network to optimize efficiency in deep learning applications. The model seeks high accuracy with a reduced number of parameters by the "compound scaling" method, which optimizes the equilibrium among width, depth, and resolution. Moreover, it is organized with Mobile Inverted Bottleneck Conv (MBCConv) blocks, which provide rapid and efficient computing.

The model exhibits remarkable efficacy, especially in image classification, object detection, and image segmentation. Employing data augmentation techniques during training enables favourable outcomes even with limited data. EfficientNetV2b0, providing a robust alternative for research and practical applications, has a significant position in deep learning.

EfficientNetV2L : EfficientNetV2L [41], a larger and more potent iteration of the EfficientNet series, delivers enhanced performance on intricate jobs owing to its increased number of layers and parameters. EfficientNetV2L employs a "compound scaling" methodology to improve the equilibrium among breadth, depth, and resolution, whereas EfficientNetV2B0 is a more compact model intended for operation with reduced resources. Furthermore, EfficientNetV2L leverages enhanced training methodologies and optimised MBConv blocks, enabling it to attain superior accuracy with extensive datasets. Thus, EfficientNetV2L is superior for large-scale applications, while EfficientNetV2B0 delivers rapid and efficient outcomes with reduced resource demands.

Hybrid Attention VGG (Proposed Method):

Initially, in creating this proposed model, VGG-16, VGG-19, ResNet50, and ResNet101 were experimented with as basis models. After comparing the performances of the models produced from these basic models on two datasets, it was decided to choose VGG16 as the base model. When we take the VGG16 model as the base, it has been observed that the Hybrid Attention Network is more successful in most hyperparameter values and both datasets.

Model Architecture:

The HybridAttentionVGG model is constructed by extending the pre-trained VGG16 model with the following architecture:

The VGG16 model, in its base form, is utilised without including the completely connected layers at the top. It acts as the feature extractor, using its deep and well-established convolutional layers to capture intricate visual features.

The Hybrid Attention Block is a newly introduced one that follows the VGG16 base architecture. This block applies Global Average Pooling to capture the overall context of the input.

It employs dense layers to acquire channel-wise attention weights highlighting the most significant characteristics.

The original and attention-refined feature maps are combined using a skip link, guaranteeing raw and refined information preservation.

Flatten Layer: Transforms the two-dimensional output from the attention block into a one-dimensional feature vector, which can be used as input for dense layers.

A fully connected layer is included, incorporating Batch Normalization and Dropout techniques to enhance feature learning and regularization.

The output layer comprises a dense layer employing a softmax activation function for classification.

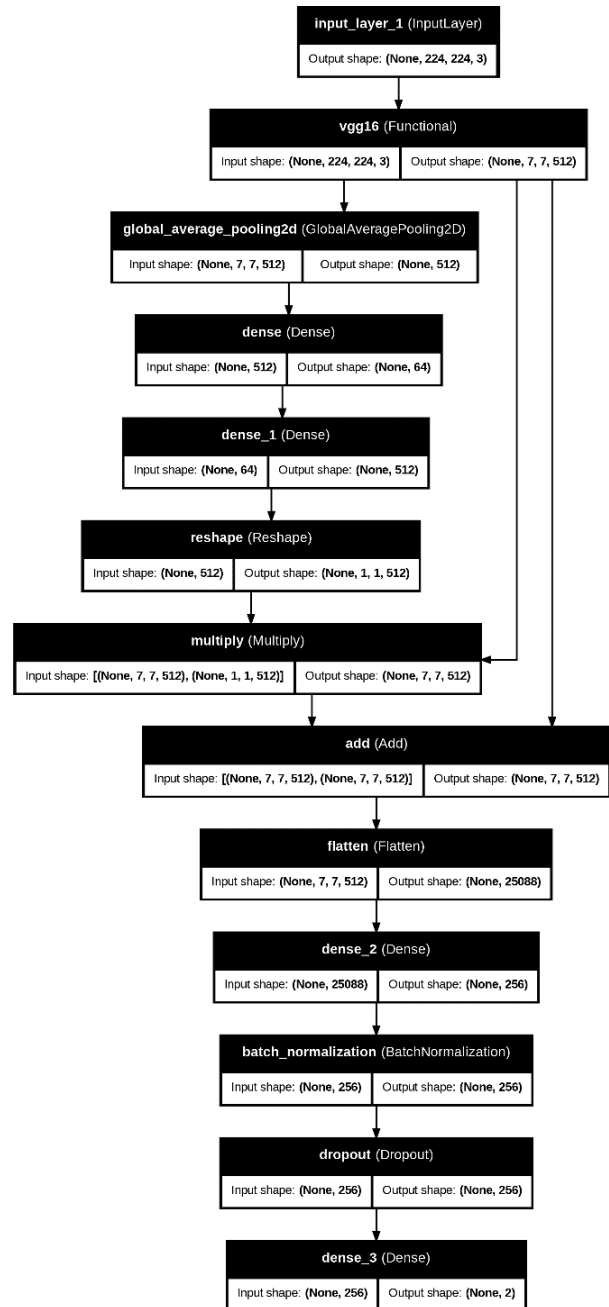


Figure 4. The layers of the proposed model and the connections between the architecture of the proposed model

Figure 4 depicts the structure of this model. The HybridAttentionVGG model improves upon the pre-trained VGG16 architecture by incorporating a novel Hybrid Attention Block to enhance learning features. This block utilizes global average pooling to capture the overall context and employs dense layers to calculate attention weights for each channel, highlighting significant aspects. The model uses a skip connection to combine the initial VGG16 output with the attention-refined features, preserving unprocessed and enhanced information to enhance learning. After that, the model employs flattened and fully linked layers using Batch Normalization and

Dropout to analyse the features further before performing classification. The new integration of attention techniques and classic CNN layers achieves a favourable equilibrium between simplicity and improved performance, rendering it highly suitable for applications requiring concentrated feature extraction.

Essential Architectural Elements:

The VGG16 base model is a powerful feature extractor pre-trained on the ImageNet[19] dataset. It is well-regarded for its straightforward design and effectiveness in extracting hierarchical features.

The Hybrid Attention Block is this concept's core breakthrough. The system dynamically adjusts the feature maps, taking into account their significance, and then merges them with the original features using a skip connection.

A dense layer with batch normalization and dropout enhances the recovered features from the attention block and mitigates the risk of overfitting.

The Softmax Output Layer generates probability distributions for classification problems.

Significance of this Model:

Blends straightforwardness and ingenuity: This model successfully integrates VGG16's straightforwardness with a lightweight yet potent attention mechanism, effectively closing the divide between user-friendliness and improved performance.

Enhanced Feature Learning: By incorporating an attention mechanism, the model acquires the ability to concentrate on the most significant characteristics. This has the potential to enhance performance on tasks that require highlighting critical aspects, such as object detection and medical imaging.

The model is both flexible and lightweight, as it does not substantially increase computational complexity compared to the base VGG16. This makes it well-suited for applications with limited resources.

Benefits of HybridAttentionVGG:

The attention block improves feature representation by selectively emphasising the most pertinent regions of the image. This results in improved generalisation, particularly on intricate datasets where not all features have the same significance level.

The benefits of skip connections lie in the ability to merge raw and refined features, allowing the model to preserve a broader range of information. This reduces the likelihood of losing potentially valuable information that the attention mechanism could overlook.

Regularisation techniques such as Batch Normalization and Dropout are employed in the dense layers to enhance training stability and mitigate overfitting, which is especially crucial in deep learning models.

The use of a pre-trained VGG16 model in transfer learning becomes advantageous, particularly in scenarios with a

scarcity of data. The model can rapidly adjust to new tasks by making small adjustments to a smaller number of layers.

Effortlessness and straightforwardness of implementation: The architecture is uncomplicated to execute, alter, and comprehend. This makes it an excellent option for practitioners exploring attention mechanisms without delving into excessively intricate models such as transformers.

Drawbacks of Hybrid Attention:

Possible Exaggeration of Specific Features: The attention mechanism can excessively concentrate on some features, potentially disregarding other features that may be less apparent but nonetheless significant for certain activities.

Limitations of Dependency on VGG16: While serving as a robust benchmark, VGG16 is rather outdated compared to more recent architectures like ResNet or EfficientNet. The model may not utilise certain advanced strategies included in such models, such as residual connections or advanced activation functions.

Utilisation Scenarios and Prospective Implementations:

Medical imaging: The attention mechanism can be utilised in tasks such as tumour identification to prioritise the most significant regions over others, hence enhancing the focus on the most relevant parts.

Object Detection and Localisation: This approach applies when certain regions of a picture hold more importance than others, such as identifying particular objects in crowded scenes.

Satellite Image Analysis: Attention processes can be used in remote sensing to improve predictions by enhancing the ability to differentiate between small characteristics in huge images.

Performance Metrics

Fourteen deep-learning models and the proposed model were analyzed using augmented mammogram images from MIAS and INBREAST datasets. Comparisons with other deep learning models have been made to demonstrate the algorithm's superiority in breast cancer diagnosis. This classification's most commonly used comparison criteria are accuracy, precision, recall, F1-score, Cohen Kappa score, Roc Auc score and confusion matrices.

Accuracy : Accuracy is the ratio of correctly identified samples in the evaluation dataset to the total number of samples. This metric is frequently used in machine learning applications in the medical field, but it is also notorious for its potential to mislead when dealing with imbalanced class distributions. This is because reaching high accuracy can be easily accomplished by assigning all samples to the dominant class. The accuracy is limited to a range of 0 to 1. A value of 1 indicates that all positive and negative samples are correctly predicted, while 0 indicates that none of the positive or negative samples are predicted correctly.

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

Precision : Precision is the measure of the ratio of correctly identified samples to all samples assigned to a particular class, indicating the proportion of relevant retrieved samples. It is a quantitative measure that fluctuates between 0 and 1. A precision score of 1 signifies that all samples in the class were accurately predicted, while a score of 0 indicates that no valid predictions were produced.

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

Recall : The recall, often referred to as the sensitivity or True Positive Rate (TPR), represents the proportion of positive samples that are accurately classified. It is computed by dividing the number of correctly classified positive samples by the total number allocated to the positive class. The recall metric is defined within the range of [0, 1], with 1 indicating a precise prediction of the positive class and 0 indicating an inaccurate prediction of all positive class samples. This statistic is considered one of the most crucial in medical studies because it aims to minimize missed positive cases, resulting in a high recall rate.

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

F1 Score : The F1 score is computed by calculating the mean harmonic of precision and recall, resulting in a measure penalizing excessive values of either metric. This metric exhibits asymmetry between the classes, meaning that its value is contingent upon the designation of one class as positive and the other as negative. For instance, if there is a significant positive class and a classifier inclined towards this majority, the F1 score, which is directly related to the true positive (TP) rate, would be high. Modifying the class labels to make the negative class the dominant one and introducing a bias towards the negative class in the classifier will decrease the F1 score, even though there have been no changes in the data or the distribution of classes. The F1-score is constrained within the range of [0, 1], with 1 indicating the highest precision and recall and 0 indicating no precision or recall.

$$F1\ Score = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN} \quad (4)$$

Cohen Kappa Score : The reliability of raters for inter-rater and intra-rater agreement in categorising data can be assessed using Cohen's Kappa value (K). Due to its consideration of the possibility of coincidental agreement, most individuals perceive it as a more precise method to measure agreement than a straightforward percentage agreement. While it can be adapted for situations involving more than two raters, it is commonly used in contexts where there are just two raters. In binary classification models, one

rater acts as the classification model, while the second is an observer who knows the true classifications for each record or dataset. Cohen's Kappa considers the level of agreement amongst raters in terms of both true positives and negatives, as well as false positives and negatives. Cohen and Kappa can assess overall agreement and agreement by considering random factors. The Cohen's Kappa score (κ) is a metric used to evaluate the performance of classification models by measuring the level of agreement between two raters: a real-world observer and the classification model. It considers both the perfect agreement and the agreement that could occur by chance. P_o is the measured level of agreement between the raters. P_e represents the probability of obtaining an agreement by chance.

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (5)$$

Roc Auc Score : The Receiver Operating Characteristics (ROC) is a statistical measure that evaluates the performance of a binary classification model. The ROC curve is a visual depiction of the performance of a binary classification model. ROC is an acronym for receiver operating characteristics. The function visually illustrates the correlation between the true positive rate (TPR) and the false positive rate (FPR) at different categorisation thresholds.

The Area Under Curve (AUC) is a quantitative measure representing the extent of the region bounded by the ROC curve. The metric evaluates the holistic effectiveness of the binary classification model. Since both the true positive rate (TPR) and the false positive rate (FPR) have values between 0 and 1, the area under the curve (AUC) will also always fall within this range. A higher value of AUC indicates superior model performance. The primary objective is to optimize the area to achieve the maximum true positive rate (TPR) and the lowest false positive rate (FPR) at the specified threshold. The AUC quantifies the likelihood that the model would assign a higher predicted probability to a randomly selected positive case than a randomly selected negative instance.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (7)$$

Confusion Matrix : Confusion matrices are utilised to assess the efficacy of machine learning algorithms by contrasting their predictions with the data's actual labels. The predictions are organised in a grid structure, with rows representing the predicted classes and columns representing the actual classes. This configuration facilitates the comprehension of the model's performance in classified various classes. The matrix has measures such as True Positive (accurately predicted positive samples), True Negative (accurately predicted negative samples), False Positive (incorrectly classified negative samples), and False

Negative (incorrectly classified positive samples). The selection of the null hypothesis determines how these metrics are interpreted within the matrix.

Results

In our study, the models were trained on two datasets: the Augmented MIAS and the Augmented INBREAST. In addition to the existing fourteen deep learning models,

our proposed HybridAttentionVGG model has utilized different hyperparameter values with learning rates of 0.001 and 0.0001, and batch sizes of 16, 32, and 64. The model was trained using the pre-trained ImageNet[19] model by transfer learning, utilizing the Adam optimizer for 25 epochs. The accuracy, precision, recall, F1-score, Cohen's kappa score, and ROC AUC score values of these models are shown in Figure 5 and Figure 6.

DEEP LEARNING MODELS	PERFORMANCE METRICS	AUGMENTED MIAS DATASET						AUGMENTED INBREAST DATASET					
		LEARNING RATE=0.001			LEARNING RATE=0.0001			LEARNING RATE=0.001			LEARNING RATE=0.0001		
		16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH
VGG16	ACCURACY	0.9294	0.9085	0.9229	0.9033	0.8810	0.8850	0.9601	0.9332	0.9411	0.9463	0.9496	0.9437
	PRECISION	0.9293	0.9090	0.9227	0.9030	0.8818	0.8848	0.9603	0.9339	0.9412	0.9461	0.9500	0.9437
	RECALL	0.9294	0.9085	0.9229	0.9033	0.8810	0.8850	0.9601	0.9332	0.9411	0.9463	0.9496	0.9437
	F1 SCORE	0.9291	0.9072	0.9223	0.9031	0.8797	0.8841	0.9601	0.9323	0.9405	0.9461	0.9497	0.9437
	COHEN KAPPA SCORE	0.8482	0.7953	0.8299	0.7931	0.7462	0.7549	0.9112	0.8474	0.8676	0.8780	0.8858	0.8756
	ROC AUC SCORE	0.9566	0.9439	0.9555	0.9498	0.9400	0.9339	0.9792	0.9526	0.9688	0.9862	0.9833	0.9785
VGG19	ACCURACY	0.9020	0.8928	0.9359	0.8902	0.9046	0.8850	0.8926	0.9168	0.9358	0.9437	0.9450	0.9240
	PRECISION	0.9120	0.8991	0.9358	0.8899	0.9043	0.8843	0.9098	0.9232	0.9355	0.9435	0.9448	0.9236
	RECALL	0.9020	0.8928	0.9359	0.8902	0.9046	0.8850	0.8926	0.9168	0.9358	0.9437	0.9450	0.9240
	F1 SCORE	0.9032	0.8937	0.9359	0.8900	0.9044	0.8838	0.8949	0.9136	0.9356	0.9435	0.9449	0.9237
	COHEN KAPPA SCORE	0.7972	0.7799	0.8638	0.7651	0.7982	0.7457	0.7742	0.7974	0.8535	0.8706	0.8760	0.8286
	ROC AUC SCORE	0.9579	0.9412	0.9781	0.9486	0.9593	0.9422	0.9593	0.9443	0.9673	0.9813	0.9782	0.9708
RESNET50	ACCURACY	0.9346	0.9307	0.9124	0.9503	0.9346	0.9150	0.9090	0.9175	0.9070	0.9443	0.9476	0.9332
	PRECISION	0.9344	0.9311	0.9121	0.9504	0.9359	0.9149	0.9143	0.9178	0.9106	0.9443	0.9476	0.9332
	RECALL	0.9346	0.9307	0.9124	0.9503	0.9346	0.9150	0.9090	0.9175	0.9070	0.9443	0.9476	0.9332
	F1 SCORE	0.9342	0.9309	0.9122	0.9502	0.9341	0.9147	0.9060	0.9162	0.9079	0.9443	0.9476	0.9346
	COHEN KAPPA SCORE	0.8530	0.8471	0.8091	0.8952	0.8632	0.8199	0.7860	0.8108	0.7954	0.8739	0.8794	0.8550
	ROC AUC SCORE	0.9566	0.9535	0.9750	0.9904	0.9881	0.9746	0.9196	0.9344	0.9607	0.9815	0.9893	0.9829
RESNET101	ACCURACY	0.9020	0.9007	0.9320	0.9268	0.9399	0.9229	0.9352	0.9319	0.9312	0.9515	0.9581	0.9496
	PRECISION	0.9072	0.9008	0.9319	0.9274	0.9404	0.9249	0.9351	0.9335	0.9315	0.9516	0.9580	0.9494
	RECALL	0.9020	0.9007	0.9320	0.9268	0.9399	0.9229	0.9352	0.9319	0.9312	0.9515	0.9581	0.9496
	F1 SCORE	0.8997	0.9007	0.9316	0.9261	0.9394	0.9218	0.9352	0.9324	0.9314	0.9512	0.9579	0.9494
	COHEN KAPPA SCORE	0.7852	0.7906	0.8517	0.8407	0.8705	0.8320	0.8552	0.8470	0.8433	0.8916	0.9036	0.8806
	ROC AUC SCORE	0.9171	0.9453	0.9744	0.9804	0.9865	0.9800	0.9512	0.9593	0.9642	0.9864	0.9908	0.9830
DENSENET121	ACCURACY	0.8222	0.8144	0.8510	0.8039	0.8327	0.8392	0.8474	0.8677	0.8782	0.8887	0.8716	0.8677
	PRECISION	0.8211	0.8155	0.8528	0.8054	0.8323	0.8448	0.8660	0.8700	0.8813	0.8905	0.8796	0.8712
	RECALL	0.8222	0.8144	0.8510	0.8039	0.8327	0.8392	0.8474	0.8677	0.8782	0.8887	0.8716	0.8677
	F1 SCORE	0.8215	0.8084	0.8517	0.8044	0.8307	0.8406	0.8506	0.8630	0.8740	0.8893	0.8736	0.8689
	COHEN KAPPA SCORE	0.6128	0.5840	0.6790	0.5972	0.6448	0.6647	0.6793	0.6871	0.7136	0.7536	0.7197	0.7062
	ROC AUC SCORE	0.8435	0.8309	0.8904	0.8729	0.8774	0.8969	0.9270	0.9060	0.9315	0.9394	0.9424	0.9289
DENSENET169	ACCURACY	0.8170	0.8314	0.8000	0.8261	0.8209	0.8366	0.8841	0.8559	0.8468	0.9057	0.8946	0.8965
	PRECISION	0.8163	0.8299	0.8130	0.8245	0.8283	0.8347	0.8893	0.8601	0.8614	0.9050	0.8939	0.8957
	RECALL	0.8170	0.8314	0.8000	0.8261	0.8209	0.8366	0.8841	0.8559	0.8468	0.9057	0.8946	0.8965
	F1 SCORE	0.8128	0.8298	0.8021	0.8230	0.8227	0.8344	0.8855	0.8496	0.8500	0.9050	0.8941	0.8960
	COHEN KAPPA SCORE	0.5956	0.6339	0.5948	0.6133	0.6284	0.6354	0.7114	0.6576	0.6698	0.7839	0.7605	0.7608
	ROC AUC SCORE	0.8452	0.8574	0.8712	0.8744	0.9002	0.8885	0.9205	0.8853	0.9178	0.9541	0.9415	0.9454
MOBILENET	ACCURACY	0.8641	0.8614	0.8732	0.8706	0.8680	0.8601	0.8356	0.8441	0.8546	0.8684	0.8631	0.8605
	PRECISION	0.8677	0.8604	0.8726	0.8790	0.8671	0.8592	0.8401	0.8506	0.8524	0.8672	0.8643	0.8587
	RECALL	0.8641	0.8614	0.8732	0.8706	0.8680	0.8601	0.8356	0.8441	0.8546	0.8684	0.8631	0.8605
	F1 SCORE	0.8601	0.8606	0.8725	0.8725	0.8673	0.8585	0.8275	0.8462	0.8524	0.8676	0.8636	0.8582
	COHEN KAPPA SCORE	0.6955	0.6952	0.7291	0.7221	0.7132	0.6929	0.6100	0.6484	0.6585	0.6959	0.6922	0.6756
	ROC AUC SCORE	0.9010	0.9261	0.9433	0.9376	0.9220	0.9334	0.8573	0.9062	0.9094	0.9194	0.9194	0.9071
MOBILENETV2	ACCURACY	0.8170	0.8275	0.8379	0.8523	0.8327	0.8444	0.8507	0.8356	0.8527	0.8369	0.8664	0.8723
	PRECISION	0.8258	0.8252	0.8368	0.8518	0.8310	0.8442	0.8525	0.8332	0.8534	0.8473	0.8658	0.8713
	RECALL	0.8170	0.8275	0.8379	0.8523	0.8327	0.8444	0.8507	0.8356	0.8527	0.8369	0.8664	0.8723
	F1 SCORE	0.8050	0.8245	0.8367	0.8508	0.8308	0.8430	0.8433	0.8328	0.8530	0.8399	0.8661	0.8701
	COHEN KAPPA SCORE	0.5606	0.6111	0.6530	0.6943	0.6323	0.6724	0.6292	0.6230	0.6610	0.6368	0.6948	0.7065
	ROC AUC SCORE	0.8493	0.9015	0.8922	0.9083	0.8935	0.9183	0.8529	0.8840	0.9108	0.9079	0.9321	0.9104

Figure 5. The performance metrics of the first eight deep learning models trained on two different datasets and the different hyperparameter values of these models.

DEEP LEARNING MODELS		AUGMENTED MIAS DATASET						AUGMENTED INBREAST DATASET					
		LEARNING RATE=0.001			LEARNING RATE=0.0001			LEARNING RATE=0.001			LEARNING RATE=0.0001		
		16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH
INCEPTIONV3	ACCURACY	0.7725	0.7830	0.7608	0.8000	0.7542	0.7804	0.7957	0.7446	0.7819	0.7917	0.7669	0.7976
	PRECISION	0.7854	0.7864	0.7572	0.8006	0.7609	0.7949	0.7921	0.7628	0.7780	0.7855	0.7751	0.7990
	RECALL	0.7725	0.7830	0.7608	0.8000	0.7542	0.7804	0.7957	0.7446	0.7819	0.7917	0.7669	0.7976
	F1 SCORE	0.7561	0.7712	0.7556	0.7907	0.7562	0.7838	0.7886	0.7033	0.7769	0.7842	0.7401	0.7983
	COHEN KAPPA SCORE	0.4753	0.4987	0.4746	0.5329	0.4916	0.5433	0.5226	0.3200	0.5086	0.4933	0.3986	0.5335
	ROC AUC SCORE	0.7425	0.7598	0.7633	0.8097	0.7998	0.8194	0.7754	0.6878	0.7990	0.8279	0.8285	0.8222
INCEPTIONRESNETV2	ACCURACY	0.6458	0.6379	0.6340	0.6418	0.6706	0.6706	0.6811	0.6857	0.6889	0.6660	0.6424	0.6902
	PRECISION	0.6500	0.6161	0.6605	0.6507	0.6589	0.6590	0.6410	0.6569	0.6600	0.6434	0.6141	0.6433
	RECALL	0.6458	0.6379	0.6340	0.6418	0.6706	0.6706	0.6811	0.6857	0.6889	0.6660	0.6424	0.6902
	F1 SCORE	0.6476	0.6122	0.6404	0.6454	0.6592	0.6426	0.6480	0.6596	0.6307	0.6465	0.6226	0.6340
	COHEN KAPPA SCORE	0.2560	0.1577	0.2563	0.2350	0.2595	0.2314	0.1211	0.1822	0.1415	0.1875	0.1043	0.1061
	ROC AUC SCORE	0.6384	0.6014	0.6652	0.6402	0.6815	0.6478	0.5571	0.5917	0.5723	0.6083	0.6055	0.6052
XCEPTION	ACCURACY	0.7634	0.7686	0.7830	0.7634	0.7961	0.7856	0.8016	0.7590	0.7682	0.7695	0.7721	0.8101
	PRECISION	0.7811	0.7653	0.7813	0.7846	0.7971	0.7849	0.7967	0.7619	0.7690	0.7785	0.7720	0.8043
	RECALL	0.7634	0.7686	0.7830	0.7634	0.7961	0.7856	0.8016	0.7590	0.7682	0.7695	0.7721	0.8101
	F1 SCORE	0.7677	0.7650	0.7776	0.7671	0.7856	0.7852	0.7982	0.7603	0.7521	0.7728	0.7483	0.8050
	COHEN KAPPA SCORE	0.5047	0.4952	0.5228	0.5189	0.5204	0.5266	0.5173	0.4600	0.4437	0.4857	0.4011	0.5273
	ROC AUC SCORE	0.7908	0.7699	0.7825	0.8389	0.8196	0.8058	0.7868	0.7720	0.7697	0.8135	0.8023	0.8413
NASNETMOBILE	ACCURACY	0.7752	0.7869	0.7948	0.7765	0.8092	0.7804	0.7610	0.7577	0.7328	0.7498	0.7813	0.7551
	PRECISION	0.7706	0.7867	0.7929	0.7779	0.8074	0.7760	0.7553	0.7519	0.7688	0.7563	0.7747	0.7578
	RECALL	0.7752	0.7869	0.7948	0.7765	0.8092	0.7804	0.7610	0.7577	0.7328	0.7498	0.7813	0.7551
	F1 SCORE	0.7708	0.7791	0.7924	0.7771	0.8071	0.7766	0.7558	0.7394	0.7417	0.7524	0.7732	0.7563
	COHEN KAPPA SCORE	0.4915	0.5200	0.5602	0.5320	0.5894	0.5020	0.4542	0.3967	0.4304	0.4486	0.4738	0.4573
	ROC AUC SCORE	0.7975	0.7917	0.8279	0.8135	0.8139	0.8300	0.7747	0.7834	0.7882	0.7849	0.8016	0.7794
EFFICIENTNET V2B0	ACCURACY	0.9412	0.9556	0.9438	0.9647	0.9752	0.9699	0.9476	0.9398	0.9535	0.9686	0.9398	0.9725
	PRECISION	0.9456	0.9557	0.9480	0.9651	0.9753	0.9704	0.9494	0.9433	0.9558	0.9686	0.9462	0.9728
	RECALL	0.9412	0.9556	0.9438	0.9647	0.9752	0.9699	0.9476	0.9398	0.9535	0.9686	0.9398	0.9725
	F1 SCORE	0.9400	0.9556	0.9429	0.9645	0.9752	0.9697	0.9480	0.9381	0.9540	0.9684	0.9407	0.9723
	COHEN KAPPA SCORE	0.8692	0.9082	0.8790	0.9246	0.9468	0.9340	0.8852	0.8548	0.8941	0.9274	0.8692	0.9372
	ROC AUC SCORE	0.9779	0.9887	0.9904	0.9978	0.9964	0.9962	0.9882	0.9743	0.9934	0.9955	0.9917	0.9969
EFFICIENTNET V2L	ACCURACY	0.9556	0.9216	0.9699	0.9582	0.9542	0.9556	0.9234	0.9509	0.9378	0.9764	0.9725	0.9738
	PRECISION	0.9582	0.9240	0.9706	0.9604	0.9544	0.9576	0.9247	0.9512	0.9378	0.9768	0.9725	0.9738
	RECALL	0.9556	0.9216	0.9699	0.9582	0.9542	0.9556	0.9234	0.9509	0.9378	0.9764	0.9725	0.9738
	F1 SCORE	0.9559	0.9220	0.9700	0.9576	0.9543	0.9549	0.9238	0.9504	0.9378	0.9765	0.9725	0.9738
	COHEN KAPPA SCORE	0.9057	0.8371	0.9364	0.9079	0.9036	0.9009	0.8277	0.8862	0.8570	0.9464	0.9380	0.9411
	ROC AUC SCORE	0.9904	0.9824	0.9967	0.9977	0.9925	0.9948	0.9692	0.9905	0.9808	0.9959	0.9943	0.9960
HYBRID ATTENTION VGG-16 (OUR PROPOSED MODEL)	ACCURACY	0.9399	0.9556	0.8601	0.9490	0.9399	0.9359	0.9646	0.9725	0.9653	0.9790	0.9620	0.9718
	PRECISION	0.9405	0.9555	0.8668	0.9490	0.9399	0.9371	0.9655	0.9725	0.9652	0.9791	0.9619	0.9718
	RECALL	0.9399	0.9556	0.8601	0.9490	0.9399	0.9359	0.9646	0.9725	0.9653	0.9790	0.9620	0.9718
	F1 SCORE	0.9393	0.9555	0.8624	0.9488	0.9399	0.9362	0.9648	0.9724	0.9652	0.9791	0.9618	0.9717
	COHEN KAPPA SCORE	0.8680	0.9027	0.7185	0.8885	0.8724	0.8633	0.9223	0.9386	0.9205	0.9532	0.9119	0.9343
	ROC AUC SCORE	0.9899	0.9894	0.9735	0.9870	0.9915	0.9869	0.9940	0.9974	0.9945	0.9974	0.9890	0.9931
PERFORMANCE METRICS OF THE TOP-PERFORMING MODELS	BEST MODEL(BEFORE)	EFFICIENT NET V2L	EFFICIENT NET V2B0	EFFICIENT NET V2L	EFFICIENT NET V2B0	EFFICIENT NET V2B0	EFFICIENT NET V2B0	VGG16	EFFICIENT NET V2L	EFFICIENT NET V2B0	EFFICIENT NET V2L	EFFICIENT NET V2L	EFFICIENT NET V2L
	ACCURACY	0.9556	0.9556	0.9699	0.9647	0.9752	0.9699	0.9601	0.9509	0.9535	0.9764	0.9725	0.9738
	F1 SCORE	0.9559	0.9556	0.9700	0.9645	0.9752	0.9697	0.9601	0.9504	0.9540	0.9765	0.9725	0.9738
	BEST MODEL(AFTER)	EFFICIENT NET V2L	PROPOSED, EFFICIENT NET V2B0	EFFICIENT NET V2L	EFFICIENT NET V2B0	EFFICIENT NET V2B0	EFFICIENT NET V2B0	PROPOSED	PROPOSED	PROPOSED	PROPOSED	EFFICIENT NET V2L	EFFICIENT NET V2L
	ACCURACY	0.9556	0.9556	0.9699	0.9647	0.9752	0.9699	0.9646	0.9725	0.9653	0.9790	0.9725	0.9738
	F1 SCORE	0.9559	0.9555, 0.9556	0.9700	0.9645	0.9752	0.9697	0.9648	0.9724	0.9652	0.9791	0.9725	0.9738

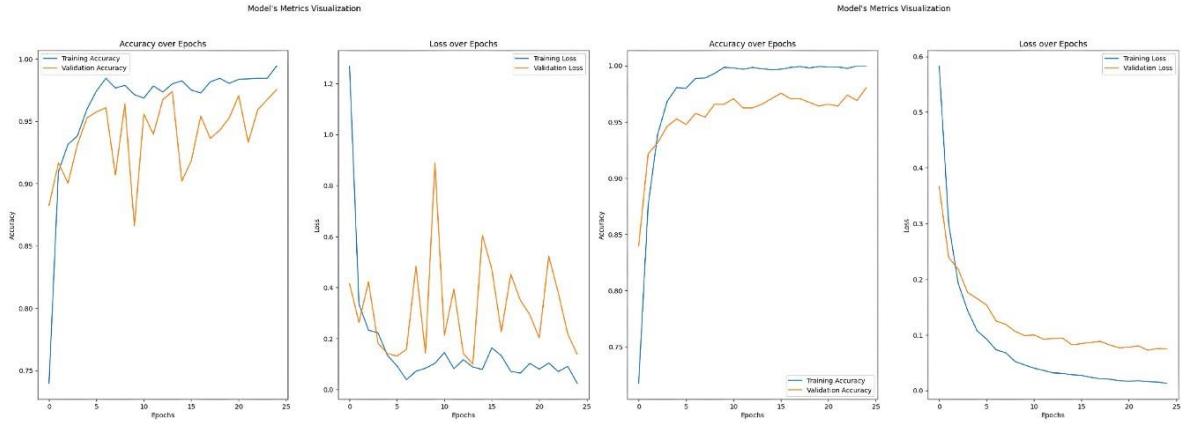
Figure 6. The performance metrics of six deep learning models trained later and the performance metrics of our proposed Hybrid Attention VGG model, comparing all models to determine some of the best models before and after our proposed model, as well as the Accuracy and F1-score values of these models.

Figure 6 displays the preceding and subsequent models that achieved the some of the highest level of success, alongside the Accuracy and F1-Score values employed for their evaluation and comparison. The models highlighted in red represent our models and some of the most influential models for each dataset.

Loss-Accuracy Graphs Before The Proposed Model Augmented MIAS Dataset

EfficientNetV2B0(lr=0.001,32 batch)

EfficientNetV2B0(lr=0.0001, 32 batch)



Augmented INBREAST Dataset

VGG16(lr=0.001,16 batch)

EfficientNetV2L(lr=0.0001, 16 batch)

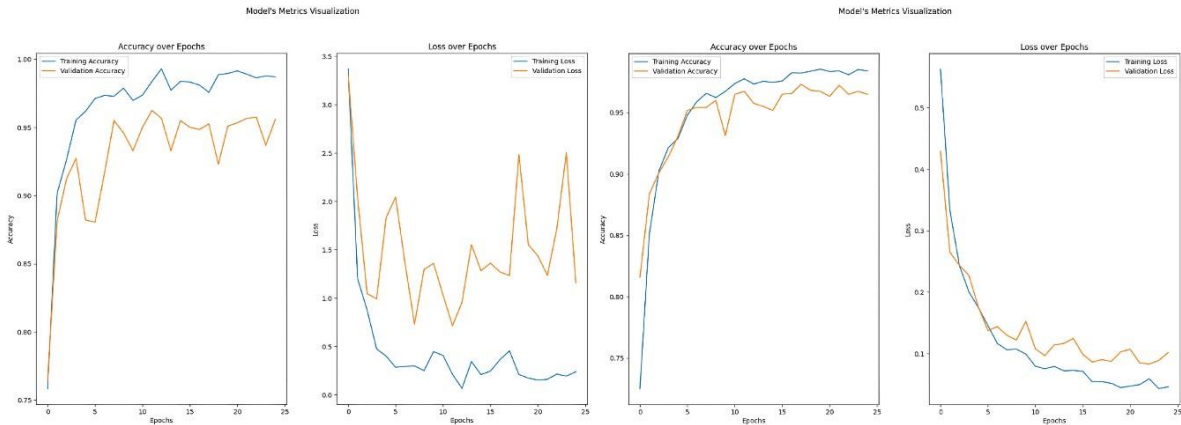
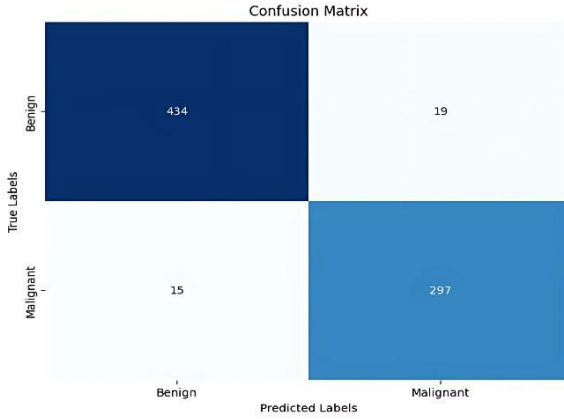


Figure 7. Before the proposed model, the loss and accuracy graphs of some of the most successful models based on the learning rate as a hyperparameter for two different datasets.

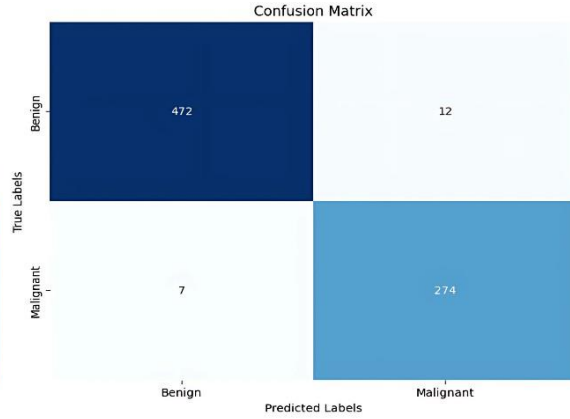
In Figure 7, the loss and accuracy values for training and validation are presented for some of the most successful models among the fourteen deep learning models before the proposed model, in both datasets and learning rates.

Confusion Matrices Before The Proposed Model Augmented MIAS Dataset

EfficientNetV2B0(lr=0.001,32 batch)

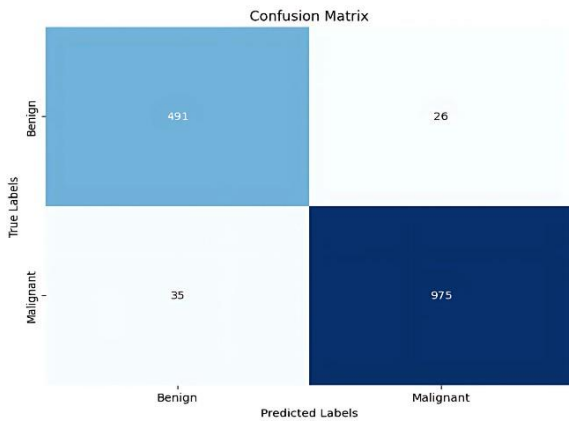


EfficientNetV2B0(lr=0.0001, 32 batch)



Augmented INBREAST Dataset

VGG16(lr=0.001,16 batch)



EfficientNetV2L(lr=0.0001, 16 batch)

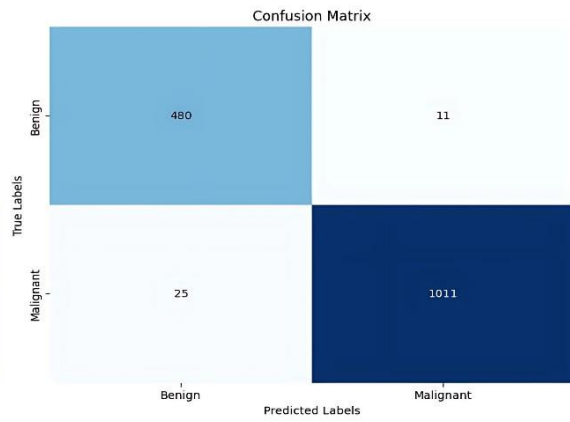


Figure 8. Before the suggested method, the confusion matrices of some of the most influential models were analyzed using the learning rate as a hyperparameter for two distinct datasets.

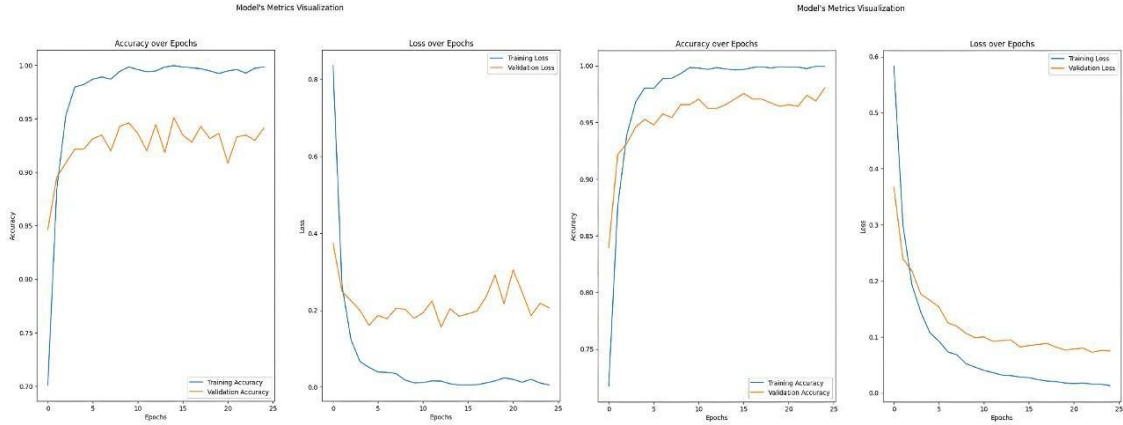
Figure 8 shows the confusion matrix values for some of the most successful models among the fourteen deep learning models for both datasets and the learning rate before the proposed model.

Loss-Accuracy Graphs After The Proposed Model

Augmented MIAS Dataset

HybridAttentionVGG(proposed)
(lr=0.001,32 batch)

EfficientNetV2B0(lr=0.0001, 32 batch)



Augmented INBREAST Dataset

HybridAttentionVGG(proposed)
(lr=0.001,16 batch)

HybridAttentionVGG(proposed)
(lr=0.0001,16 batch)

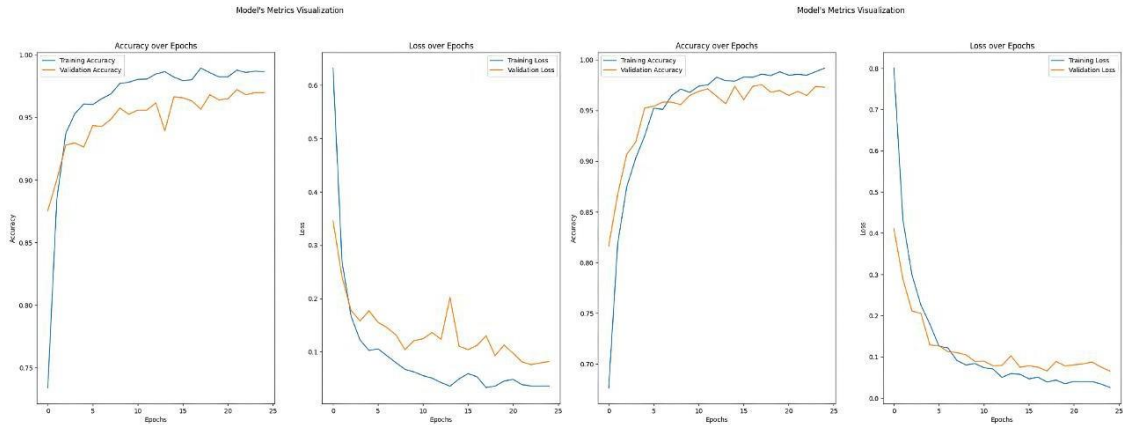


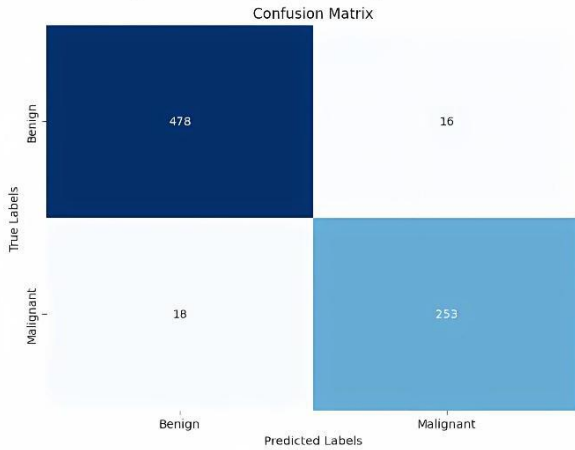
Figure 9. After the proposed model, the loss and accuracy graphs of some of the most successful models based on the learning rate as a hyperparameter for two different datasets.

Figure 9 displays the loss and accuracy values for training and validation of some of the most successful models out of fifteen deep learning models. The proposed model was incorporated following training on both datasets with diverse hyperparameter values, including the learning rate. The graph presents these values based on the number of epochs.

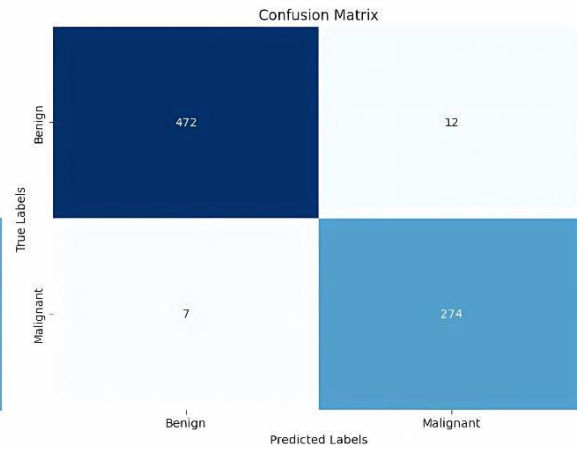
Confusion Matrices After The Proposed Model

Augmented MIAS Dataset

HybridAttentionVGG(proposed)
(lr=0.001,32 batch)

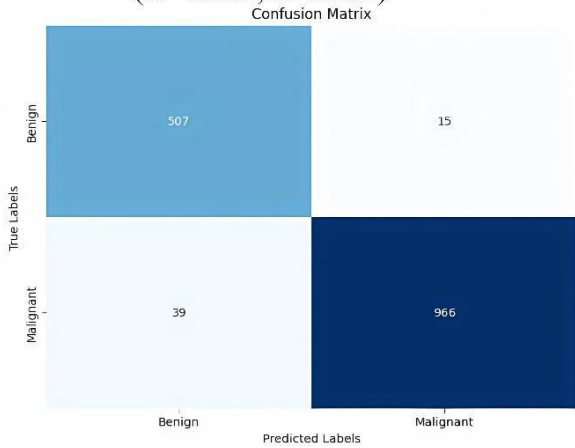


EfficientNetV2B0(lr=0.0001, 32 batch)



Augmented INBREAST Dataset

HybridAttentionVGG(proposed)
(lr=0.001,16 batch)



HybridAttentionVGG(proposed)
(lr=0.0001,16 batch)

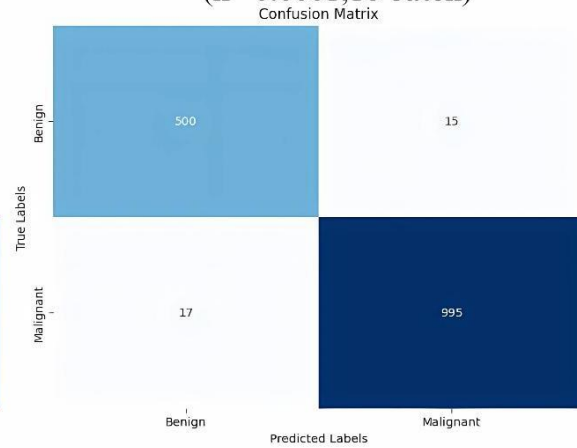


Figure 10. Following the suggested methodology, the confusion matrices of some of the best effective models are presented for two distinct datasets, considering the learning rate as a hyperparameter.

The confusion matrix values for some of the best-performing models out of fifteen deep-learning models are shown in Figure 10. These values were obtained by including the suggested model in both datasets and varying the learning rate.

GRAD-CAM: GRAD-CAM(Gradient-weighted Class Activation Mapping) is a method employed to visualize the regions of interest that a deep learning model prioritizes during decision-making, particularly in image classification tasks. It enhances the transparency of the model's decision-making process by indicating which features influenced the classification of a specific class. GRAD-CAM enhances model reliability by examining accurate and inaccurate classifications, pinpointing areas of focus, and resolving potential problems. In medical image analysis, it can improve clinical applications by

confirming whether the model is concentrating on pertinent areas.

GRAD-CAM utilizes gradients from the last convolutional layer to produce a heatmap that emphasises the pixels deemed significant by the model. The places that significantly influence the model's choice are represented in warm hues (red, orange), whilst regions of lesser importance are depicted in cooler tones (blue). The results assess the model's accuracy in classifications and its attention to significant regions within the image.

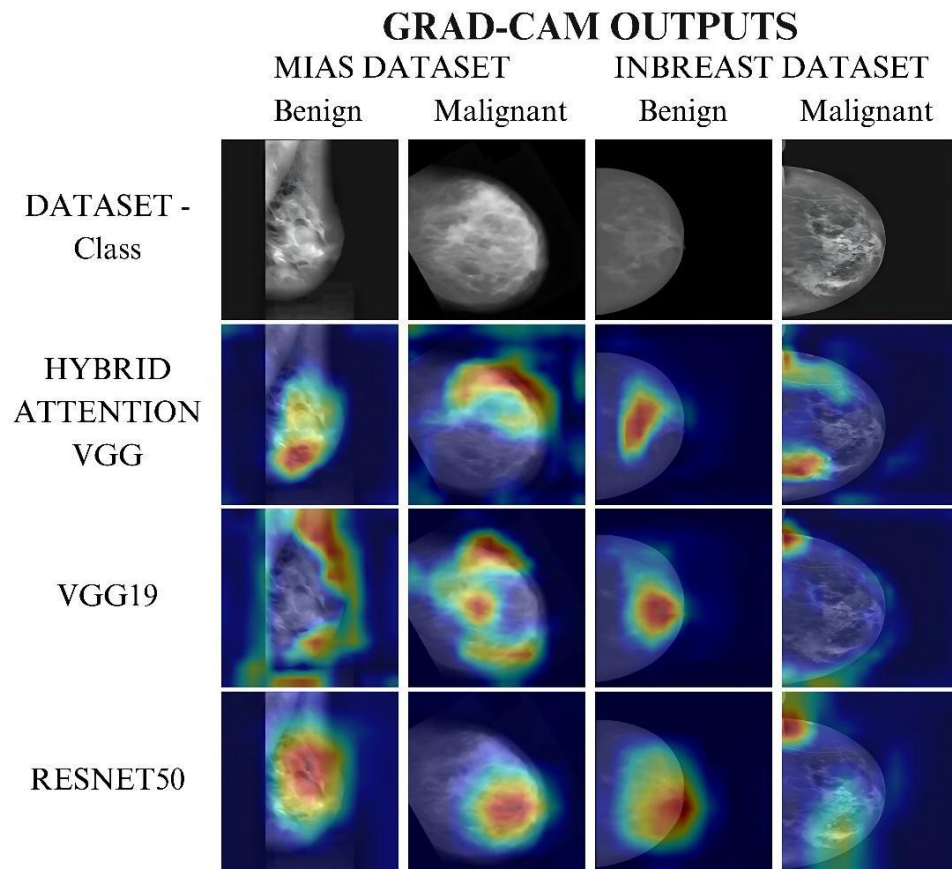


Figure 11. GRAD-CAM outputs of mammography images from both categories in two datasets for the VGG19, RESNET50 models, and our suggested model.

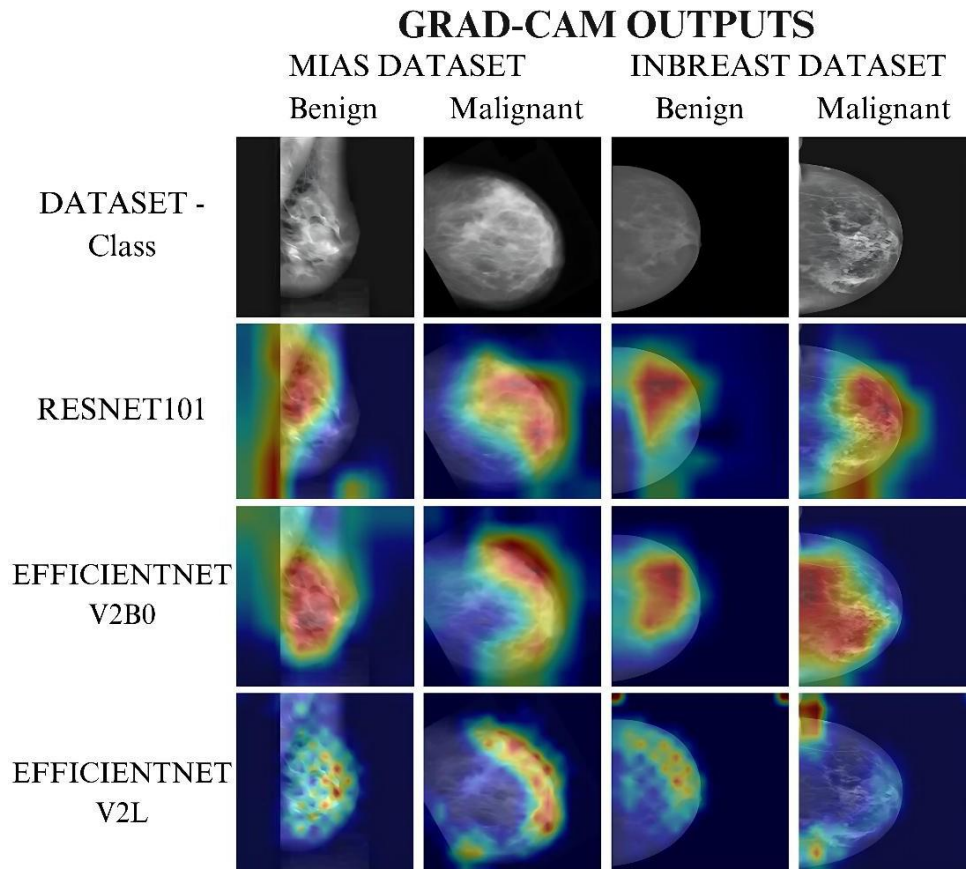


Figure 12. Mammogram images from two distinct classes sourced from both datasets, along with the GRAD-CAM outputs of the RESNET101, EFFICIENTNETV2B0, and EFFICIENTNETV2L models.

Figures 11 and 12 illustrate the GRAD-CAM outputs of the decision structures of the highest-performing models on mammograms from each dataset and class. In the GRAD-CAM output, the areas where the model focuses are depicted with varying color tones. Warm colors (red, orange, yellow) highlight the regions that contribute the most to the model's decision, reflecting the key features the model considers important. On the other hand, cool colors (blue, purple) show the areas that the model pays less attention to or disregards. This visualization clearly illustrates which parts of the image the model takes into account during the classification process.

	TRAINING TIMES (second)											
	AUGMENTED MIAS DATASET						AUGMENTED INBREAST DATASET					
	LEARNING RATE=0.001			LEARNING RATE=0.0001			LEARNING RATE=0.001			LEARNING RATE=0.0001		
	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH	16 BATCH	32 BATCH	64 BATCH
DEEP LEARNING MODELS												
HYBRID ATTENTION VGG	191	204	222	191	204	223	371	382	312	374	398	380
EFFICIENT NET V2B0	83	73	75	86	72	76	122	100	100	124	124	124
EFFICIENT NET V2L	415	438	443	390	443	445	718	703	716	747	687	722
VGG 19	200	220	237	210	244	238	412	421	429	437	426	428
RESNET 50	115	120	122	115	119	123	194	196	197	219	195	197
RESNET 101	176	210	185	176	182	185	331	332	334	331	333	333

Figure 13. The training durations of high-performing models

Although the attention mechanism usually increases computational cost, the training times for Hybrid Attention VGG were observed to be average compared to other high-performing models. It is shown in Figure 13. When examining other computational costs by looking at a few hyperparameter values, it has been observed that the proposed model's resource usage is also reasonable.

Comparison of Our Study with Some Studies

REFERENCE	METHOD	DATASET	ACCURACY
[36]	DL-CNN+SVM	BCDR+MIAS	85%
[37]	Transfer Learning +RF	INBREAST	90%
[38]	CNN+SVM	MIAS	92.85%
[39]	CNN	INBREAST	93.04%
[40]	DL+KNN	MIAS	93.8%
HybridAttentionVGG (Our Proposed Model)	HybridAttentionVGG16	Augmented MIAS	95.56%
HybridAttentionVGG (Our Proposed Model)	HybridAttentionVGG16	Augmented INBREAST	97.90%

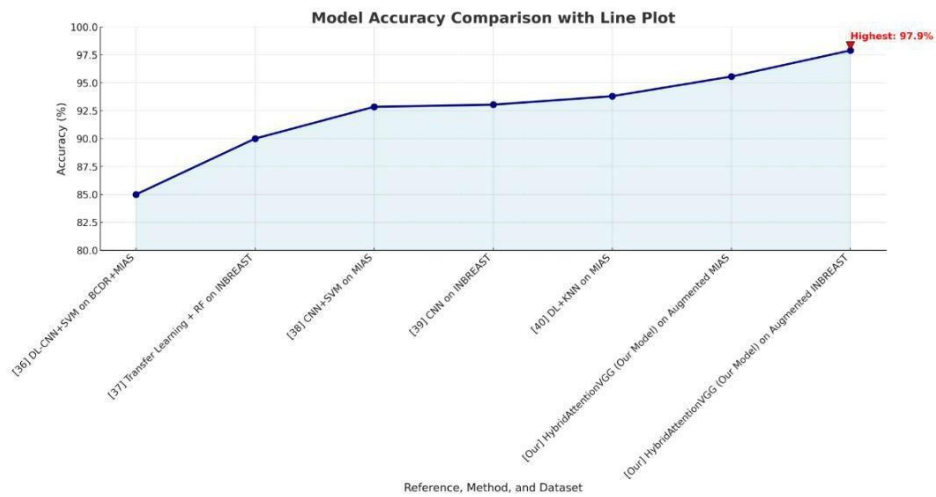


Figure 14. Comparing our findings with other studies in the literature

Figure 14 compares the Accuracy values of the most successful results obtained from hyperparameter optimization of our studies with some studies conducted in this literature. The line plot below the image emphasizes this comparison even more.

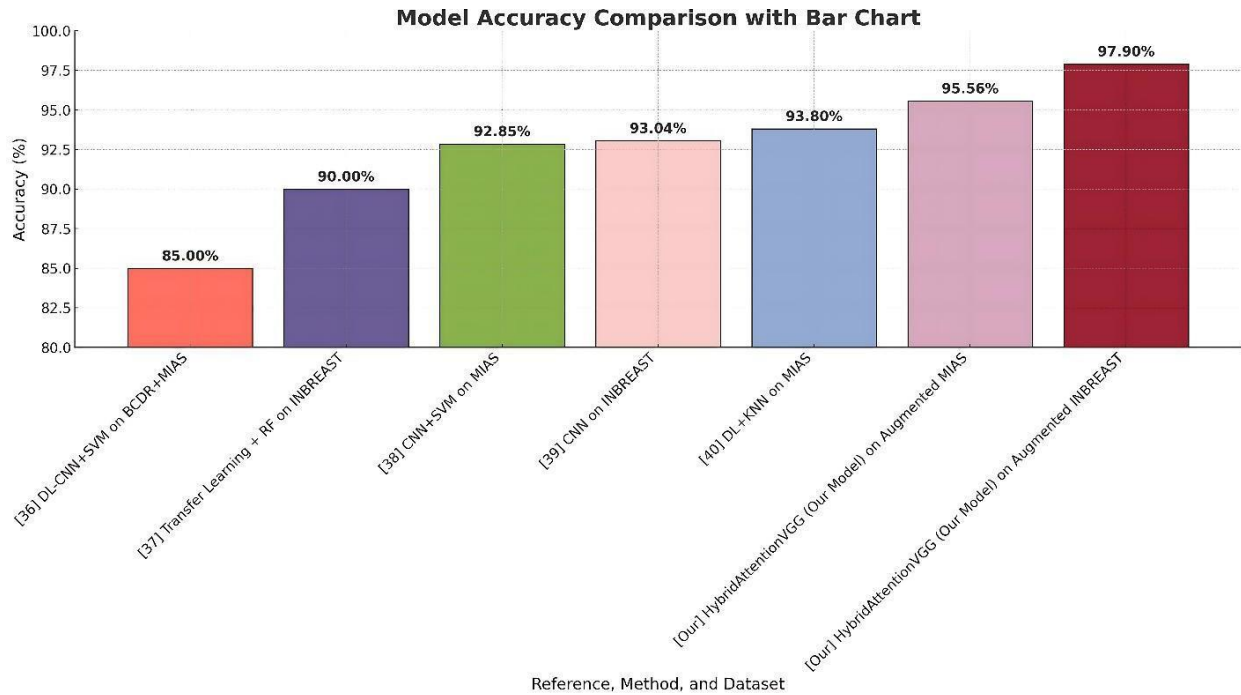


Figure 15. Bar plot graph of the studies in the literature and our work.

Figure 15 shows the bar plot graph of studies conducted in the literature on breast cancer classification and the studies we have carried out.

Discussions

During the preliminary investigation conducted before proposing the model, the performances of various models, including VGG16, VGG19, RESNET50, RESNET101, EfficientNetV2B0 and EfficientNetV2L were compared based on Accuracy and F1 scores. These models demonstrated exceptional performance concerning the dataset and hyperparameter values. Even so, the proposed model demonstrated outstanding performance across a wide range of hyperparameter values and surpassed the performance of the other models in some hyperparameter values, especially on the Augmented INBREAST dataset. EfficientNetV2B0 and EfficientNetV2L models have demonstrated superior performance, attaining above 0.95 accuracy using diverse hyperparameter configurations prior to the evaluation of the proposed model. The models exhibiting the highest accuracy values are these models.

Before suggesting a model in the augmented MIAS dataset, it was seen that RESNET50 obtained one of the superior performance with a learning rate of 0.001 and a small batch size, whereas VGG19 performed well with a batch size of 64. RESNET50 achieved one of the superior performance using a learning rate of 0.0001 and a batch size 16. However, RESNET101 outperformed it by achieving even better results with bigger batch sizes. Within the Augmented INBREAST dataset, the VGG16 model exhibited notable performance with a learning rate of 0.001. However RESNET101 model displayed one of the superior performance with a learning rate of 0.0001.

Upon assessing the performance of deep learning models using the proposed HybridAttentionVGG model, it has been observed that this newly recommended model outperforms others in various hyperparameter configurations. Our suggested model exhibits equivalent accuracy to the EfficientNetV2B0 model, utilising a learning rate of 0.001 and a batch size of 32 on the Augmented MIAS dataset. The model enhanced performance across all batch size parameters on the Augmented INBREAST dataset with a learning rate of 0.001. With a learning rate of 0.0001, the accuracy has improved with a batch size of 16. The augmented INBREAST dataset enhanced performance in four of six distinct hyperparameter configurations. The usefulness of our newly proposed model has been shown by achieving superior performance in five out of twelve scenarios, including two datasets and six distinct hyperparameter values.

Before the model was proposed, the model with the highest accuracy value was EfficientNetV2L with an accuracy value of 0.9764, whereas after including our developed model, the model with the highest performance is the HybridAttentionVGG model with an accuracy value of 0.9790.

As shown in Figures 14 and 15, when compared to other breast cancer classification studies in the literature, our proposed new model, the HybridAttentionVGG model, has been demonstrated to be a successful model with accuracy values of 0.9556 and 0.9790 on the augmented MIAS and the augmented INBREAST datasets, respectively.

The HybridAttentionVGG model surpasses conventional models by integrating the robust feature extraction skills of VGG16 with a unique attention method that dynamically highlights significant features, guaranteeing more concentrated and resilient learning. The unique skip connections of the model preserve both the original and improved information, resulting in a well-balanced strategy that improves accuracy without substantially increasing computational complexity. Accordingly, the performance measure values of this model have surpassed those of other models.

Conclusions

The HybridAttentionVGG model integrates the straightforwardness and resilience of the VGG16 architecture with an innovative attention mechanism that improves feature learning by prioritizing significant regions in the image. It offers a balanced solution between typical CNN models, which may miss important subtle features, and more computationally expensive designs like ResNet or Vision Transformers. The proposed model incorporates a streamlined attention mechanism and skip connections to preserve original and enhanced characteristics, providing a flexible and computationally practical option for various image classification tasks.

The proposed model can compete with those within the EfficientNet architecture. Nearly all hyperparameter values exhibit comparable or superior accuracy across the two datasets. Particularly on the augmented INBREAST dataset, it has exceeded the performance of EfficientNet models across numerous hyperparameter configurations. The model's training duration is intermediate between the training durations of the two EfficientNet models, considering the computational cost. The suggested model exhibits both low computational requirements and high accuracy.

The study has shown that this model is highly effective and helpful for classifying both benign and malignant cancers, consistently outperforming other models in most circumstances.

The forthcoming study will investigate the influence on classification accuracy by employing diverse data obtained by creating synthetic data from a derived dataset in deep learning models and evaluating the effectiveness of using synthetic data by comparing these datasets. Generating synthetic data will address the imbalanced data problem and find a solution.

References

- [1] L. Tsochatzidis, L. Costaridou, and I. Pratikakis, 'Deep Learning for Breast Cancer Diagnosis from Mammograms—A Comparative Study', *Journal of Imaging*, vol. 5, no. 3, 2019.
- [2] J. Arevalo, F. A. González, R. Ramos-Pollán, J. L. Oliveira, and M. A. Guevara Lopez, 'Representation learning for mammography mass lesion classification with convolutional neural networks', *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 127, pp. 248–257, 2016.
- [3] D. Moura *et al.*, 'Benchmarking Datasets for Breast Cancer Computer-Aided Diagnosis (CADx)', 11 2013, vol. 8258, pp. 326–333.
- [4] B. Huynh, H. Li, and M. Giger, 'Digital mammographic tumor classification using transfer learning from deep convolutional neural networks', *Journal of Medical Imaging (Bellingham, Wash.)*, vol. 3, p. 034501, 07 2016.
- [5] A. Elbagoury, 'Breast Infrared Thermography Segmentation Based on Adaptive Tuning of a Fully Convolutional Network', *Current Medical Imaging Reviews*, vol. 16, pp. 611–621, 05 2020.
- [6] Z. Jiao, X. Gao, Y. Wang, and J. Li, 'A Deep Feature Based Framework for Breast Masses Classification', *Neurocomputing*, vol. 197, 03 2016.
- [7] F. F. Ting, Y. J. Tan, and K. S. Sim, 'Convolutional neural network improvement for breast cancer classification', *Expert Systems with Applications*, vol. 120, pp. 103–115, 2019.
- [8] A. Rampun, B. Scotney, P. Morrow, and H. Wang, 'Breast Mass Classification in Mammograms using Ensemble Convolutional Neural Networks', 09 2018, pp. 1–6.
- [9] V. R. and M. S, 'Discrete wavelet transform based principal component averaging fusion for medical images', *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 69, pp. 896–902, 04 2015.
- [10] D. Ragab, M. Sharkas, S. Marshall, and J. Ren, 'Breast cancer detection using deep convolutional neural networks and support vector machines', *PeerJ*, vol. 7, p. e6201, 01 2019.
- [11] H.-C. Shin *et al.*, 'Deep Convolutional Neural Networks for Computer-Aided Detection: CNN Architectures, Dataset Characteristics and Transfer Learning', *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 35, 02 2016.
- [12] P. Ballester and R. Araujo, 'On the Performance of GoogLeNet and AlexNet Applied to Sketches', *AAAI*, vol. 30, no. 1, Feb. 2016.
- [13] J. Dai, Y. Li, K. He, and J. Sun, 'R-FCN: Object Detection via Region-based Fully Convolutional Networks.', in *NIPS*, 2016, pp. 379–387.
- [14] O. Russakovsky *et al.*, 'ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge.', *CoRR*, vol. abs/1409.0575, 2014.
- [15] R. S. Lee, F. Gimenez, A. Hoogi, K. K. Miyake, M. Gorovoy, and D. L. Rubin, 'A curated mammography data set for use in computer-aided detection and diagnosis research', *Scientific data*, vol. 4, p. 170177, Dec. 2017.
- [16] C. Sun, A. Shrivastava, S. Singh, and A. Gupta, 'Revisiting Unreasonable Effectiveness of Data in Deep Learning Era', in *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 843–852.
- [17] S. C. Wong, A. Gatt, V. Stamatescu, and M. D. McDonnell, 'Understanding data augmentation for classification: when to warp?', *CoRR*, vol. abs/1609.08764, 2016.
- [18] M.-L. Huang and T.-Y. Lin, 'Dataset of breast mammography images with masses', *Data in Brief*, vol. 31, p. 105928, 2020.
- [19] F. Zhuang *et al.*, 'A Comprehensive Survey on Transfer Learning', arXiv [cs.LG]. 2020.
- [20] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, 'Deep Residual Learning for Image Recognition', in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778.
- [21] S. Liu and W. Deng, 'Very deep convolutional neural network based image classification using small training sample size', *2015 3rd IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR)*, pp. 730–734, 2015.
- [22] V. Sudha and D. Ganeshbabu, 'A Convolutional Neural Network Classifier VGG-19 Architecture for Lesion Detection and Grading in Diabetic Retinopathy Based on Deep Learning', *Computers, Materials & Continua*, vol. 66, pp. 827–842, 01 2020.
- [23] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, 'Deep Residual Learning for Image Recognition', in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778.

- [24] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, 'Densely Connected Convolutional Networks', in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2261–2269.
- [25] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, 'Deep Residual Learning for Image Recognition', in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778.
- [26] Y.-M. Chung, C.-S. Hu, A. Lawson, and C. D. Smyth, 'TopoResNet: A hybrid deep learning architecture and its application to skin lesion classification', *CoRR*, vol. abs/1905.08607, 2019.
- [27] M. Koç and R. Özdemir, 'Enhancing Facial Expression Recognition in the Wild with Deep Learning Methods Using a New Dataset: RidNet', *RidNet. Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science*, vol. 6, no. 2, pp. 384–396, 2019.
- [28] A. G. Howard *et al.*, "MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications.," *CoRR*, vol. abs/1704.04861, 2017.
- [29] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, and L.-C. Chen, 'MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks', in *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 4510–4520.
- [30] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens, and Q. V. Le, 'Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition', in *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 8697–8710.
- [31] M. Wang, B. Liu, and H. Foroosh, 'Design of Efficient Convolutional Layers using Single Intra-channel Convolution, Topological Subdivisioning and Spatial "Bottleneck" Structure', *arXiv: Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016.
- [32] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna, 'Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision', in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 2818–2826.
- [33] C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke, and A. Alemi, 'Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning', *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 31, 02 2016.
- [34] F. Chollet, 'Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions', in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 1800–1807.
- [35] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens, and Q. V. Le, 'Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition', *arXiv [cs.CV]*. 2018.
- [36] Saraswathi Duraisamy and Srinivasan Emperumal, "Computer-aided mammogram diagnosis system using deep learning convolutional fully complex-valued relaxation neural network classifier." *IET Computer Vision* vol. 11, no. 8, PP. 656-662, July 2017.
- [37] N. Dhungel, G. Carneiro, and A. P. Bradley, "A deep learning approach for analysing masses in mammograms with minimal user intervention," *Med. Image Anal.*, vol. 37, pp. 114-128, 2017.
- [38] Jaffar, M. A., "Deep learning based computer aided diagnosis system for breast mammograms," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 8, no. 7, pp. 286-290, 2017.
- [39] E. M. F. El Houby and N. I. R. Yassin, 'Malignant and nonmalignant classification of breast lesions in mammograms using convolutional neural networks', *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 70, no. 102954, p. 102954, Sep. 2021.
- [40] P. Kaur, G. Singh, and P. Kaur, 'Intellectual detection and validation of automated mammogram breast cancer images by multi-class SVM using deep learning classification', *Inform. Med. Unlocked*, vol. 16, no. 100151, p. 100151, 2019.
- [41] M. Tan and Q. V. Le, 'EfficientNetV2: Smaller Models and Faster Training', *CoRR*, vol. abs/2104.00298, 2021.



Elma Yaprak Hastalıklarının Sınıflandırılması için Genetik Algoritma ile Otomatik ESA Mimarisi Tasarımı

Design of Automatic CNN Architecture with Genetic Algorithm for Apple Leaf Disease Classification

Özge Nur Özaras^{1*}, Asuman Günay Yılmaz², Eyüp Gedikli³

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, ozgenur.ozaras@ktu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6392-4049>

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapay Zeka ve Veri Mühendisliği Bölümü, gunaya@ktu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3960-5085>

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, gediklie@ktu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-5457>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 3 Ekim 2024
Revizyon 27 Kasım 2024
Kabul 16 Ocak 2025
Online 26 Mart 2025

Araştırma Kelimeleri:

Yaprak hastalığı sınıflandırma,
Evrişimsel sinir ağları (ESA),
Genetik algoritma(GA)

Bitki yaprak hastalıklarının erken teşhisi ürün verimi, kalitesi ve sürekliliği için çok önemlidir. Son yıllarda yaprak hastalıklarının teşhisinde evrişimsel sinir ağları (ESA) yüksek başarımlar göstermektedir. Fakat ESA modeli tasarım sürecinde, çok sayıda parametrenin belirlenmesi için çok fazla deney yapılması gerekmektedir ve bu işlem uzman bilgisi gerektirmektedir. Bu durum probleme uygun optimal bir ESA'nın tasarım sürecini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılması amacıyla genetik algoritma (GA) ile otomatik ESA mimarisi tasarımı önerilmiştir. Önerilen yöntemdeki mimari 3 bileşenden oluşmaktadır: evrişim bloğu, global ortalama havuzlama ve tam bağlantılı katman bloğu. Evrişim bloğu, 3x3 evrişim, aktivasyon fonksiyonu, yığın normalizasyonu ve maksimum havuzlama katmanlarından oluşmaktadır. Tam bağlantılı katman bloğu, tam bağlantılı katman, aktivasyon fonksiyonu ve budama katmanlarını içermektedir. Yöntemde GA ile evrişim bloğu sayısı, filtre sayısı, öğrenme oranı, tam bağlantılı katman ve birimi sayısı, budama oranı ve global ortalama havuzlama kullanımı parametrelerinin optimum değerleri araştırılmıştır. Bu optimum değerlerle ESA modeli otomatik olarak tasarlanmıştır. Üretilen mimari ile elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılmasında %98.58 doğruluk, %98.68 F1-skoru, %98.68 kesinlik ve %98.68 duyarlılık sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan mimarinin performansı SqueezeNet, ShuffleNet ve MobileNetV2 ön eğitilmiş ağlarıyla karşılaştırılmıştır. Otomatik tasarlanan ESA mimarisinin, daha az parametre sayısı ile, manuel tasarlanmış mimarilerden daha iyi ya da onlarla kıyaslanabilir başarımlar gösterdiği görülmüştür. Ayrıca önerilen yaklaşım farklı veriler için de otomatik olarak ESA modeli tasarımına uygundur.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 3 October 2024
Received in revised form 27 November 2024
Accepted 16 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Leaf disease classification,
Convolutional neural networks,
Genetic algorithm

Early diagnosis of plant leaf diseases is very important for product yield, quality and continuity. In recent years, convolutional neural networks (CNNs) have shown high performance in the diagnosis of leaf diseases. However, many experiments are carried out in determining many parameters in the CNN model design process and this process requires expert knowledge. This situation complicates the design process of an optimal CNN suitable for the problem. In this study, automatic CNN architecture design with genetic algorithm (GA) is proposed for the classification of apple leaf diseases. The architecture in the proposed method consists of 3 components: convolution block, global average pooling and fully connected layer block. The convolution block consists of 3x3 convolution, activation function, batch normalization and maximum pooling layers. The fully connected layer block includes fully connected layer, activation function and dropout layers. In the method, the optimum values of the parameters of number of convolution blocks, number of filters, learning rate, number of fully connected layer and number of units, dropout rate and global average pooling usage were investigated with GA. The CNN model was automatically designed with these optimum values. With the generated architecture, %98.58 accuracy, %98.68 F1-score, %98.68 precision and %98.68 sensitivity results were obtained in the classification of apple leaf diseases. The performance of the designed architecture was compared with SqueezeNet, ShuffleNet and MobileNetV2 pre-trained networks. It was observed that the automatically designed CNN architecture, with fewer parameters, have been shown to perform better or comparable to manually designed architectures. In addition, the proposed approach is suitable for automatic CNN model design for different data.

Doi: 10.24012/dumf.1560599

* Sorumlu Yazar

Giriş

Uluslararası platformda "Green Deal" olarak bilinen "Yeşil Mutabakat", Avrupa Birliği tarafından 2019 yılında ortaya atılan bir çevre ve ekonomi önceliğidir. Temel amacı, Avrupa'nın 2050 yılına kadar ilk iklim nötr kıtası olmasını sağlamaktır. İklim değişikliği ile mücadele Yeşil Mutabakatın en büyük önceliklerindedir. Böylece küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin olumsuz etkileri azaltılacaktır. Yeşil Mutabakat çerçevesinde, dijital tarım, tarım ve gıda sektörü hedef odaklı Ar-Ge ve yenilik konuları, öncelikli alanlarda yerini almıştır. Tarım ve gıda sektöründe, zararlılarla mücadele verimli ve kaliteli ürün almak için çok önemlidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte zararlılarla mücadele, uzaktan ve erkenden yapılabilir hale gelmiştir. Zararlıların erken belirlenmesinde bitki yapraklarının izlenmesi etkin bir çözümdür. Yaprak hastalıklarının erken teşhisi verimi ve kaliteyi önemli derecede artırmaktadır. Diğer bir avantaj ise erken önlemlerle daha az kimyasal tarım ilacı kullanımını sağlamaktır. Yaprak hastalıkları, bitkinin cinsine, türüne göre farklılıklar göstermektedir. Bu bağlamda, bitkinin cinsinin/türünün belirlenmesi ve yaprak hastalığının tanınması sınıflandırma problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde bu alandaki makine öğrenmesi ile sınıflandırma çalışmaları yerini derin öğrenme modelli sınıflandırıcılara bırakmaktadır.

Son yıllarda derin öğrenme yöntemlerinin yüksek başarıları nedeniyle, evrimsel sinir ağlarının (ESA) görüntü işleme alanında kullanımı yaygınlaşmıştır. Fakat ESA modeli tasarım süreci çok sayıda kapsamlı deney gerektirmektedir. Örneğin, evrişim (convolution) katmanları için, evrişim filtresinin boyutu, filtre sayısı, adım sayısı, budama oranı, havuzlama katmanları için havuzlama boyutu ve havuzlama işlemi (maksimum, ortalama havuzlama) araştırılmalıdır. Bu parametrelerin belirlenmesi zaman alıcıdır ve model oluşturma sürecini kolaylaştırmak için sistematik olarak yapılmalıdır [1]. ESA tasarımında zaman, girdi sayısı, model derinliği, maksimum nöron sayısı ve filtre sayısı gibi faktörlerin optimal şekilde seçilmesi sınıflandırma yeteneğini artırır. Tüm bu değerleri tanımlamak için uzman bilgisine sahip olmanın zorluğu nedeniyle, optimal bir ESA'nın yapılandırılması zordur [2]. Diğer yandan tasarlanan mimarinin parametre sayısının da göz önünde bulundurulması gerekir [3]. Bütün bu zorluklar ESA tasarımını otomatikleştirmeyi amaçlayan, sinir ağı mimarisi arama (Neural Architecture Search-NAS) konusundaki çalışmaların artmasına neden olmuştur [4]. NAS'ın amacı elle tasarlanmış mimarilerle aynı seviyede veya onlardan daha iyi performans gösteren ağlar tasarlamaktır.

ESA modelleri, verilerden hiyerarşik özellikleri öğrenme yetenekleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda başarılı olmaktadır [5]. Uzmanlar geleneksel yöntemlerle başarılı ağ mimarileri tasarlamış olsalar da, yüksek performanslı mimarileri otomatik olarak öğrenmek için NAS tekniklerinin kullanımına yönelik çalışmalar artmaktadır. Ağ mimarilerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan bazı NAS algoritmaları şunlardır: ızgara araması, rastgele arama [6], takviyeli öğrenme [7], Bayes optimizasyonu [8] ve evrimsel algoritmalar [9].

Bu çalışmada elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılması amacıyla genetik algoritma (GA) ile otomatik ESA mimarisi tasarımı yöntemi önerilmiştir. Çalışmada yüksek başarılı, düşük parametrelili hafif mimariler oluşturmak hedeflenmiştir. Bu nedenle mimari peş peşe gelen evrişim blokları, global ortalama havuzlama katmanı ve tam bağlantılı katmanlardan oluşturulmuştur. Önerilen çerçevede elma yaprağı veri kümesine en iyi uyum sağlayan hafif ESA mimarisi GA ile tasarlanmıştır. Önerilen modelin performansı düşük parametrelili SqueezeNet, ShuffleNet ve MobileNetV2 ağlarıyla kıyaslanmıştır. Çalışmanın ana katkıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. GA'ya dayalı otomatik ESA mimarisi tasarlanmış ve elma yaprağından hastalık sınıflandırma probleminin çözümüne uygulanmıştır.
2. Hafif evrişim blokları kullanılarak düşük parametre sayısı ile yüksek sınıflandırma doğruluğuna ulaşan bir mimari geliştirilmiştir.
3. SqueezeNet, ShuffleNet, MobileNetV2 ön eğitilmiş ağlarının ve önerilen mimarinin elma yaprağından hastalık sınıflandırma problemindeki başarımları kıyaslanmıştır.

Çalışmanın yapısı aşağıdaki şekildedir. İkinci bölümde literatürde otomatik ESA mimarisi tasarımı ve elma yaprak hastalıklarının sınıflandırılması konularında yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada önerilen yöntem detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Elde edilen deneysel bulgular dördüncü bölümde, sonuçlar ise beşinci bölümde verilmiştir.

İlişkili Çalışmalar

Sinir ağı mimarisi arama, NAS, belirli bir görev için en uygun mimarinin otomatik olarak bulunmasına odaklanır. ESA mimarisinin göreve özel otomatik tasarımı ve optimizasyonu, model performansının iyileştirilmesine önemli katkılar sağlar. Dufourq ve arkadaşları, GA ile derin sinir ağlarının güçlü yönlerini birleştirerek sinir ağı mimarilerinin arama alanını, ilişkili hiper parametrelerini ve uygulanacak dönem sayısını araştıran bir model önermiştir [10]. Bu model, 7 farklı veri seti üzerinde eğitilerek performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Zoph ve arkadaşları, sinir ağı mimarilerini bulmak için NASNet adı verilen yeni bir arama modeli tasarlamıştır [11]. CIFAR-10 veri seti üzerinde en iyi evrişim katmanı aranarak, bu katmanın birden fazla kopyası ImageNet veri setine uygulanmıştır. Üretilen mimarilerle, CIFAR-10 ve ImageNet veri setlerinde, manuel olarak tasarlanmış mimarilerden daha düşük hesaplama maliyetiyle kıyaslanabilir başarımlar elde edilmiştir. Gülcü ve Kuş, ESA için hiper parametre optimizasyonunu detaylı bir şekilde incelemiştir [12]. Farklı veri kümeleri üzerinde yapılan deneylerde, Bayes optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu ve GA gibi çeşitli yöntemlerin avantajları, dezavantajları ve performansları detaylı olarak analiz edilmiştir. Ancak, hiper parametre optimizasyonunun probleme özgü farklılıklar gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Sun ve arkadaşları, probleme özel en iyi ESA mimarisini otomatik olarak tasarlamak için GA'yı kullanmıştır [13]. CIFAR10 ve CIFAR100 veri setleri üzerinde, dokuz manuel tasarlanmış, dört yarı otomatik ve beş tam otomatik ESA mimarisi ile

kiyaslama yapılmıştır. Önerilen model, diğer modellerden daha yüksek performans göstermiştir. Ahmed ve Darwish, belirli bir problem için düşük hesaplama maliyetli ve yüksek performanslı en iyi CNN mimarisini GA'ya dayalı olarak tasarlamayı hedeflemiştir [3]. Önerilen algoritma, benzer dört veri seti üzerinde otomatik ve elle tasarlanmış hafif CNN mimarileri ile karşılaştırılmış ve kıyaslanabilir sonuçlar elde edilmiştir. Chantrapornchai ve arkadaşları, otomatik ESA tasarımı için bir çerçeve önermiştir [1]. Önerilen modelde, kalıntı blok kombinasyonlarıyla birleştirilmiş sıkıştırma-uyarma blokları SqueezeNet'e uygulanmıştır. Farklı arama stratejileri kullanılarak, geleneksel mimarilerden daha yüksek doğruluk verebilen mimarilerin tasarlanması amaçlanmıştır. Bataineh ve arkadaşları, görüntü sınıflandırma görevleri için NAS tabanlı bir çerçeve önermiştir [5]. Önerilen yöntem, EMNIST veri kümesi üzerinde değerlendirilmiş, az parametre ile yüksek sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Liang ve arkadaşları, GA kullanarak iki yeni evrimsel NAS yöntemi geliştirmiştir [4]. Bu yöntemler, CIFAR-10 veri seti için mevcut NAS yöntemlerinden daha kısa sürede daha iyi performans gösteren ESA'lar üretmiştir. Meena ve arkadaşları, GA kullanarak ESA mimarisini üretmiştir [14]. DoubledMNIST veri seti üzerinde uygulanan algoritma, kısa eğitim süresinde yüksek performans göstermiştir. Rogers ve arkadaşları, GA ile beş farklı ESA mimarisini optimize ederek performans analizi yapmıştır [15]. Deneyler, iki farklı değerlendirme metriği ve on veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmiş mimariler, eğitim parametrelerindeki büyük farklara rağmen mevcut en iyi yöntemlerle kıyaslanabilir performans göstermiştir.

Nagaraju ve arkadaşları, elma ve üzüm yapraklarındaki bitki hastalıklarını erken teşhis etmek ve sınıflandırmak için transfer öğrenme yöntemini kullanmıştır [16]. Çalışmada VGG16 ön eğitilmiş ağı ile üzüm ve elma yaprak görüntülerinden oluşan veri seti üzerinde %97.87 doğruluk elde edilmiştir. Çetiner, elma yaprağı hastalıklarını, çeşitli ön eğitilmiş ESA modellerini kullanarak sınıflandırmıştır [17]. Veri setindeki sınıflar arası veri dağılımı dengesizliği probleminin çözümünde, SMOTE (Sentetik Azınlık Aşırı Örneklemme Tekniği) yöntemi ile veri artırma işlemi uygulanmıştır. Çalışmada ResNet50V2 ağı ile diğer ağlardan daha yüksek bir sınıflandırma başarımı (%99.00) elde edilmiştir. Reddy ve Neeraja, elma, üzüm, patates ve çilek bitkilerindeki yaprak hastalıklarının tespiti için ESA kullanmıştır [18]. Önerilen model ile %97.00 doğruluk elde edilmiştir. Farklı bir çalışmada elma yaprak hastalıklarının tespit edilmesi amacıyla farklı ön eğitilmiş ESA'lar üzerinde deneyler yapılmıştır [19]. DenseNet201'in kıyaslanan diğer ağlara göre daha yüksek doğruluk (%98.75) gösterdiği gözlemlenmiştir. Babalola ve arkadaşları, elma yaprağından hastalık sınıflandırılmasında AlexNet modelinin kullanımını önermiştir [20]. Bu model ile %99.56 doğruluk elde edilmiştir. Upadhyay ve Gupta, elma bitkisinde mantar hastalığının erken teşhisinde ResNeXt modelinin kullanımını önermiştir [21]. ResNet mimarisine dayalı olarak tasarlanan bu model ile %98.94 başarımla elde edilmiştir. Rawat ve arkadaşları, elma yapraklarındaki hastalıkları sınıflandırmak için, ResNet50V2 modeline dayalı TransferNet modelini önermiştir [22]. Bu model FGVC8 veri setindeki elma yaprağı görüntüleri üzerinde

uygulanmış ve %91.63 sınıflandırma başarımı elde edilmiştir.

Bitki yaprak hastalığı sınıflandırma konusundaki çalışmalar daha çok arka planı karmaşık olmayan görüntüler üzerinde model geliştirmektedir. Fakat son yıllarda doğal ortamda çekilmiş arka planı karmaşık görüntüler üzerinde yaprak hastalık sınıflandırma çalışmaları çoğalmaya başlamıştır [23-25].

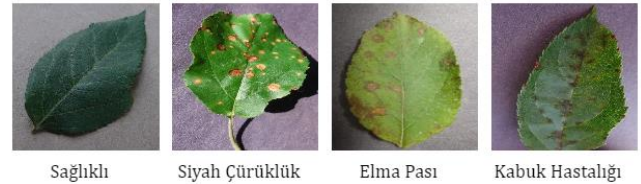
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bitki yaprak hastalıklarının sınıflandırılması için otomatik ESA modeli oluşturan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada ilk kez elma yaprağı hastalıklarının teşhisinde GA'ya dayalı ESA mimarisini tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada, model performansını artırmak ve hesaplama maliyetlerini düşürmek amacıyla göreve özel ESA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılması probleminin çözümü için GA ile ESA mimarisini tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti ve yöntem, alt bölümlerde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Veri seti

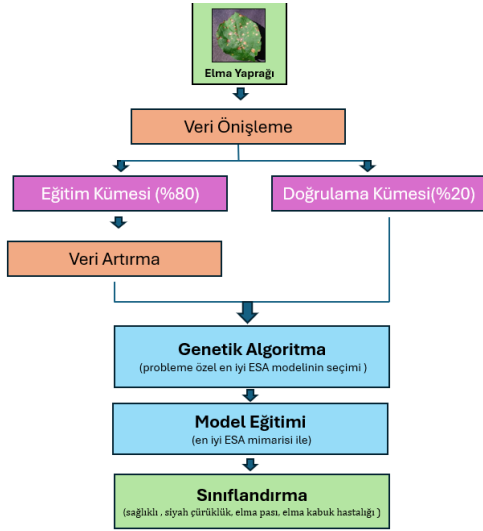
Çalışmada elma hastalıklarının tespit edilmesi ve sınıflandırılması için kullanılan görüntüler Plant Village veri setinden alınmıştır [26]. Plant Village veri setinde 14 farklı bitki türü (Elma, Yaban Mersini, Kiraz, Mısır, Üzüm, Portakal, Şeftali, Dolmalık Biber, Patates, Ahududu, Soya Fasulyesi, Kabak, Çilek, Domates) için 54.309 yaprak görüntüsü bulunmaktadır. Elma türüne ait yaprak görüntüleri, 1 sağlıklı, 3 hastalıklı olmak üzere 4 sınıftan oluşmaktadır. Bu veri seti 1.645 sağlıklı, 621 siyah çürüklük, 275 elma pası ve 630 elma kabuk hastalığı olmak üzere 3172 yaprak görüntüsü içermektedir. Şekil 1'de sağlıklı ve hastalıklı elma yaprağı görüntülerinden örnekler verilmiştir.



Şekil 1. Sağlıklı ve hastalıklı elma yaprağı görüntüleri

Yöntem

Bu çalışmada elma yaprak hastalıklarının sınıflandırılması amacıyla GA ile otomatik CNN mimarisini tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 2'de görülmektedir. Yöntemde öncelikle giriş görüntülerine yeniden boyutlandırma (224x224) ve normalizasyon ön işlemleri uygulanmış, daha sonra veri seti %80 eğitim ve %20 doğrulama verisi olacak şekilde ayrılmıştır. Eğitim verilerinin çeşitliliğini artırmak amacıyla rastgele dönüşümlerle veri artırma işlemi uygulanmıştır. Sonraki aşamada GA ile model tasarımı gerçekleştirilmiş ve modelin başarımı çeşitli performans metrikleri ile değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Önerilen yöntemin akış diyagramı

Veri artırma

Veri artırma, var olan veri örneklerini kullanarak yeni veri örnekleri oluşturma işlemidir. Veri artırma, bir derin öğrenme modelini eğitirken ortaya çıkabilecek sınırlı/dengesiz veri, aşırı uyum, çeşitlilik ve karmaşıklık gibi problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bu teknikte, farklı dönüşümler uygulanarak veri kümesinin boyutu artırılabilir ve sınıflar dengelenebilir. En yaygın uygulama, veri artırmanın yalnızca eğitim örneklerine uygulanmasıdır. Bunun nedeni, eğitim kümesindeki veri çeşitliliğini zenginleştirmek ve böylece modelin genelleme kapasitesini artırmaktır. Çalışmada da veri çeşitliliğini artırmak amacıyla eğitim kümesindeki yaprak görüntüleri üzerinde genişlik kaydırma (0.1), yükseklik kaydırma (0.1), yakınlaştırma (0.2), kesme (0.1), döndürme (0-10 derece) yöntemleri ile veri artırma işlemi uygulanmıştır. Şekil 3'te, veri artırma işlemi ile elde edilmiş örnek yaprak görüntüleri verilmiştir.

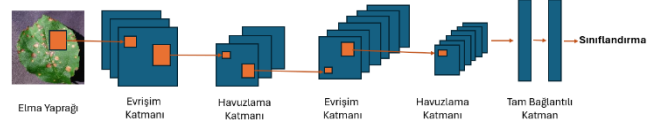


Şekil 3. Veri artırma ile üretilmiş yaprak görüntüleri

Evrişimsel Sinir Ağları

ESA'lar, görüntü ve video işleme görevlerinde sıkça kullanılan derin öğrenme modelleridir. Bu ağlar genellikle evrişim katmanı, havuzlama katmanı ve tam bağlantılı katmandan oluşmaktadır (Şekil 4). Evrişim katmanında, giriş görüntülerine çok sayıda filtre uygulanarak özellik haritaları çıkarılmaktadır. Bu katmanı takip eden havuzlama

katmanında, özellik haritalarının boyutu küçültülerek işlem yükü azaltılmaktadır. Ağın sonunda bulunan tam bağlantılı katmanda ise sınıflandırma işlemi yapılmaktadır. Bu çalışmada az parametreye sahip SqueezeNet, ShuffleNet ve MobileNetV2 ön eğitilmiş ESA mimarileri ile elma yaprak görüntülerinden hastalık sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra GA ile göreve özel ESA mimarisi tasarlanmıştır. Bu ağlar sonraki bölümlerde açıklanmaktadır.



Şekil 4. ESA'ların genel mimarisi

SqueezeNet

SqueezeNet, az parametrelilik ve küçük bir ağ olarak tasarlanmıştır. Yüksek doğruluk ve düşük karmaşıklık arasında bir denge kurması, bu ağı mobil cihazlar ve gömülü sistemler gibi sınırlı kaynaklara sahip cihazlar için ideal bir seçim haline getirmektedir. SqueezeNet mimarisi, filtre küçültme, giriş kanallarını küçültme ve ağ sonunda alt örnekleme olmak üzere üç strateji ile tasarlanmıştır [27]. Bu ağda parametre sayısını azaltmak amacıyla 1x1 ve 3x3 filtreleri birleştiren ateşleme (Fire) modülü kullanılmıştır. Ateşleme modülü iki temel katmandan oluşmaktadır: sıkıştırma (Squeeze) ve genişletme (Expand). Sıkıştırma katmanında 1x1 evrişim filtreleri ile özellik haritasının derinliği azaltılırken genişletme katmanında 1x1 ve 3x3 evrişim filtreleri kullanılarak sıkıştırılmış olan özellik haritası genişletilmektedir. Bu ağ mimarisi, bir evrişim katmanı ile başlamakta, ardından 8 ateşleme modülü ile devam etmekte ve bir evrişim katmanı ile sona ermektedir [27].

ShuffleNet

ShuffleNet düşük maliyetli hafif modellerin oluşturulması amacıyla 2017 yılında önerilmiştir. Bu ağ, üç aşamalı gruplanmış ShuffleNet birimlerinden (grup evrişim, kanal karıştırma ve derinlik tabanlı evrişim) oluşmaktadır [28]. Giriş kanalı ile çıkış kanalı arasındaki ilişkiyi kurmak için kanal karıştırma ve grup evrişim kullanılmaktadır. Kanal karıştırma, farklı kanal grupları arasında bilgi alışverişini artırırken özellik haritalarının hesaplama yükünü azaltmaktadır. Derinlik tabanlı evrişim her kanala ayrı ayrı evrişim uygularken, nokta evrişim ise 1x1 filtre kullanarak kanal sayısını artırır veya azaltır. Böylece standart konvolüsyonlara göre çok daha az parametre ile işlem yapılır. ShuffleNetV2, ShuffleNetV1 tasarımındaki eksikliklerin analiz edilerek iyileştirilmesiyle geliştirilmiştir [29]. Yapılan literatür taraması sonucunda ShuffleNetV2 mimarisinin düşük maliyet ve yüksek doğruluk sağladığı görülmüş, bu nedenle bu çalışmada ShuffleNetV2 kullanılmıştır.

MobileNetV2

MobileNet mimarisi, mobil cihazlarda hızlı ve verimli çalışabilen derin öğrenme modellerinin geliştirilmesi amacıyla önerilmiştir [30]. Bu mimari derinlik tabanlı ayrıştırılmış evrişim temeline dayanmaktadır. MobileNetV1 modeline doğrusal darboğaz modülleri ve tersine

döndürülmüş kalıntı blokları eklenerek MobileNetV2 modeli geliştirilmiştir [31]. Bu model, evrişim, tersine döndürülmüş kalıntı darboğaz ve noktasal evrişim katmanlarından oluşmaktadır. MobileNetV2'de, her katmanın girişi için 1×1 derinlik bazlı konvolüsyon filtresi kullanılarak girişler iki ayrı yola ayrılır. Bu yollardan birinde daraltma işlemi uygulanırken, diğer yolda ise özellikler korunur. Ardından, bu yolların çıktıları birleştirilerek yeni bir katman oluşturulur.

GA ile Otomatik ESA Tasarımı

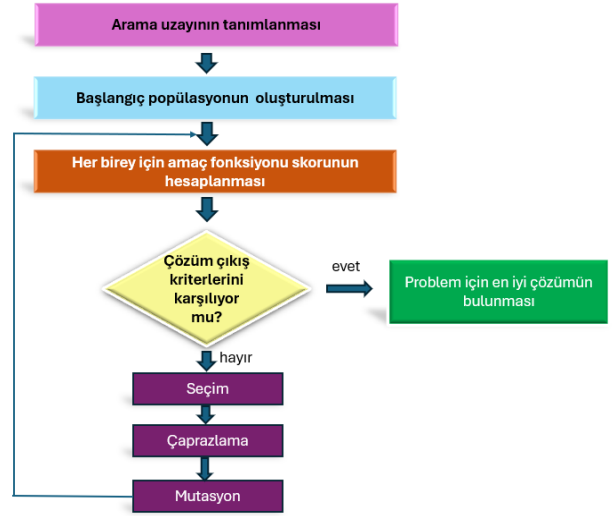
GA'lar, Darwin'in evrimsel prensiplerine dayanan sezgisel arama yöntemleridir [2]. Bu yöntemlerin amacı, belirli bir probleme yönelik optimal (en iyi) çözümleri üretmektir [14]. Bu amaçla GA'lar arama uzayında belirli bir maliyet fonksiyonuna göre iterasyonlar yapar ve her iterasyonda en iyi sonucu üreten kromozomun hayatta kalmasını sağlar.

GA'da, biyolojideki evrim teorisinde kullanılan kavramlar kullanılır. Algoritmanın temel çalışma birimi popülasyondur. Popülasyon problem için olası pek çok aday çözümü içeren bir çözüm kümesidir. Probleme uygun şekilde kodlanmış diziler halinde tutulan aday çözümlerin her birine birey denir. Her birey arama uzayında belirli bir bölgeyi temsil eder. GA'da ilk popülasyondaki bireyler genellikle rastgele üretilir. Sonraki popülasyondaki bireyler evrimsel süreç içinde GA mekanizmaları tarafından oluşturulur. GA bir aday çözümün en iyi çözüme ne kadar yaklaştığını değerlendirmek için amaç (fitness) fonksiyonu kullanır. Amaç fonksiyonu, bireyin kalitesini belirten sayısal bir değer olan amaç (fitness) skorunu hesaplamaktadır [10]. Amaç skoru değeri yüksek olan bireyler seçilerek, çaprazlama işlemi ile yeni bireyler üretir. Böylece yeni popülasyon önceki popülasyonun amaç değeri yüksek bireylerinin sahip olduğu özelliklerin büyük bir kısmını içerir. Seçim işleminde var olan birey genetik yapısında herhangi bir değişiklik yapılmadan yeni popülasyona kopyalanır. Çaprazlama işlemi, genetik çeşitliliğin artırılması ve yeni çözüm kombinasyonlarının üretilmesi amacıyla uygulanır. İki bireyin yapısı rastlantısal olarak birleştirilerek (ikili dizi parçalarının değiş tokuş edilmesi) yeni bireyler oluşturulur. Mutasyonda ise var olan bir bireyin genlerinin bir ya da birkaçının yerleri değiştirilir. Mutasyon arama alanında yeni bir yön keşfetmek için kullanılır [2].

GA akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi GA'da önce arama uzayı tanımlanır, başlangıç popülasyonu oluşturulur ve her birey için amaç skoru değeri hesaplanır. Daha sonra amaç skor değeri yüksek olan bireyler seçilir. Seçilenler, yeni bireylerin oluşturulmasında ebeveyn olarak kullanılır. Çaprazlama ve mutasyon ile genetik çeşitlilik sağlanarak yeni popülasyon oluşturulur. Bu adımlar, belirli bir çıkış kriteri sağlanıncaya kadar tekrarlanır.

Bir problemin çözümü için en uygun ESA mimarisinin manuel tasarımı hem zaman alıcı hem de uzmanlık gerektiren bir iştir. Buna alternatif çözüm mimarinin otomatik olarak tasarlanmasıdır. Bu çalışmada elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılmasında, otomatik ESA mimarisi tasarımı için GA kullanılmıştır. Yöntemde popülasyonu oluşturan bireyler, ESA'daki konvolüsyon katman sayısı, filtre sayısı, aktivasyon fonksiyonu, havuzlama türü, budama

oranı vb. parametreleri içermektedir. Diğer bir ifade ile her birey kodlanmış bir ESA mimarisini temsil etmektedir. İlk popülasyondaki bireyler rastgele üretildikten sonra,



Şekil 5. GA akış diyagramı

bireylerin amaç fonksiyonu skorları Algoritma 1 kullanılarak hesaplanır. Burada amaç fonksiyonu skoru, bireylerle oluşturulan ESA mimarilerinin elma yaprağı hastalığı sınıflandırma doğruluğudur. Amaç fonksiyonu sonucuna göre sınıflandırma doğruluğu daha yüksek olan bireyler (ESA mimarileri) seçilir.

Algoritma 1: Bireye ait amaç fonksiyonu skorunun hesaplanması

Girdi: Birey (ESA mimarisi), eğitim verisi, doğrulama verisi, eğitim_tur_sayısı

Çıktı: Bireyin amaç fonksiyonu skoru (V_{eni})

1. Verilen hiper parametreler ile ESA mimarisi oluştur.
2. $adım \leftarrow 0$, $V_{eni} \leftarrow 0$
3. **While** adım < eğitim_tur_sayısı **do**
eğitim verisi ile ağı eğit
doğrulama verisi üzerinde sınıflandırma doğruluğu (V) hesapla
if $V > V_{eni}$ **then**
 $V_{eni} \leftarrow V$
adım \leftarrow adım +1
4. Bireyin amaç fonksiyonu skorunu V_{eni} olarak döndür

Seçme işlemi, yeni bireylerin üretilmesinde popülasyon içindeki bireylerden en iyilerin alınmasıdır. Seçim yöntemleri arasında rulet tekerleği, turnuva seçimi ve elitizm bulunmaktadır. Bu çalışmada turnuva seçimi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde popülasyondan turnuva boyutu kadar birey seçilerek her bireyin amaç fonksiyon skoru değerlendirilmektedir. Daha yüksek performans gösteren birey genetik operatör tarafından kullanılmak üzere ebeveyn olarak döndürülmektedir. Algoritma 2'de turnuva seçimi sözde kodu verilmiştir.

Algoritma 2: Turnuva Seçimi

Girdi: turnuva boyutu

Çıktı: en iyi birey seçimi

for $i \leftarrow 1$ 'den popülasyon boyutuna kadar
 rastgele birey \leftarrow popülasyondan rastgele birey seçimi
 seçilen bireyin amaç fonksiyon skorunu karşılaştır
 en yüksek olanı seç
 seçilen bireyi döndür

Seçme, çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanarak tanımlanan ESA mimarisi, amaç fonksiyonu sonucuna göre iyileştirilir. Üretilen bireyler arasında değişiklik yapılarak genetik çeşitlilik sağlanır. Çaprazlama ve mutasyon ile elde edilen bireylerin mevcut popülasyondaki bireylerle yer değiştirmesi sonucunda yeni popülasyon oluşturulur.

ESA tasarımında, problemin çözümü için üretilecek ağdaki parametrelerin değer aralıklarının belirlenmesi ile arama uzayı oluşturulur. Bu çalışmada arama uzayı evrişim (convolution) bloğu sayısı, filtre sayısı, budama oranı, öğrenme oranı (learning rate), tam bağlantılı katman (dense) bloğu ve birimi sayısı, global ortalama havuzlama katmanını kullanımı içerir. Oluşturulan arama uzayında kullanılan parametreler ve olası değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre örnek bir birey yapısı [1, 64, 0.5, 0.01, 2, 256, 1] şeklindedir. Bu bireydeki ESA mimarisi 64 filtrelili 1 evrişim bloğunun ardından global ortalama havuzlama katmanı ve sonrasında 256 ve 128 birimli iki tam bağlantılı katman bloğundan oluşmaktadır. Tam bağlantılı katman bloklarındaki budama oranı 0.5, ağ için öğrenme oranı 0.01'dir. Tablo 1'deki parametreler ve değer aralıkları değerlendirildiğinde çalışmada 432 olası ESA mimarisinden en başarılı olan GA ile belirlenmeye çalışılmaktadır.

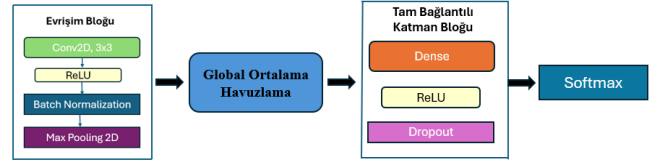
Çalışmada elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılması probleminin çözümünde en başarılı ESA mimarisini oluşturacak parametrelerin GA ile belirlenmesi hedeflenmiştir. Küçük arama uzayı, maliyeti azaltmakta fakat sınırlı mimari seçenekleri sunmaktadır. Geniş arama uzayı ise daha fazla zaman ve hesaplama gücü gerektirmektedir. Çalışmada elde edilen donanım imkanları ölçüsünde geniş bir arama uzayı oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tablo 1. Arama uzayı parametre ve değerleri

Arama Uzayı	
Evrişim Bloğu Sayısı	[1, 2, 3]
Filtre Sayısı	[16, 32, 64]
Budama Oranı	[0.0, 0.5, 0.8]
Öğrenme Oranı	[1e-3, 1e-2]
Tam Bağlantılı Katman Bloğu Sayısı	[1, 2]
Tam Bağlantılı Katmandaki Birim Sayısı	[128, 256]
Global Ortalama Havuzlama Katmanı Kullanımı	[0, 1]

Çalışmada ESA mimarisi, evrişim ve tam bağlantılı katman bloklarının art arda sıralanması ile oluşturulmaktadır. Bir evrişim bloğu, 3x3 filtreleme, ReLu aktivasyon fonksiyonu, yığın normalizasyonu (batch normalization) ve 2x2 maksimum ortalama havuzlama katmanlarından oluşmaktadır. İlk evrişim bloğunda filtre sayısı kadar filtre uygulanır. Blok sayısı arttıkça filtre sayısı önceki bloğun iki katına çıkarılır. Evrişim bloklarından sonra ilgili parametre

değerine göre global ortalama havuzlama katmanı eklenir. Mimarinin son kısmında ise tam bağlantılı katman bloğu/blokları yer alır. Bir tam bağlantılı katman bloğunda, tam bağlantılı katman, ReLu aktivasyon fonksiyonu ve budama oranı kullanılır. İlk tam bağlantılı katman bloğunda birim sayısı kadar bağlantı bulunur. Tam bağlantılı katman blok sayısı arttıkça birim sayısı yarıya düşürülür. Yöntemle üretilen örnek bir ESA mimarisi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Örnek bir ESA mimarisi

Deneysel Bulgular

Bu çalışmada elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılması amacıyla GA ile otomatik ESA tasarımı yöntemi önerilmiştir. Elma yaprağı görüntüleri PlantVillage veri setinden alınmıştır. Veri setindeki görüntülerin %80'i eğitim, %20'si doğrulama verisi olacak şekilde düzenlenmiştir. Veri kümesinin çeşitliliğini artırmak amacıyla, rastgele dönüşümler kullanılarak eğitim verilerine veri artırma işlemi uygulanmıştır. GA ile optimum parametrelerin keşfedilmesi amacıyla evrişim bloğu sayısı, filtre sayısı, budama (dropout) oranı, öğrenme (learning) oranı, tam bağlantılı katman bloğu sayısı, tam bağlantılı katman birimi ve global ortalama havuzlama katmanının kullanımı araştırılmıştır. Önerilen yöntemle tasarlanan ESA mimarisi, SqueezeNet, ShuffleNet, MobilNetV2 ağları ile kıyaslanmıştır. Modeller, Google Colab ortamında A100 GPU kullanılarak eğitilmiş ve test edilmiştir. Modellerin performansını ölçmek için Doğruluk (accuracy), Kesinlik (precision), Duyarlılık (recall) ve F1-skoru metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler Şekil 7'de görülen karmaşıklık matrisi kullanılarak sırasıyla Denklem 1-4'e göre hesaplanmaktadır. Denklemlerde DP (Doğru Pozitif) doğru sınıflandırılan pozitif örnek sayısını, DN (Doğru Negatif) doğru sınıflandırılan negatif örnek sayısını, YP (Yanlış Pozitif) yanlış sınıflandırılan pozitif örnek sayısını ve YN (Yanlış Negatif) ise yanlış sınıflandırılan negatif örnek sayısını ifade etmektedir.

		Tahmini Değer	
		Pozitif	Negatif
Gerçek Değer	Pozitif	DP	YN
	Negatif	YP	DN

Şekil 7. Karmaşıklık matrisi

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (1)$$

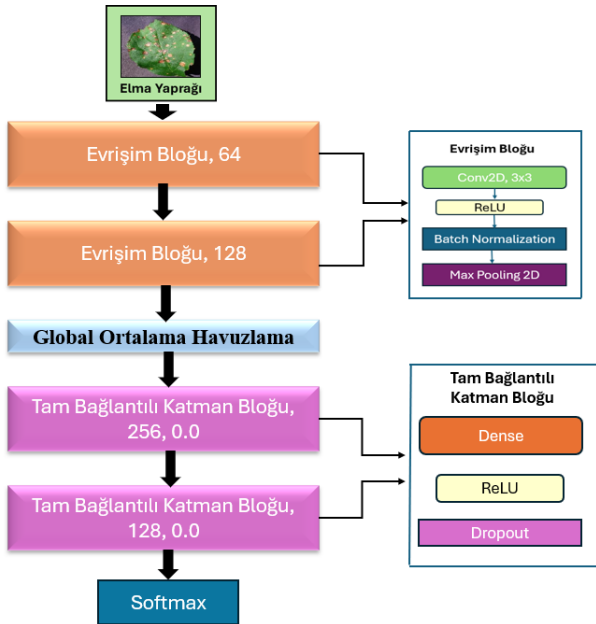
$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (3)$$

$$F1 \text{ Skor} = \frac{2 * (\text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık})}{(\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık})}$$

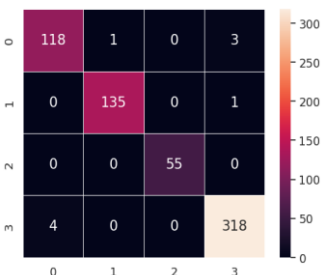
(4)

Çalışmada GA ile otomatik ESA tasarımında popülasyon boyutu 5, nesil sayısı 10 olarak belirlenmiştir. Nesil sayısı GA durdurma kriteri olarak ayarlanmıştır. Bunun dışında aktivasyon fonksiyonu ReLu, optimize edici Adam, çekirdek boyutu (3,3) ve yığın boyutu 64 olarak kullanılmıştır. Arama uzayındaki arama süreci sonunda, önerilen yöntem ile elma yaprağı hastalığı sınıflandırma problemi için elde edilen en iyi mimari Şekil 8’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en iyi mimari 64 ve 128 filtrelili 2 evrişim bloğu, global ortalama havuzlama katmanı, 256 ve 128 birimli tam bağlantılı katman bloğundan oluşmaktadır. En iyi mimaride, budama oranı değeri 0.0, öğrenme (learning) oranı değeri ise 0.01’dir.

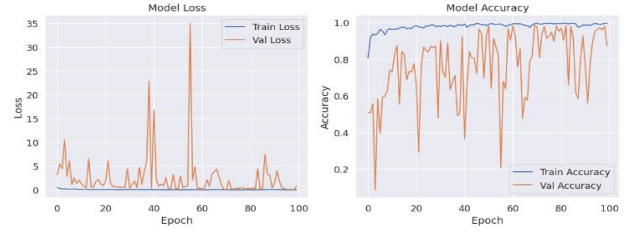


Şekil 8. GA ile oluşturulan en iyi mimari

Bulunan en iyi mimari daha sonra aynı parametreler kullanılarak eğitim kümesi üzerinde 100 dönem eğitilmiş ve doğrulama kümesi üzerindeki başarımları elde edilmiştir. Buna göre otomatik üretilen mimari ile elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılmasında %98.58 doğruluk, %98.68 F1-skoru, %98.68 kesinlik ve %98.68 duyarlılık sonuçlarına ulaşılmıştır. Doğrulama kümesi üzerinde elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 9’da modelin doğruluk ve kayıp grafikleri Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 9. Önerilen model ile doğrulama kümesinden elde edilen karmaşıklık matrisi



Şekil 10. Önerilen modelin doğruluk ve kayıp grafikleri

Her bir hastalığın sınıflandırma doğruluğu Tablo 2’de verilmiştir. Karmaşıklık matrisi ve Tablo 2 incelendiğinde modelin “elma pası” sınıfını 100% doğruluk ile sınıflandırdığı görülmektedir. “sağlıklı” ve “siyah çürüklük” hastalığı sırasıyla %98.75 ve %99.26 başarımla sınıflandırılmaktadır. Önerilen model “elma kabuk hastalığı” hastalığının sınıflandırılmasında diğerlerine göre %96.72 doğruluk ile daha düşük bir performansa sahiptir.

Tablo 2. Önerilen yöntem ile elde edilen sınıf başarımları değerleri

Sınıf Adı	Başarımları (%)
Kabuk Hastalığı (0)	96.72
Siyah Çürük (1)	99.26
Elma Pası (2)	100
Sağlıklı (3)	98.75

Önerilen modelin SqueezeNet, ShuffleNet ve MobileNetV2 ağları ile performans karşılaştırılması Tablo 3’te verilmiştir. Önerilen yöntem SqueezeNet ve ShuffleNet ön eğitilmiş modellerinden daha yüksek doğruluk (98.58%), F1-skoru (98.68%), kesinlik (98.68%) ve duyarlılık (98.68) performansı göstermiştir. Tablo incelendiğinde önerilen yöntemin diğer ön eğitilmiş ağlarla kıyaslanabilir performans gösterdiği görülmektedir.

Tablo 3. Önerilen model, SqueezeNet, ShuffleNet ve MobileNetV2 ile elde edilen başarımları sonuçları

Yöntem	Doğ. (%)	F1 (%)	Kes. (%)	Duy. (%)	Parametre Sayısı
SqueezeNet	98.42	98.22	97.99	98.46	724.560
ShuffleNet	97.00	96.89	96.28	97.61	4.022.840
MobileNetV2	99.05	99.10	98.92	99.30	18.316.696
Önerilen Yöntem	98.58	98.68	98.68	98.68	427.790

Önerilen GA ile otomatik ESA tasarımı yönteminin sonuçları, literatürdeki elma yaprak hastalığı çalışmalarıyla Tablo 4’te kıyaslanmıştır. Tabloda yer alan çalışmalarda yüksek parametre sayısına sahip karmaşık yapıları ağlar (VGG, ResNet, AlexNet, DenseNet vb.) kullanılmıştır. Önerilen GA modeli, daha az karmaşıklığa sahip olmasına rağmen, bu yöntemlerle kıyaslanabilir bir başarı elde etmiştir.

Tablo 4. Önerilen modelin literatürle karşılaştırılması

Yöntem	Veri Seti	Doğruluk (%)
--------	-----------	--------------

[16]	Google'dan toplanan veriler	97.87
[17]	Araştırmacıların verileri	99.00
[18]	Plant Village	97.00
[19]	Plant Village	98.75
[20]	Plant Village	99.56
[21]	Plant Village	98.94
[22]	FGCV-8	91.63
Önerilen Model	Plant Village	98.58

Sonuçlar

ESA modeli tasarım süreci çok sayıda kapsamlı deney ve uzman bilgisi gerektirmektedir. Bu durum probleme uygun optimal bir ESA'nın tasarım sürecini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılması amacıyla GA ile otomatik ESA mimarisi tasarımı önerilmiştir. Problemin çözümü için en iyi ESA mimarisinin tasarımında, evrişim bloğu sayısı, filtre sayısı, budama oranı, öğrenme oranı, tam bağlantılı katman bloğu sayısı, tam bağlantılı katman birimi sayısı ve global ortalama havuzlama katmanının kullanımı parametrelerinin GA ile belirlenmesi sağlanmıştır. Otomatik üretilen mimari ile elma yaprağı hastalıklarının sınıflandırılmasında %98.58 doğruluk, %98.68 F1-skoru, %98.68 kesinlik ve %98.68 duyarlılık sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan mimarinin performansı SqueezeNet, ShuffleNet ve MobileNetV2 ön eğitilmiş ağlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, otomatik üretilen ESA mimarisinin, daha az karmaşıklıkla kıyaslanabilir bir başarıya sahip olduğunu göstermiştir. Gelecek çalışmalarda otomatik ESA tasarımında farklı arama algoritmalarının kullanımı ile, mimari arama sürecinin daha kısa sürede gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca farklı bitki türleri için de önerilen model uygulanarak düşük karmaşıklığa yüksek başarıya sahip ESA mimarileri tasarlanabilir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

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

Kaynaklar

- [1] C. Chantrapornchai, S. Kajkamhaeng, P. Romphet, "Micro-architecture design exploration template for AutoML case study on SqueezeSEMAuto," Scientific Reports 13(1), 2023, 10642.
- [2] W. N. Ismail, H. A. Alsalamah, M. M. Hassan, E. Mohamed, "AUTO-HAR: An adaptive human activity recognition framework using an automated CNN architecture design," Heliyon 9(2), 2023.
- [3] A. A. Ahmed, S. M. Darwish, "A meta-heuristic automatic CNN architecture design approach based on ensemble learning," IEEE Access, 9, 2021, pp. 16975-16987.

[4] J. Liang, H. Cao, Y. Lu, M. Su, "Architecture search of accurate and lightweight CNNs using genetic algorithm," Genetic Programming and Evolvable Machines, 25(1), 2024, 13.

[5] A. Al Bataineh, D. Kaur, M. Al-khassaweneh, E. Al-sharoha, "Automated CNN architectural design: A simple and efficient methodology for computer vision tasks," Mathematics, 11(5), 2023, 1141.

[6] P. Liashchynskiy, P. Liashchynskiy, "Grid search, random search, genetic algorithm: a big comparison for NAS," arXiv preprint arXiv:1912.06059, 2019.

[7] B. Zoph, "Neural Architecture Search with Reinforcement Learning," arXiv preprint arXiv:1611.01578, 2016.

[8] V. Lopes, L. A. Alexandre, "HMCNAS: Neural architecture search using hidden Markov chains and Bayesian optimization," arXiv preprint arXiv:2007.16149, 2020.

[9] X. Yao, Y. Liu, "A new evolutionary system for evolving artificial neural networks," IEEE transactions on neural networks 8(3), 1997, pp. 694-713.

[10] E. Dufourq, B. A. Bassett, "Eden: Evolutionary deep networks for efficient machine learning," In 2017 Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics (PRASA-RobMech) IEEE, 2017 November, pp. 110-115.

[11] B. Zoph, V. Vasudevan, J. Shlens, Q. V. Le, "Learning transferable architectures for scalable image recognition," In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018, pp. 8697-8710.

[12] A. Gülcü, Z. Kuş, "A survey of hyper-parameter optimization methods in Convolutional neural networks," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 2019, 503-522.

[13] Y. Sun, B. Xue, M. Zhang, G. G. Yen, "Completely automated CNN architecture design based on blocks," IEEE transactions on neural networks and learning systems, 31(4), 2019, pp. 1242-1254.

[14] A. Meena, G. V. Reddy, D. P. Chavali, "Accelerated CNN Training with Genetic Algorithm," In 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI) Vol. 2 IEEE, 2024, March, pp. 1-6.

[15] B. Rogers, N. Noman, S. Chalup, P. Moscato, "A comparative analysis of deep neural network architectures for sentence classification using genetic algorithm," Evolutionary Intelligence, 17(3), 2024, 1933-1952.

[16] Y. Nagaraju, S. Swetha, S. Stalin, "Apple and grape leaf diseases classification using transfer learning via fine-tuned classifier," IEEE International Conference on Machine Learning and Applied Network Technologies, 2020, December, pp. 1-6.

[17] H. Çetiner, "Classification of Apple Leaf Diseases Using Convolutional Neural Network Approach,"

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi , 2021, s. 1130 – 1140.

[18] S. B. Reddy, S. Neeraja, “Plant leaf disease classification and damage detection system using deep learning models,” *Multimedia Tools and Applications*, 2022, pp. 24021-24040.

[19] P. K. Pradhan, “Comparison of various deep convolutional neural network models to discriminate apple leaf diseases using transfer learning,” *Journal of Plant Diseases and Protection* 129(6), 2022, pp. 1461-1473.

[20] F. O. Babalola, N. I Kpai, Ö. Toygar, “Deep Learning Based Classification of Apple Leaf Diseases Using AlexNet,” *Computer Science IDAP-2023*, 2023, pp. 67-74.

[21] N. Upadhyay, “Diagnosis of fungi affected apple crop disease using improved ResNeXt deep learning model,” *Multimedia Tools and Applications*, 2024, pp. 1-20.

[22] P. Rawat, S. K. Singh, “Apple Leaf Disease Detection Using Transfer Learning,” In *2024 International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS) IEEE*, 2024, pp. 1-6.

[23] Acar, E., Ertugrul, O. F., Aldemir, E., & Oztekin, A. (2022). Automatic identification of cassava leaf diseases utilizing morphological hidden patterns and multi-feature textures with a distributed structure-based classification approach. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 129(3), 605-621.

[24] Mahum, R., Munir, H., Mughal, Z. U. N., Awais, M., Sher Khan, F., Saqlain, M., ... & Tlili, I. (2023). A novel framework for potato leaf disease detection using an efficient deep learning model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 29(2), 303-326.

[25] Singh, P., Singh, P., Farooq, U., Khurana, S. S., Verma, J. K., & Kumar, M. (2023). CottonLeafNet: cotton plant leaf disease detection using deep neural networks. *Multim. Tools Appl.*, 82(24), 37151-37176.

[26] D. P Hughes, M Salathe , “An open-access repository of images on plant health to enable the development of mobile disease diagnostics,”, arXiv preprint arXiv:1511.08060, 2015.

[27] F. N. Iandola, “SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and<0.5 MB model size,” arXiv preprint arXiv:1602.07360, 2016.

[28] X. Z. Zhang, “Shufflenet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices,” In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 6848-6856.

[29] H. Jin, Y. Yang, “L-Net: lightweight and fast object detector-based ShuffleNetV2,” *J Real-Time Image Proc*, 2021.

[30] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L. C. Chen, “Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks,”. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 4510-4520.

[31] R. R. Indraswari, “Melanoma image classification based on MobileNetV2 network,” *Procedia computer science* 197, 2022, pp. 198-207.



Duygu tanımda akustik verilerle derin öğrenme modellerinin karşılaştırılması: LSTM ve DenseNet üzerine bir inceleme

Comparison of deep learning models with acoustic data in emotion recognition: a study on LSTM and DenseNet

Buket İşler^{1*}, Fahreddin Raşit Kılıç²

¹ İstanbul Topkapı Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, buketisler@topkapi.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9393-9564>

² Konya Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, frkili@ktun.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2099-3279>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 31 Ekim 2024
Revizyon 10 Ocak 2025
Kabul 2 Şubat 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

Ses tanıma, Duygu tanıma, LSTM, DenseNet

ÖZ

Duygu tanıma sistemleri, insan-makine etkileşiminde sezgisel ve etkili ara yüzlerin geliştirilmesine olanak tanıyan önemli bir teknolojidir. Son yıllarda derin öğrenme yaklaşımlarının benimsenmesiyle bu sistemlerin etkinliği artmış ve farklı model türlerinin performanslarının incelenmesi önem kazanılmıştır. Bu çalışma, ses tabanlı duygu sınıflandırma alanında uzun-kısa süreli bellek (Long-Short Time Memory-LSTM) ve DenseNet modellerinin performanslarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Emotion Speech Dataset (ESD) kullanılarak ses verileri üzerinde Mel Frekans Kepstral Katsayıları (MFCC) yöntemi ile özellik çıkarımı yapılmış, veriler dengelenmiş ve modeller eğitilmiştir. Performans değerlendirmesi, doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru metrikleri ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, LSTM modelinin tüm metriklerde %92 oranında başarı sergilediğini, DenseNet modelinin ise %88 oranında kaldığını göstermiştir. Üzgün duygusunda LSTM modeli %98 kesinlik ve %92 duyarlılık sunarken, DenseNet modeli %94 kesinlik ve %89 duyarlılık sağlamıştır. Şaşkın duygusunda LSTM %86 kesinlik ve %97 duyarlılık elde ederken, DenseNet %82 kesinlik ve %93 duyarlılık sunmuştur. Mutlu duygusunda her iki model daha düşük performans sergilemiş olup, LSTM %85 kesinlik ve %81 duyarlılık oranlarına, DenseNet ise %80 kesinlik ve %76 duyarlılık oranlarına ulaşmıştır. Sonuç olarak, LSTM modelinin, bu çalışma kapsamında kullanılan veri seti ve deneysel koşullarda zamansal veri işleme kapasitesi sayesinde daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 October 2024
Received in revised form 10 January 2025
Accepted 2 February 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Speech Recognition, Emotion Recognition, LSTM, DenseNet

Doi: 10.24012/dumf.1576811

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Emotion recognition systems are a significant technology enabling the development of more intuitive and effective human-machine interaction interfaces. In recent years, the adoption of deep learning approaches has enhanced the efficiency of these systems, and examining the performance differences among various model types has become a critical research area. This study aims to compare the performance of Long Short-Term Memory (LSTM) and DenseNet models in the field of speech-based emotion classification. The Emotion Speech Dataset (ESD) was utilised, and feature extraction was performed on the speech data using the Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) method. The data were balanced, and the models were trained. Performance evaluation was conducted using accuracy, precision, recall, and F1-score metrics. The results showed that the LSTM model achieved 92% success across all metrics, while the DenseNet model remained at 88%. For the "sad" emotion, the LSTM model provided 98% precision and 92% recall, whereas the DenseNet model yielded 94% precision and 89% recall. Regarding the "surprised" emotion, the LSTM model achieved 86% precision and 97% recall, while the DenseNet model recorded 82% precision and 93% recall. In the "happy" emotion, both models exhibited lower performance, with the LSTM model achieving 85% precision and 81% recall, and the DenseNet model attaining 80% precision and 76% recall. In conclusion, it was determined that the LSTM model demonstrated higher performance due to its temporal data processing capability, under the dataset and experimental conditions used in this study.

Giriş

Duygu, deneyimler, düşünceler veya insanlarla etkileşimler gibi girdilere tepki olarak gelişen dinamik bir bilişsel ve fizyolojik durumdur. Duygular, öznel deneyim, bilişsel süreçler, davranışsal tepkiler, fizyolojik değişimler ve iletişim süreçlerini kapsar. Bu kapsamda, duygu tanıma teknolojileri, insan duygularını çeşitli işaretlerden, örneğin ses tonu, yüz ifadeleri ve vücut dili gibi verilerden tespit etmeye yönelik olarak geliştirilmiştir. Otomatik duygu algılama sistemleri, makinelerin insan duygularını anlayarak daha duyarlı ve kişisel hizmetler sunmasını amaçlamaktadır. Duygusal durumların tespiti, insan-makine etkileşimlerini geliştirmek ve iletişim süreçlerini daha verimli hale getirmek açısından önemli bir role sahiptir. Pazarlama, sağlık hizmetleri, insan-robot etkileşimi ve güvenlik gibi alanlarda bu teknolojilere olan ilgi giderek artmaktadır. Sağlık sektöründe, duyguların izlenmesi nörolojik rahatsızlıkların yönetimi için kritik öneme sahiptir. Uyku bozuklukları, şizofreni, Parkinson hastalığı ve uyku kalitesinin değerlendirilmesi gibi sorunlarda duygu tanıma sistemlerinden yararlanılmaktadır [1],[2],[3]. Ayrıca, otizm spektrum bozukluğu, dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu ile panik bozukluğu gibi psikolojik durumların değerlendirilmesi ve yorgunluk, uykusuzluk, depresyon ile ağrı gibi fizyolojik durumların takibinde bu sistemlerin kullanım alanı genişlemektedir. Bu sistemler, zaman içinde duygusal değişimlerin izlenmesi ile daha kapsamlı veri analizi yapılmasına olanak tanımaktadır. Yapay zekâ ve derin öğrenme yöntemlerindeki gelişmeler, duygu tanıma teknolojilerinin doğruluğunu artırarak daha güvenilir sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır [4],[5],[6]. Literatürde, yüz ifadeleri ve ses tabanlı duygu tanıma sistemlerinde genellikle derin öğrenme modelleri tercih edilmektedir [7],[8]. Bu modeller, karmaşık veri yapılarında ve büyük veri setleri üzerinde etkili sonuçlar üreterek yüksek doğruluk oranlarına ulaşabilmektedir. Görsel ve işitsel verilerin işlenmesinde öne çıkan bu yaklaşımlar, insan duygularının doğru şekilde tanınmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle zamansal değişimlerin takibi gereken analizlerde, derin öğrenme tabanlı yöntemler dinamik veri analizine olanak tanımaktadır. Bu durum, duygu tanıma sistemlerinin insan davranışlarını daha kapsamlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirmesine imkân vermektedir [9],[10].

Bu çalışma, sesli duygu tanıma sistemlerinin geliştirilmesinde derin öğrenme tekniklerinin uygulanabilirliğini incelemeyi ve bu alandaki iki farklı model olan uzun-kısa süreli bellek (Long-Short Time Memory-LSTM) ve DenseNet modellerini karşılaştırarak ses verileri üzerinde duygu tanıma performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. LSTM, zamansal veri işleme yetenekleri ile tanınırken, DenseNet modeli hızlı eğitim süreci ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenme kapasitesi ile ön plana çıkmaktadır. Emotional Speech Database (ESD) kullanılarak gerçekleştirilen araştırma, Mel Frekans Kepstral Katsayıları (MFCC) yöntemiyle özellik çıkarımı yaparak farklı derin öğrenme yöntemlerinin doğruluk oranlarını analiz etmektedir. Çalışmanın literatüre özgün katkısı, aynı veri seti ve aynı özellik çıkarımı yöntemi kullanılarak iki farklı derin öğrenme modelinin (LSTM ve DenseNet) performansının kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırma, doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru gibi nicel bulgularla desteklenerek net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Özellikle, kullanılan yöntemlerin birbiriyle tutarlı bir şekilde uygulanması, iki modelin güçlü ve zayıf yönlerinin belirlenmesini sağlamış ve hangi durumlarda hangi modelin tercih edilebileceğine dair araştırmacılara rehberlik sunmuştur. Son olarak, elde edilen bulgular doğrultusunda gelecekteki duygu tanıma araştırmalarına sağlam bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın genel akışı dikkate alındığında, “İlgili Çalışmalar” başlığı altında ses tabanlı duygu tanıma alanında literatürde yer alan çalışmalar detaylandırılmaktadır. “Materyaller ve Yöntemler” bölümünde, veri seti, kullanılan derin öğrenme tabanlı modeller, özellik çıkarım teknikleri ve deneysel prosedür gibi çalışmada kullanılan tüm materyal ve metodlar açıklanmaktadır. “Bulgular” başlığı altında, gerçekleştirilen analizler tablo ve şekillerle sunulmakta ve yorumlanmaktadır. Çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesi ve elde edilen bulguların literatür ile karşılaştırılarak tartışılması ise “Tartışma ve Sonuç” başlığı altında yapılmaktadır.

İlgili Çalışmalar

Literatürde yaygın olarak kullanılan bu yöntemler, duygu tanımanın önemini ve uygulama alanlarını genişleterek teknolojilerin daha sezgisel ve etkili hale gelmesine olanak tanımaktadır. Farklı yıllarda yapılan çalışmalar, derin öğrenme tekniklerinin sesli duygu tanıma alanındaki başarısını göstermektedir:

2018 yılında yapılan bir çalışmada, derin sinir ağlarının konuşmadan duygu tanıma alanında büyük potansiyel taşıdığı belirtilmiştir. Araştırmada, MSP-Podcast veri seti kullanılarak farklı DenseNet mimarileri incelenmiş; ağırlık genişliği, derinliği, aktivasyon fonksiyonları ve veri artırma yöntemlerinin etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, daha büyük eğitim setlerinin performansı artırdığını, daha derin ağlar için batch normalizasyonun kritik olduğunu ve residual ağlarla DenseNet ağlar arasında performans farkının minimal olduğunu ortaya koymuştur [11]. Elektroansefalografi (EEG) tabanlı duygusal tanıma üzerine yapılan bir çalışmada, "kanal-füzyonlu DenseNet konvolüsyon ağı" adı verilen yeni bir derin öğrenme modeli önerilmiştir. Model, EEG sinyallerindeki zamansal ve uzamsal özellikleri öğrenmek için 1-D konvolüsyon katmanları ve DenseNet kullanmıştır. SEED ve DEAP veri setleri üzerinde yapılan deneylerde sırasıyla %90.6 ve %92.5 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır ve bu sonuçlar, modelin diğer çalışmalara kıyasla daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur [12]. 2021 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, insan-makine etkileşiminde konuşma duygularını otomatik olarak tanımak amacıyla hibrit bir model geliştirilmiştir. Bu modelde Evrimsel Sinir Ağları (CNN) ve LSTM mimarileri birleştirilerek Convolutional LSTM (Co-LSTM) yöntemi oluşturulmuştur. MFCC kullanılarak konuşma sinyallerindeki duygular tanınmış ve RAVDESS ile TESS veri setlerinde %86.7 doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yöntemin diğer sınıflandırıcılardan daha etkili olduğunu göstermiştir [13]. Ses temelli duygu tanıma ile ilgili bir çalışmada, ses verilerini analiz etmek için Bag-of-Audio-Words (BoAW) özellikleri ve tekrarlayan sinir ağları (RNN) tabanlı bir duygu tespit modeli önerilmiştir. IEMOCAP veri seti üzerinde yapılan

deneylerde yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir [14]. Aynı yıl yapılan bir başka çalışmada, LSTM ağlarının çeşitli mimariler ve optimizasyon teknikleri ile otomatik konuşma tanıma (ASR) sistemlerinin doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir. LSTM tabanlı sistemlerin, özellikle gürültülü ortamlarda geleneksel yöntemlerden daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir [15]. 2023 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, sentetik duygusal konuşma verilerinin DenseNet sinir ağları ile birleştirilmesi sonucu model performansının kayda değer biçimde iyileştiği gözlemlenmiştir [16]. 2024 yılında yapılan bir çalışmada, geleneksel LSTM ağlarının yüksek güç tüketimi sorunlarını çözmek amacıyla FPGA tabanlı bir LSTM hızlandırıcısı geliştirilmiştir. Bu hızlandırıcı, konuşma tanıma görevlerinde enerji verimliliğini artırırken güç tüketimini önemli ölçüde azaltmıştır [17]. 2024'te gerçekleştirilen başka bir çalışmada, konuşma duygularını tanıma için kısa ve ritmik özelliklerin birleştirildiği yeni bir çoklu özellik yöntemi önerilmiştir. LSTM ağı ile yapılan deneylerde, Emo-DB veri setinde %100, CASIA'da %98.4 ve EMOVO'da %98.8 doğruluk oranları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yöntemin farklı diller ve duygu sınıflarında başarılı olduğunu göstermektedir [18].

Materyaller ve Yöntemler

Veri seti

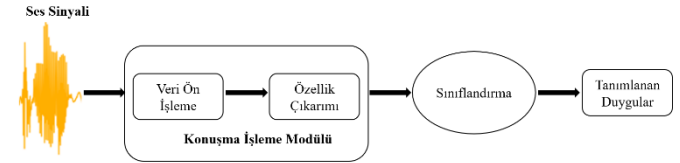
Bu çalışmada, duygusal konuşma tanıma (SER) alanında Singapur Ulusal Üniversitesi (NUS) ve Singapur Teknoloji ve Tasarım Üniversitesi (SUTD) tarafından sunulan ESD kullanılmıştır. ESD, nötr, mutluluk, öfke, üzüntü ve şaşkınlık duygularını içeren, her biri 10 İngilizce ve 10 Mandarin konuşmacı tarafından seslendirilen 350 paralel ifadede oluşmakta ve yaklaşık 29 saatlik ses verisi içermektedir. Kayıtlar kontrollü bir akustik ortamda yapılmış olup, her bir .wav dosyası, konuşmacı ve duygu sınıflarına göre organize edilmiş ve benzersiz dosya adlarıyla etiketlenmiştir. ESD, mono-dil ve çapraz-dil duygusal konuşma dönüştürme, metinden duygusal konuşmaya ve duygu yüklü metinden konuşma sistemleri için uygundur [19].

Metodoloji

Bu çalışmada, duygusal ses tanıma modeli için iki derin öğrenme yöntemi, LSTM ve DenseNet, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 1'de sunulan geleneksel konuşma duygu tanıma sistemine benzer bir yaklaşımla, ses sinyallerinden özellik çıkarımı, özellik seçimi ve sınıflandırma aşamaları gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, ses dosyaları Librosa kütüphanesi kullanılarak işlenmiş ve her bir ses sinyalinden karakteristik özellikler çıkarılmıştır. Özellik çıkarımı aşamasında, yaygın olarak kullanılan Mel Frekans Kepstral Katsayıları (MFCC) yöntemi tercih edilmiştir. Elde edilen özellikler, sınıflandırma modellerine girdi olarak verilmek üzere standart hale getirilmiştir. Ön işleme ve özellik çıkarımı adımlarının tamamlanmasından sonra, bu özellikler LSTM ve DenseNet modellerine ayrı ayrı verilmiş ve her bir model, ses verilerindeki duygusal içerikleri tanıyacak şekilde eğitilmiştir. Eğitim sürecinde, veri seti için farklı eğitim-test oranları (%70-30, %75-25, %85-15) denenmiş ve elde edilen performans sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan bu deneyler sonucunda, %80 eğitim- %20 test oranının en iyi sonucu verdiği belirlenmiş ve bu oran esas alınarak her iki

modelin eğitimi gerçekleştirilmiştir. Model hiperparametrelerinin belirlenmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan değerler dikkate alınmış ve herhangi bir hiperparametre optimizasyon yöntemi uygulanmamıştır. Son aşamada, model çıktıları doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru gibi performans metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Her iki model için elde edilen sınıflandırma raporları karşılaştırılmış ve sonuçlar doğrultusunda en iyi performansı sergileyen model belirlenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, ses tabanlı duygu tanıma süreçlerinde farklı derin öğrenme modellerinin performansını karşılaştırarak bu alandaki en etkili yöntemi belirlemektir.



Şekil 1. Önerilen Yöntemin Mimarisi

Kullanılan Modeller

Bu çalışmada, ESD kullanılarak, duygusal durumları tanıma amacıyla iki derin öğrenme modeli, LSTM ve DenseNet karşılaştırılmıştır.

LSTM

LSTM, RNN arasında, sıralı verilerle çalışırken uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme yeteneği sunar. Geleneksel RNN'ler kısa vadeli bağımlılıkları yakalayabilse de zamanla yayılmış girdilerle başa çıkmakta zorlanır ve "kaybolan gradyan" sorunu ortaya çıkar. Bu sorun, küçük ağırlık değerlerinin öğrenme sürecini yavaşlatması veya durdurması ile ilgilidir [20],[21]. LSTM, bu problemi çözmek için hücre belleği ve unutma, girdi ve çıktı kapıları gibi mekanizmalar kullanır [22]. Unutma kapısı, önceki zamandan gelen hangi bilgilerin eleneceğine karar verirken; girdi kapısı, yeni bilginin ne kadarının hafızaya kaydedileceğini kontrol eder. Çıktı kapısı ise bir sonraki katmana ne kadar bilgi aktarılacağını düzenler. Bu mekanizmalar sayesinde LSTM, sıralı verilerdeki uzun süreli ilişkileri etkili bir şekilde yakalayarak RNN'lerin temel sorunlarını aşar ve konuşma, dil işleme gibi alanlarda önemli bir performans avantajı sağlar. LSTM'ler, derin öğrenme çalışmalarında CNN ve klasik RNN'lerden daha başarılı performans göstermektedir [23].

DenseNet

DenseNet sinir ağları, her katmandaki nöronların bir önceki katmandaki tüm nöronlarla bağlantılı olduğu yapay sinir ağlarıdır ve karmaşık ilişkilerin öğrenilmesine olanak tanır [24]. Bir DenseNet ağı, giriş katmanı, bir veya daha fazla tam bağlantılı gizli katman ve çıkış katmanından oluşur. Eğitim sırasında ağırlıklar ve önyargılar optimize edilerek modelin doğruluğu artırılır [25]. ReLU, sigmoid ve tanh gibi aktivasyon fonksiyonları, her katmandaki girdileri işleyerek ağın doğrusal olmayan ilişkileri modellemesini sağlar. DenseNet sinir ağları, özellikle konuşma tanıma ve duygu analizi gibi görevlerde üstün performans gösterir [26]. Bu süreçte ses sinyalleri önce MFCC gibi özellik çıkarım teknikleriyle işlenir, ardından sınıflandırma için DenseNet

sinir ağına aktarılır. Ağın tam bağlantılı yapısı, ses sinyallerindeki karmaşık kalıpları öğrenmesini sağlayarak daha doğru sınıflandırmalar yapmasına olanak tanır [27].

Sonuçlar

LSTM Modeli ve Sonuçları

Analiz süreci, MFCC özniteliklerinin çıkarılmasıyla başlamış ve bu işlemde $n_mfcc=40$ parametresi kullanılmıştır. Bu parametre, ses sinyallerinin spektral özelliklerini yeterli çözünürlükte temsil edebilmekte ve literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ses dosyalarından 3 saniyelik segmentler alınmış ve 0.5 saniyelik offset uygulanmıştır. Bu parametrelerin, duygusal ifadelerin karakteristik özelliklerini yakalamak için uygun zamansal çözünürlük sağladığı değerlendirilmiştir. Elde edilen MFCC matrisleri, LSTM modeline uygun formata dönüştürülmüş ve `pad_sequences_2d` fonksiyonu kullanılarak sabit uzunluğa getirilmiştir. Padding stratejisi olarak "post" seçilmiş ve böylece öznitelik dizilerinin başındaki kritik bilgilerin korunması sağlanmıştır. LSTM modeli için MFCC özellik çıkarım süresi 66.1 saniye olarak ölçülmüştür. Veri setinin eğitim ve test kümelerine ayrılmasında literatürde yaygın olarak kullanılan %80 eğitim- %20 test oranı esas alınmış, ancak bu oranla yapılan deneyler yalnızca tek bir seferde değil, farklı rastgele bölünmelerle birçok kez tekrarlanmıştır. Her çalıştırmada model performansı değerlendirilmiş ve sonuçların tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında farklı veri bölme oranları da (%70-30, %75-25, %85-15) denenmiş, ancak %70-30 oranında modelin yeterince öğrenemediği, %85-15 oranında ise test kümesinin küçük kalması nedeniyle değerlendirme güvenilirliğinin azaldığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda %80 eğitim- %20 test oranının modelin öğrenme kapasitesi ve genelleme başarısı açısından optimal sonuç verdiği tespit edilmiştir. LSTM modeli için eğitim süresi 25 dakika 12 saniye, çıkarım süresi ise 101.98 ms ölçülmüştür. Çalışmada, duygusal konuşma tanıma sistemi için 5-katlı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Veri setinin katmanlara ayrılmasında StratifiedKFold sınıfı kullanılmış ve her katmanda sınıf dağılımlarının dengeli olması sağlanmıştır. Etiketler LabelEncoder ile sayısal değerlere dönüştürülmüş ve eğitim sürecinde kullanılmak üzere one-hot encoding yöntemi uygulanmıştır. Her bir katmanda, veri stratified splitting yöntemi ile %80 eğitim- %20 doğrulama oranında bölünmüş ve sınıf dengesi korunmuştur. Oluşturulan LSTM modeli, iki katmandan oluşmaktadır. İlk katmanda 128, ikinci katmanda 64 nöron bulunmaktadır. Literatürde benzer veri setleri ile yapılan çalışmalar dikkate alınarak nöron sayıları belirlenmiş ve modelin aşırı karmaşıklıktan kaçınarak yeterli öğrenme kapasitesine ulaşması hedeflenmiştir. İki ardışık LSTM katmanının kullanılması, veri içindeki zamansal örüntülerin daha etkin öğrenilmesini sağlamıştır. İlk LSTM katmanında `return_sequences=True` parametresi kullanılarak zamansal bilginin korunması amaçlanmıştır. Her iki katman arasında ReLU aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiş ve aşırı öğrenmeyi önlemek için %20 dropout uygulanmıştır. LSTM katmanlarından sonra 32 nöronlu bir Dense katman eklenerek yüksek seviyeli özniteliklerin daha yoğun ve anlamlı bir temsili sağlanmıştır. Dense katmanında ReLU, çıkış

katmanında ise çok sınıflı sınıflandırma amacıyla softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Eğitim sürecinde hiperparametre olarak Adam optimizasyon algoritması tercih edilmiştir. Adam, adaptif öğrenme oranı stratejisi sayesinde hızlı yakınsama ve gradyan problemlerini etkili bir şekilde yönetme kapasitesine sahiptir. Batch size 32 olarak belirlenmiş ve bu değer, modern GPU'ların bellek kapasitesini etkin kullanırken yeterli genelleme performansı sunduğu gözlemlenmiştir. Eğitim sürecinde epoch sayısı 50 olarak belirlenmiştir. Farklı epoch değerleri (20, 30, 40, 60 ve 100) denenmiş; 50 epoch değerinin modelin yakınsama performansı ve genel doğruluk açısından en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Daha düşük epoch sayılarında modelin yeterince öğrenemediği, daha yüksek epoch sayılarında ise aşırı öğrenme belirtileri gözlemlenmiştir. Early Stopping yöntemi tercih edilmemiş; bu karar, ESD veri tabanının homojen yapısı göz önünde bulundurularak, modelin belirli bir epoch sayısına kadar kesintisiz eğitilmesinin genelleme performansını iyileştireceği değerlendirilmesine dayandırılmıştır. Model hiperparametreleri belirlenirken literatürde yaygın olarak kullanılan değerler esas alınmış ve belirli bir hiperparametre optimizasyon yöntemi uygulanmamıştır. Bu seçimler, LSTM modelinin zamansal veri işleme yeteneğini ve ses verilerindeki duygusal özellikleri etkili şekilde öğrenme kapasitesini optimize etmeyi hedeflemiştir.

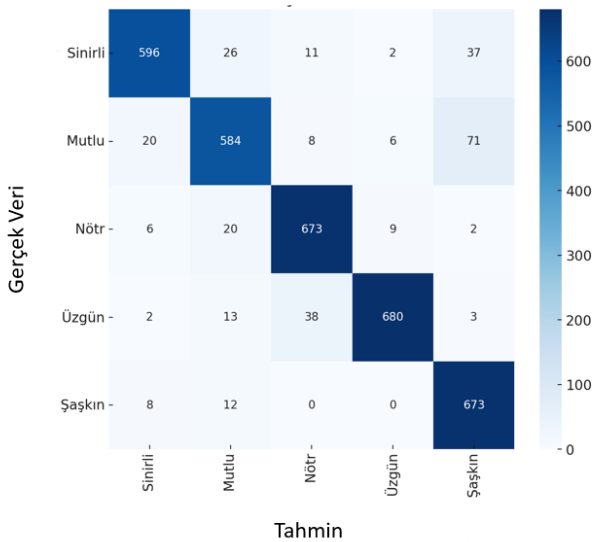
Sonuç olarak, belirlenen hiperparametreler ile eğitilen model, test verisi üzerinde %92 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu sonuçlar, seçilen hiperparametrelerin problem uzayı için uygun olduğunu ve modelin genel olarak etkin bir performans sergilediğini göstermektedir.

Model sonuçları, Tablo 1'de sunulan sınıflandırma metriklerine göre modelin ses verileri üzerinden duyguları tanıma performansını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, özellikle Üzgün duygusunun %98 kesinlik ve %95 F1-skoru ile en yüksek başarıyı sergilediği görülmektedir. Bu durum, modelin bu duyguyu tanıma konusundaki yetkinliğini açıkça göstermektedir. Benzer şekilde, Nötr sınıfı %95 duyarlılık ve %93 F1-skoru ile başarılı bir şekilde tanınmış, modelin bu sınıfta da istikrarlı bir performans sergilediği belirlenmiştir. Öte yandan, Mutlu sınıfı %85 duyarlılık ve %87 F1-skoru ile diğer duygulara kıyasla daha düşük bir performans göstermiştir. Bu sonuç, modelin bu sınıfta sınırlı bir ayırt edici yeteneğe sahip olduğunu ve geliştirmeye ihtiyaç duyduğunu işaret etmektedir. Şaşkın duygusu ise %97 duyarlılık ile yüksek bir başarı sergilemiş olmasına rağmen, %86 kesinlik oranı bu sınıfta yanlış pozitif sonuçların nispeten daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum, şaşkınlık ile diğer duygular arasında benzerlik olabileceği ve modelin bu duyguyu diğer sınıflarla karıştırma eğiliminde olduğunu düşündürmektedir. Modelin genel doğruluk oranı %92 olarak belirlenmiştir. Ayrıca makro ve ağırlıklı ortalama değerlerinin tüm metriklerde %92 olması, sınıflar arasında genel olarak dengeli bir performans elde edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bazı sınıflarda daha yüksek bir ayırt edicilik sağlanması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu bulgular, modelin genel olarak ses verileri üzerinden duygu tanıma görevinde başarılı bir performans sergilediğini, ancak Mutlu ve Şaşkın sınıflarında daha iyi sonuçlar elde edebilmek için iyileştirmeye açık olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. LSTM Duygu Tanıma Sınıflandırma Performansı

Duygu	Keskinlik	Duyarlılık	F1-Skoru	Destek
Sinirli	0.94	0.89	0.91	672
Mutlu	0.89	0.85	0.87	689
Nötr	0.92	0.95	0.93	710
Üzgün	0.98	0.92	0.95	736
Şaşkın	0.86	0.97	0.91	693
Doğruluk			0.92	3500
Makro Ort.	0.92	0.92	0.92	3500
Ağırlıklı Ort.	0.92	0.92	0.92	3500

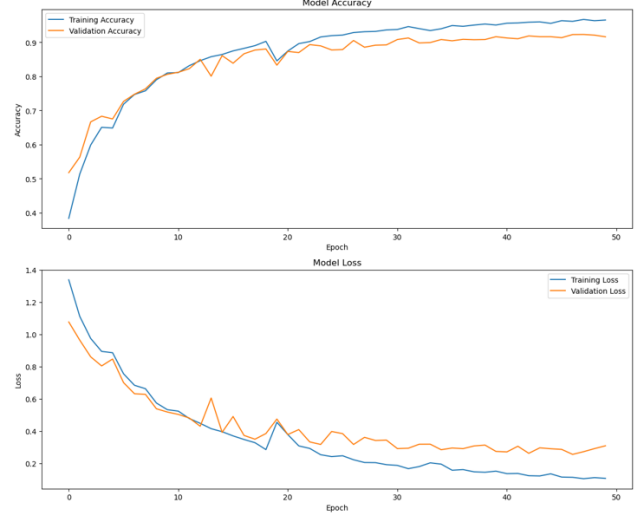
Şekil 2’de verilen LSTM karmaşıklık matrisi, modelin ses verileri üzerinden duyguları sınıflandırma performansını ayrıntılı olarak ortaya koymaktadır. Matris incelendiğinde, Nötr ve Üzgün duygularının yüksek doğruluk oranlarıyla doğru sınıflandırıldığı, bu duyguların diğer sınıflarla karışmasının oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Üzgün duygusunun yalnızca küçük bir kısmının Nötr ve Mutlu olarak yanlış sınıflandırılması, modelin bu duyguyu yüksek doğrulukla ayırt edebildiğini göstermektedir. Buna karşılık, Mutlu duygusunda diğer duygularla karışıklığın belirgin olduğu görülmektedir. Bu duygunun sıkça Şaşkın olarak yanlış tahmin edilmesi, modelin bu iki sınıfı ayırt etmekte zorlandığını göstermektedir. Benzer şekilde, Sinirli duygusunun genelde doğru sınıflandırıldığı, ancak bazı örneklerin Şaşkın olarak tahmin edilmesi karışıklığa yol açmıştır. Şaşkın duygusunda ise çoğunlukla doğru sınıflandırma yapılmış olmasına rağmen, az sayıda örneğin Mutlu ve Sinirli olarak hatalı sınıflandırıldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, modelin belirli duyguları ayırt etme yeteneğinin güçlü olduğu, ancak özellikle Mutlu ve Şaşkın duyguları arasında daha fazla karışıklık yaşandığı tespit edilmiştir. Bu durum, modelin performansını artırmak amacıyla daha gelişmiş özellik çıkarma yöntemlerinin veya farklı derin öğrenme mimarilerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır.



Şekil 2. LSTM Karmaşıklık Matrisi

LSTM modeline ait Şekil 3’te verilen grafik, modelin eğitim ve doğrulama süreçlerindeki doğruluk ve kayıp değerlerini göstermektedir. Üstteki doğruluk grafiğinde, modelin hem eğitim hem de doğrulama doğruluğunun epoch sayısı arttıkça

genel olarak yükseldiği görülmektedir. Eğitim doğruluğu, doğrulama doğruluğuna göre biraz daha yüksek olup yaklaşık %98’e ulaşırken, doğrulama doğruluğu %92 civarında stabil hale gelmiştir. Bu durum, modelin öğrenme sürecinde belirli bir seviyeye ulaştığını ve doğrulama verisi üzerinde iyi bir genelleme yaptığını göstermektedir. Alttaki kayıp grafiği, eğitim ve doğrulama kayıplarının zamanla azaldığını göstermektedir. Eğitim kaybı başlangıçta yaklaşık 1.2 seviyelerinde başlamakta ve epoch sayısı arttıkça 0.1’e kadar düşmektedir. Doğrulama kaybı ise başlangıçta 0.6-0.8 seviyelerinde olup, 50. epoch’ta yaklaşık 0.25 seviyesinde stabil hale gelmiştir. Doğrulama kaybı bazı epoch’larda dalgalanmalar gösterse de her iki kayıp değeri de düzenli olarak azalmaktadır. Bu durum, modelin genel olarak iyi bir performans sergilediğini ancak doğrulama verisinde zaman zaman tutarsızlıklar yaşandığını işaret etmektedir.



Şekil 3. LSTM Doğruluk ve Kayıp Grafiği

DenseNet Modeli ve Sonuçları

Analiz süreci, MFCC özniteliklerinin çıkarılmasıyla başlamıştır. Bu aşamada n_mfcc parametresi 40 olarak belirlenmiş ve bu değer ses sinyallerinin spektral özelliklerini yeterli detay seviyesinde temsil ettiği görülmüştür. MFCC parametresi, literatürde yaygın olarak kullanılan değerler dikkate alınarak seçilmiştir. Ses dosyalarından 3 saniyelik kesitler alınmış ve 0.5 saniyelik offset uygulanmıştır. Bu pencere boyutlarının, duygusal ifadelerin karakteristik özelliklerini yakalamak için uygun olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen MFCC matrisleri, DenseNet modeline uygun formata dönüştürülmüş ve pad_sequences_2d fonksiyonu ile sabit uzunluğa getirilmiştir. Padding stratejisi olarak "post" seçilmiş, böylece öznitelik dizilerinin başındaki kritik bilgilerin korunması sağlanmıştır. Veri setinin eğitim ve test kümelerine ayrılmasında literatürde yaygın olarak tercih edilen %80 eğitim- %20 test oranı esas alınmıştır. Farklı oranlarla (%70-30, %75-25, %85-15) yapılan denemeler sonucunda, %80 eğitim- %20 test oranının modelin öğrenme kapasitesi ve değerlendirme güvenilirliği açısından en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, eğitim ve test süreci için 5-katlı cross-validation yaklaşımı benimsenmiş ve veri seti, StratifiedKFold yöntemi ile katmanlara ayrılarak sınıf

dağılımlarının dengeli olmasına dikkat edilmiştir. Etiketler, LabelEncoder ile sayısal değerlere dönüştürülmüş ve eğitim sürecinde kullanılmak üzere one-hot encoding yöntemi uygulanmıştır. Her bir katmanda veri, %80 eğitim- %20 doğrulama oranında stratified splitting yöntemi ile ayrılmış ve sınıf dengesi korunmuştur. DenseNet modeli için eğitim süresi 66.8 saniye, çıkarım süresi ise 25.31 ms ölçülmüştür. Oluşturulan DenseNet modeli, üç katmandan oluşmaktadır. İlk katmanda 256, ikinci katmanda 128 ve üçüncü katmanda 64 nöron bulunacak şekilde hiyerarşik bir azalma prensibi benimsenmiştir. Bu yapı, yüksek seviyeli özneteliklerin kademeli olarak yoğun ve anlamlı hale gelmesini sağlamaktadır. Nöron sayıları belirlenirken, literatürde benzer veri setleri ile yapılan çalışmalar göz önüne alınmış ve modelin yeterli öğrenme kapasitesine ulaşırken aşırı karmaşıklıktan kaçınılması hedeflenmiştir. Her bir Dense katmanından sonra %30 dropout uygulanmış; bu değer, overfitting'i önlerken modelin öğrenme kapasitesini koruyacak şekilde belirlenmiştir. Gizli katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU, çıkış katmanında ise çok sınıflı sınıflandırma için softmax fonksiyonu kullanılmıştır. ReLU fonksiyonunun tercih edilme nedeni, gradyan sönümü problemini azaltma ve doğrusal olmayan özellikleri etkili şekilde modelleme kapasitesidir. Eğitim sürecinde hiperparametreler dikkatle belirlenmiştir. Optimizer olarak, adaptif öğrenme oranı ve hızlı yakınsama sağlaması nedeniyle Adam algoritması kullanılmıştır. Batch size 32 olarak belirlenmiş; bu değer, modern GPU'ların bellek kapasitesini etkin kullanırken yeterli genelleme performansı sunmaktadır. Epoch sayısı, eğitim ve doğrulama eğrileri analiz edilerek 50 olarak belirlenmiştir. Farklı epoch değerleri (20, 30, 40, 60 ve 100) ile yapılan denemeler sonucunda, 50 epoch değerinin modelin öğrenme kapasitesini en iyi şekilde yansıttığı ve genel doğruluk açısından en başarılı sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Daha düşük epoch değerleri yetersiz öğrenmeye, daha yüksek epoch değerleri ise aşırı öğrenmeye yol açmıştır. Early Stopping yöntemi, ESD veri tabanının homojen yapısı nedeniyle uygulanmamış; modelin belirli bir epoch sayısına kadar kesintisiz eğitilmesinin genelleme performansını artıracığı öngörülmüştür. Belirlenen hiperparametrelerle eğitilen model, test verisi üzerinde %88 doğruluk sağlamış ve bu sonuç, hiperparametre seçimlerinin uygunluğunu ve modelin etkinliğini göstermiştir.

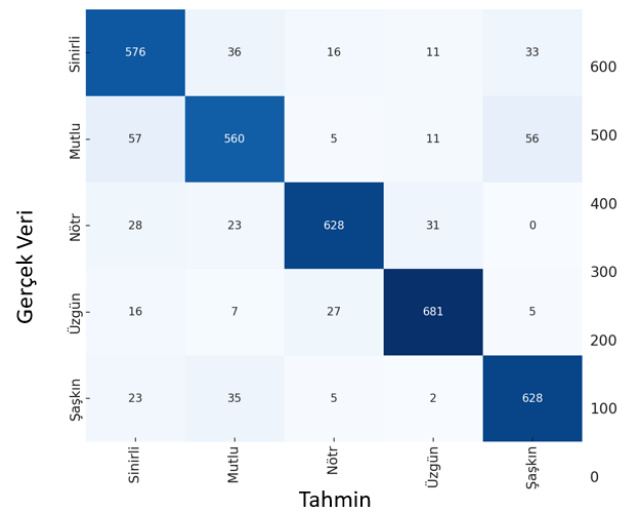
Tablo 2'de sunulan sınıflandırma raporu, DenseNet modelinin sesli duygu tanıma görevindeki genel performansını ve sınıf bazında başarı oranlarını ayrıntılı olarak göstermektedir. Modelin en yüksek performansı Üzgün duygusunda sergilediği, bu sınıfta hem %93 kesinlik hem de %93 duyarlılık ile başarılı bir sınıflandırma yaptığı görülmektedir. Benzer şekilde, Nötr duygusu da %92 kesinlik ve %90 F1-skoru ile yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır, bu da modelin bu duygu üzerinde etkili bir şekilde genelleme yapabildiğini göstermektedir. Şaşkın duygusu, %87 kesinlik ve %91 duyarlılık ile dengeli bir performans sergileyerek başarılı şekilde sınıflandırılmıştır. Ancak, Mutlu ve Sinirli duyguları diğer sınıflara kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Özellikle Mutlu duygusunda %85 kesinlik ve %81 duyarlılık elde edilmiş olup, bu duygunun sınıflandırılmasında modelin belirli hatalar yaptığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, Sinirli duygusu %82

kesinlik ve %84 F1-skoru ile modelin en düşük performans gösterdiği sınıf olmuştur. Bu durum, modelin Sinirli duygusunu diğer duygulardan ayırt etmede daha fazla zorlandığını işaret etmektedir. Modelin genel doğruluğu %88 olarak belirlenmiş olup, bu sonuç tüm sınıflar arasında dengeli bir performans sergilendiğini ortaya koymaktadır. Makro ortalama ve ağırlıklı ortalama değerlerinin de %88 olması, sınıflar arasında herhangi bir belirgin dengesizlik bulunmadığını ve modelin genel genelleme yeteneğinin iyi olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle Sinirli ve Mutlu duygularında daha iyi ayırt edicilik sağlanabilmesi için modelin geliştirilmesine yönelik iyileştirme çalışmaları yapılması gerekmektedir. Bu sonuçlar, DenseNet modelinin ses verileri üzerinden duygu tanıma görevinde genel olarak başarılı bir performans sergilediğini, ancak bazı sınıflarda daha yüksek doğruluk elde edilebilmesi için ileri düzey optimizasyon ve daha fazla veri ile eğitimin faydalı olabileceğini göstermektedir.

Tablo 2. Dense Duygu Tanıma Sınıflandırma Performansı

Duygu	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Skoru	Destek
Sinirli	0.82	0.86	0.84	672
Mutlu	0.85	0.81	0.83	689
Nötr	0.92	0.88	0.90	710
Üzgün	0.93	0.93	0.93	736
Şaşkın	0.87	0.91	0.89	693
Doğruluk			0.88	3500
Makro Ort.	0.88	0.88	0.88	3500
Ağırlıklı Ort.	0.88	0.88	0.88	3500

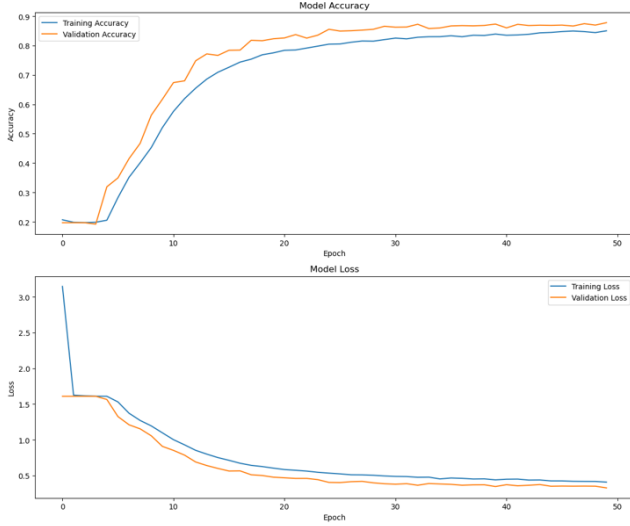
Şekil 4' de DenseNet modelinin sesli duygu tanıma performansı detaylı bir şekilde göstermektedir. Model, Sinirli duygusunu 576 kez doğru sınıflandırmış, ancak 36 kez Mutlu ve 33 kez Şaşkın olarak yanlış sınıflandırmıştır. Mutlu duygusunda, model 560 kez doğru sınıflandırma yapmış, ancak 57 kez Sinirli ve 56 kez Şaşkın olarak hatalı tahminlerde bulunmuştur. Nötr duygusu en iyi sınıflandırılan duygu olup, model bu sınıfı 628 kez doğru tahmin etmiş ve yalnızca küçük bir sapma göstermiştir. Üzgün duygusu da 681 kez doğru sınıflandırılmış, ancak 27 kez Nötr olarak hatalı tahmin edilmiştir. Şaşkın duygusunda ise 628 kez doğru sınıflandırma yapılmış, ancak 35 kez Mutlu olarak karıştırılmıştır.



Şekil 4. DenseNet Karmaşıklık Matrisi

Genel olarak, modelin Nötr ve Üzgün duygularında oldukça başarılı olduğu, ancak Mutlu ve Şaşkın duyguları arasında belirgin bir karışıklık yaşandığı gözlemlenmektedir.

Şekil 5'te DenseNet modeline ait grafikler değerlendirildiğinde, modelin eğitim ve doğrulama doğruluğu açısından dengeli bir performans sergilediği görülmektedir. Yaklaşık 10. epoch'tan itibaren doğruluk değerleri hızla artmış ve 30. epoch'ta %88 doğruluğa yaklaşmıştır. Eğitim ve doğrulama doğruluğunun birbirine yakın olması, modelin genelleme yeteneğinin güçlü olduğunu ve aşırı öğrenme sorunu yaşamadığını göstermektedir.



Şekil 5. DenseNet Doğruluk ve Kayıp Grafiği

Aynı zamanda, kayıp grafiğinde her iki kayıp eğrisinin de hızlı bir şekilde azaldığı gözlemlenmektedir. Eğitim kaybı başlangıçta yaklaşık 3.0 seviyelerinde başlamış ve epoch sayısı arttıkça 50. epoch'ta 0.1 seviyesine kadar düşmüştür. Doğrulama kaybı ise başlangıçta yaklaşık 2.5 seviyelerindeyken 50. epoch'ta 0.15 seviyesine kadar azalarak stabil hale gelmiştir. Bu, modelin doğrulama verisi üzerinde de etkili bir şekilde çalıştığını ve dengeli bir performans sergilediğini kanıtlamaktadır.

Tartışmalar ve Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, SER alanında LSTM ve DenseNet modellerinin performansları karşılaştırılmıştır. Modeller, MFCC tabanlı özellik çıkarımı kullanılarak eğitilmiş ve test edilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki modelin de duygusal durumların sınıflandırılmasında etkili olduğunu, ancak genel başarı oranı açısından LSTM modelinin daha ön plana çıktığını ortaya koymuştur. LSTM modelinin %92 doğruluk oranı ile daha iyi performans sunduğu belirlenmiştir. Araştırmanın genel doğruluk karşılaştırma sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Model Performans Karşılaştırması

Duygu	LSTM Doğruluk (%)	DenseNet Doğruluk (%)
Nötr	95	97
Üzgün	90	92
Kızgın	93	89
Mutlu	91	87
Korkmuş	89	85
Şaşırılmış	94	90

LSTM modeli, her bir duygusal sınıfta daha tutarlı ve yüksek doğruluk oranları sergilemiştir. Nötr, Üzgün, Kızgın, Mutlu, Korkmuş ve Şaşırılmış duygularında sırasıyla %95, %90, %93, %91, %89 ve %94 doğruluk oranları elde edilmiştir. Buna karşılık, DenseNet modeli, Nötr, Üzgün, Kızgın, Mutlu, Korkmuş ve Şaşırılmış duygularında sırasıyla %97, %92, %89, %87, %85 ve %90 doğruluk oranları ile performans göstermiş, genel doğruluk oranı %88 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, LSTM modelinin ardışık verilere dayalı sınıflandırma görevlerinde daha uygun olduğunu, DenseNet modelinin ise daha basit veri yapılarında belirli duygu sınıflarında daha başarılı performans sergileyebileceğini göstermektedir.

LSTM modellerinin ardışık verilerdeki zamansal bağlantıları yakalama yeteneği sayesinde avantaj sağladığı literatürde sıkça vurgulanmaktadır [28], [29]. Örneğin, Öztürk ve Pashaei [30] tarafından farklı veri setleri (RAVDESS ve TESS) kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, LSTM tabanlı model ile %86.7 doğruluk oranı elde edilmiştir. Veri setlerinin farklılığı nedeniyle doğrudan bir kıyaslama yapılamasa da benzer yöntemlerin kullanılması, önerilen modelin rekabetçi performansını değerlendirme açısından anlamlı bir referans sunmaktadır. Bu çalışmada %92 doğruluk oranına ulaşan LSTM modelinin etkili sonuçlar verdiği ifade edilebilir.

Literatür incelemeleri, LSTM modellerinin zamansal özelliklerin kritik olduğu veri setlerinde başarılı performans sergilediğini desteklemektedir [31], [32]. Bununla birlikte, Mutlu ve Sinirli duygularının sınıflandırılmasında belirli zorluklar yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, daha karmaşık veri yapılarının ele alınmasında model performansının iyileştirilebileceğini işaret etmektedir. Benzer veri seti (ESD) kullanılarak yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen LSTM tabanlı modelin rekabetçi bir performans sunduğu görülmektedir. 2022 yılında yapılan bir çalışmada, CycleGAN-EVC ve VAWGAN-EVC yöntemleri ile sırasıyla %89 ve %85 doğruluk oranları elde edilmiştir. Bu yöntemlerin duygusal ses dönüştürme üzerine odaklanması nedeniyle doğrudan kıyaslama yapılamasa da benzer veri işleme yaklaşımlarının kullanılması, bu çalışmada elde edilen sonuçların geçerliliğini desteklemektedir [33].

2024 yılında gerçekleştirilen bir başka çalışmada, ESD ve TESS veri setleri üzerinde Sabit Q Dönüşümü tabanlı özellik çıkarımı kullanılmış ve CNN tabanlı model ile paralel verilerde %98.9, paralel olmayan verilerde %61.7 doğruluk oranları elde edilmiştir. Özellikle paralel olmayan verilerde düşük doğruluk oranlarının gözlemlenmesi, veri türünün model performansını etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, önerilen LSTM tabanlı modelin paralel veri setleri üzerinde tutarlı şekilde yüksek doğruluk oranı sunduğunu ve zamansal analiz tabanlı yaklaşımların veri türüne bağlı olarak avantaj sağladığını ortaya koymaktadır [34].

Sonuç olarak, literatürde aynı veri seti kullanılarak yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında, önerilen yöntemin daha yüksek doğruluk oranları sunduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, zamansal veri analizine dayanan LSTM tabanlı modelin, SER uygulamalarında etkili bir seçenek olduğunu göstermektedir. LSTM modeli, ardışık verilerdeki bağlantıları yakalama yeteneği sayesinde, zamana bağlı özellikleri daha iyi çıkarabilmiş ve bu nedenle literatürdeki

diğer yöntemlerden daha başarılı olmuştur. DenseNet modelinin ise daha basit bir yapıya sahip olmasına rağmen, daha hızlı eğitildiği ve belirli duygusal sınıflarda (Nötr ve Üzgün) daha yüksek doğruluk oranları sağladığı belirlenmiştir. Ancak, genel doğruluk oranı bakımından LSTM'nin gerisinde kalmıştır.

Bu çalışmada, sesli duygu tanıma sistemlerinde model seçiminin, veri setinin yapısı ve sınıflandırılacak duygu türlerine bağlı olarak değişebileceği görülmüştür. LSTM modelinin ardışık verilerdeki zamansal bağıntıları daha iyi yakalama yeteneği sayesinde belirli veri setlerinde daha yüksek performans sergilediği, DenseNet modelinin ise bazı duygu sınıflarında daha hızlı ve etkili sonuçlar sunduğu gözlemlenmiştir.

Gelecekte, hiperparametre optimizasyonu, veri artırma tekniklerinin iyileştirilmesi ve daha büyük veri setlerinin kullanılması gibi stratejilerle modellerin doğruluk oranlarının artırılacağı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, farklı özellik çıkarım yöntemleri ile modellerin performansının daha da iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Özellikle hibrit yaklaşımlar, LSTM ve DenseNet gibi farklı modellerin güçlü yönlerini bir araya getirerek daha genel ve yüksek doğruluk oranına sahip çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Bu tür hibrit yöntemlerin, veri türüne bağlı olarak model performansını artırabileceği ve farklı uygulama alanlarında daha kapsamlı çözümler sağlayabileceği öngörülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Feinberg, TE, Rifkin A, Schaffer C, Walker E. "Facial discrimination and emotional recognition in schizophrenia and affective disorders". Archives of general psychiatry, 43(3), 276-279, 1986.
- [2] Kamble K, Sengupta J. "A comprehensive survey on emotion recognition based on electroencephalograph (EEG) signals". Multimedia Tools and Applications, 82(18), 27269-27304, 2023.
- [3] Cevik F, Kilimci ZH. "Derin öğrenme yöntemleri ve kelime yerleştirme modelleri kullanılarak Parkinson hastalığının duygu analiziyle değerlendirilmesi". Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(2), 151-161,2020.
- [4] Zhao J, Mao X, Chen L. "Speech emotion recognition using deep 1D & 2D CNN LSTM networks". Biomedical signal processing and control, 47, 312-323, 2019.
- [5] Saxena A, Khanna A, Gupta D. "Emotion recognition and detection methods: A comprehensive survey". Journal of Artificial Intelligence and Systems, 2(1), 53-79, 2020.
- [6] Durahim AO, Setirek,ÇA, Özel BB, Kebapçı H. "Türkçe şarkılar için şarkı sözleri üzerinden müzik duygu sınıflandırması". Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(2), 292-301,2018.
- [7] Nonis F, Dagnes N, Marcolin F, Vezzetti E. "3D approaches and challenges in facial expression recognition algorithms-a literature review". Applied Sciences, 9(18), 3904, 2019.
- [8] Vasdev D, Gupta V, Shubham S, Chaudhary A, Jain N, Salimi M, Ahmadian A." Periapical dental X-ray image classification using deep neural networks". Annals of Operations Research, 2022.
- [9] Ng HW, Nguyen VD, Vonikakis V, Winkler S. "Deep learning for emotion recognition on small datasets using transfer learning". In Proceedings of the 2015 ACM on international conference on multimodal interaction, pp. 443-449,2015.
- [10] Al-Turjman F. "Intelligence and security in big 5G-oriented IoNT: An overview". Future generation computer systems, 102, 357-368, 2020.
- [11] Abdelwahab M, Busso C. "Study of DenseNet network approaches for speech emotion recognition". In 2018 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), (pp. 5084-5088). IEEE, 2018.
- [12] Gao Z, Wang X, Yang Y, Li Y, Ma K, Chen G. "A channel-fused DenseNet convolutional network for EEG-based emotion recognition". IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 13(4), 945-954,2020.
- [13] Öztürk ÖF, Pashaei E. "Konuşmalardaki duygunun evrimsel LSTM modeli ile tespiti". Dicle University Journal of Engineering/Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 12(4),2021.
- [14] Chamishka S, Madhavi I, Nawaratne R, Alahakoon D, De Silva D, Chilamkurti N, Nanayakkara V. "A voice-based real-time emotion detection technique using recurrent neural network empowered feature modelling". Multimedia Tools and Applications, 81(24), 35173-35194,2022.
- [15] Oruh J, Viriri S, Adegun A. "Long short-term memory recurrent neural network for automatic speech recognition". IEEE Access, 10, 30069-30079,2022.
- [16] Latif S, Shahid A, Qadir J. "Generative emotional AI for speech emotion recognition: The case for synthetic emotional speech augmentation". Applied Acoustics, 210, 109425,2023.
- [17] Yin T, Dong F, Chen C, Ouyang C, Wang Z, Yang Y. "A Spiking LSTM Accelerator for Automatic Speech Recognition Application Based on FPGA". Electronics, 13(5), 827,2024.
- [18] Yang Z, Li Z, Zhou S, Zhang L, Serikawa S. "Speech emotion recognition based on multi-feature speed rate and LSTM". Neurocomputing, 601, 128177,2024.
- [19] Zhou K, Sisman B, Liu R, Li H. "Seen and unseen emotional style transfer for voice conversion with a new emotional speech dataset". In ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 920-924). IEEE, June 2021.
- [20] Hochreiter S, Schmidhuber J. "Long short-term memory". Neural computation, 9(8), 1735-1780, 1997.
- [21] Pascanu R, Mikolov T, Bengio Y. "On the difficulty of training recurrent neural networks". In International conference on machine learning. PMLR 28(3):1310-1318, 2013.
- [22] Gers FA, Schmidhuber J, Cummins F. "Learning to forget: Continual prediction with LSTM". Neural computation, 12(10), 2451-2471,2020.

- [23] Krishnamoorthy P, Sathiyarayanan M, Proença HP. "A novel and secured email classification and emotion detection using hybrid deep neural network". *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 5, 44-57,2024.
- [24] Hinton G, Deng L, Yu D, Dahl GE, Mohamed AR, Jaitly N, ... Kingsbury B. "Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups". *IEEE Signal processing magazine*, 29(6), 82-97,2012.
- [25] Dahl GE, Sainath TN, Hinton GE. "Improving deep neural networks for LVCSR using rectified linear units and dropout". In *2013 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing*, 8609-8613, 2013.
- [26] Graves A, Mohamed AR, Hinton G. "Speech recognition with deep recurrent neural networks". In *2013 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing*, 6645-6649, 2013.
- [27] Yu D, Deng L. *Automatic speech recognition (Vol. 1)*. Berlin: Springer,2016.
- [28] Mai S, Xing S, Hu H. "Analyzing multimodal sentiment via acoustic-and visual-LSTM with channel-aware temporal convolution network". *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 29, 1424-1437, 2021.
- [29] Çam NB, Dönmez İ, Bitikçioğlu ÖF, Yediparmak FB, Bektaş E, Haklıdır M." Multimodal Speech Emotion and Text Sentiment Analysis". In *2023 8th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* (pp. 157-162), September 2023.
- [30] Öztürk, Ö. F., Pashaei, E. (2021). Konuşmalardaki duygunun evrimsel LSTM modeli ile tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(4), 581-589.
- [31] Olthof AW, van Ooijen PM, Cornelissen LJ. "Deep learning-based natural language processing in radiology: the impact of report complexity, disease prevalence, dataset size, and algorithm type on model performance". *Journal of medical systems*, 45(10), 91,2021.
- [32] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. "Deep learning. *Nature*", 521, 436-444,2015.
- [33] Zhou, K., Sisman, B., Liu, R., & Li, H. (2022). Emotional voice conversion: Theory, databases and ESD. *Speech Communication*, 137, 1-18.
- [34] Uthiraa, S., Vora, A., Bonde, P., Pusuluri, A., Patil, H. A. (2024, July). Spectral and Pitch Components of CQT Spectrum for Emotion Recognition. In *2024 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)* (pp. 1-5). IEEE.
- [35] Wang L, Xiong Y, Wang Z, Qiao Y, Lin D, Tang X, Gool LV. "Temporal Segment Networks for Action Recognition in Videos". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41, 2740-2755, 2019.



Preprocessed Vision Transformers and Classical Classifiers in Diagnosing Skin Diseases

Bilal ŞENOL^{1*}, Uğur DEMİROĞLU²

¹ Aksaray University, Software Engineering Department, bilal.senol@aksaray.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-3734-8807

² Kahramanmaraş İstiklal University, Software Engineering Department, ugurdemiroglu@istiklal.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-0000-8411

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 November 2024
Received in revised form 21 January 2025
Accepted 4 March 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Skin Diseases, Preprocessing, Adaptive Histogram Equalization, Classification, Vision Transformers

Doi: 10.24012/dumf.1577835

* Corresponding author

ABSTRACT

Vision Transformers (ViTs) represent the cutting edge of deep learning technology in medicine. Due to their large number of parameters, ViTs require extensive datasets for effective learning, which has become feasible with the digitization of healthcare. In contrast, classical classifiers typically operate with smaller datasets and fewer input features. High-resolution images, such as those obtained from dermoscopy, confocal microscopy, reflectance confocal microscopy, and Raman spectroscopy, are commonly used for diagnosing skin diseases in clinical practice. ViTs show significant promise in this area due to their unique design, which eliminates the need for convolutional operations used in convolutional neural networks (CNNs). This study introduces an artificial intelligence method for classifying skin diseases into five categories: normal, melanoma, arsenic-related conditions, psoriasis, and eczema. Images from the dataset were firstly preprocessed using the Adaptive Histogram Equalization (AHE) technique to enhance contrast and reveal critical details. ViTs were then employed to extract complex visual features from these images. These features were subsequently combined with traditional machine learning classifiers, resulting in highly accurate skin disease diagnoses. Additionally, comparative experiments were performed on dermatoscopic images from another dataset, reinforcing the versatility and effectiveness of this approach. The findings highlight the potential of integrating ViTs with classical classifiers to improve the accuracy and reliability of medical image classification tasks.

Introduction

Skin diseases represent a significant public health issue due to their high prevalence and the detrimental effects they have on the quality of life of affected individuals. The skin and its appendages play a role in various disease processes, often displaying signs that are observable from afar. Dermatological disorders contribute to physical morbidity and are associated with anxiety, depression, and psychological disturbances. Hyperactive sebaceous glands contribute to conditions like acne and seborrheic dermatitis, characterized by the overproduction of sebum. In conditions such as ichthyosis, reduced sebum production frequently results in dry, flaky scales, contributing to a rough skin appearance. 'Skin diseases' is a broad term encompassing various abnormal conditions impacting the dermal and epidermal layers of the skin. The skin can indicate underlying diseases resulting from alterations in biochemical compounds. Skin diseases may be classified as primary, where the skin is directly affected, or secondary, where the skin exhibits significant lesions as a result of changes in another system or organ. These may arise from the irregular functioning of sweat and oil glands or from exposure to environmental pollutants, resulting in the development of anticipated skin diseases or conditions. This

manuscript presents a thorough analysis of the causes, symptoms, and treatments of common skin diseases. Skin diseases represent a prevalent category of disorders, prompting millions of patients to seek medical attention. Psychological and social factors, including feelings of embarrassment and the concealment of a disease, primarily motivate individuals to consult a practitioner for skin disorders. Untreated skin diseases pose various significant health risks that may impede early diagnosis and appropriate treatment [1-4].

Skin diseases are becoming increasingly prevalent across all races, ages, and specific occupations in contemporary society. Skin diseases appear to be increasingly prevalent. Skin diseases impact a wide range of individuals globally, manifesting in different tissue and organ systems, including hair and nails. Inflammatory skin rashes can be categorized based on their etiology, which may involve microorganisms or not. They may present with or without serum or plasma protein exudation and can be classified as primary or secondary effects of the lesions, exhibiting either acute or chronic symptoms. Acne, eczema, psoriasis, rosacea, and skin cancer represent prevalent dermatological conditions in contemporary society. The evolving understanding of skin diseases, which is a significant concern, has led to increased efforts in their detection and treatment.

Significant changes in classification are occurring, informed by recent advancements in basic research and clinical support. While these skin diseases do not pose significant harm to humans, they can, in certain instances, disrupt the body's various internal regulatory systems. The significance of quality of life and psychodermatology research is crucial for comprehending such behaviors. Multiple factors contribute to the development of skin diseases, particularly the incidence of infections. The majority is attributed to contagious factors. Nonetheless, certain non-communicable factors may primarily arise from genetic influences, pharmaceuticals, dietary choices, and similar elements. These factors are crucial for preventing the initiation and cessation of a specific treatment. Prior to advancing, it is essential to comprehend the characteristics of the disease itself [5-9].

It is now widely recognized that dermatological conditions impact individuals' quality of life. The precise diagnosis of dermatological conditions has consistently posed a difficulty for healthcare professionals. Historically, the sole method for diagnosing skin problems was by visual inspection. Dermatologists began to acquire the expertise necessary to diagnose skin disorders using factors beyond morphological features, including systemic alterations and medical history. These procedures in clinical practice are hindered by uncertainty, protracted timelines, and the necessity for collaboration with the clinical laboratory. The advancement of technology has enabled the utilization of non-invasive patient assessment instruments across multiple medical fields. Due to advancements in artificial intelligence (AI) and computational capabilities, dermatology practitioners have developed tools to assist in the investigation of skin problems [10-13].

Combining AI and machine learning (ML) methods carries the potential for analyses, decision rules, and disease predictions based on big dermatological data. The ML methods enable the classification of skin lesions as accurately as dermatologists. Consequently, the current improvements have moved the long-used rule-based expert systems towards applied computer health diagnostics and a meaningful patient care supporting methodology [14]. It is quite well known that in medicine the error rate in diagnosis changes with diseases, diagnostic aims, and physicians. The further role of AI in medicine is inevitable and will continuously grow, portending an increasing role in dermatology. The everyday diagnostic methodology of skin diseases is performed by either primary care physicians, dermatologic residents, or field-specialized dermatologists. The decreasing number of dermatologists ignites difficulties in people's accessibility to dermatological diagnostic facilities. An additional problem within diagnosis is the inter- and intraobserver variability. Several solutions have been proposed over the years in order to decrease this variability, and the improvement of the methods has started to grow due to the availability of big datasets [15, 16]. The renewed level of interest in the importance of AI in the field of dermatological diagnostics has been observed over the last five years. All the above-mentioned arguments formed the basis for this review,

proving the state of the art regarding computer-assisted dermatological diagnostics, and calling for an in-depth review of recent applications in this field. For the above-mentioned reasons, the objectives of this review are to perform an in-depth analysis and comparison of the potential area of deep learning, especially convolutional neural networks, and ML algorithms. Moreover, the final aim of this review is to propose a future perspective for AI enhancement in dermatology [17, 18]. The literature reveals a progressive evolution in the application of ML and deep learning (DL) methodologies to enhance diagnostic accuracy and accessibility in dermatological practice. Kawahara and Hamarneh provide an essential foundation by highlighting the critical role of accurate skin disease diagnosis in determining effective treatment strategies [19]. Building on this groundwork, [20] assess the robustness of deep learning methods within clinical workflows. Chan et al. expand the discussion by providing a comprehensive overview of current ML applications in dermatology [21]. An innovative interactive deep learning system aimed at differential diagnosis of malignant skin lesions is introduced in [22]. Chowdary et al. offer a comprehensive survey of various ML and DL techniques for diagnosing dermatological diseases in [23] and [24] further emphasizes the role of automated analysis in dermatology, detailing the use of convolutional neural networks (CNNs) for skin cancer classification. The study in [25] discuss the transformative potential of AI in dermatology, particularly in addressing the global shortage of dermatologists. More specifically, [26] provides a comprehensive overview of the application of ViTs in the automated segmentation and classification of skin lesions, particularly in the context of dermoscopy images. The authors underscore the significance of precise lesion segmentation as a critical precursor to accurate skin cancer diagnosis, highlighting the transformative impact that advanced deep learning and machine learning models have had on this field. The study in [27] highlights the advantages of ViTs over traditional CNNs, particularly their ability to capture long-range dependencies within data, which is crucial for accurately interpreting complex medical images. This capability is particularly relevant in the context of skin disease detection, where the identification of subtle patterns can significantly impact diagnosis and treatment. The comprehensive survey in [28] emphasizes the promising results achieved by ViTs in medical image segmentation, particularly in histopathology. The authors discuss various innovative architectures, such as DHU-Net and MaxViT-UNet, which leverage ViTs for improved feature aggregation and segmentation accuracy. The study in [29] investigates the incorporation of ViTs for enhanced skin lesion diagnosis. It emphasizes the benefits of ViTs, especially their capacity to capture long-range relationships and intricate patterns in dermoscopic pictures. The article highlights the versatility of ViTs in managing intricate datasets and illustrates their capability to enhance diagnostic precision while minimizing interobserver variability. The results support the implementation of ViTs in practical dermatological processes to improve diagnosis accuracy. In addition, [30] presents Assist-Dermo, a streamlined ViTs model intended

for multiclass skin lesion categorization. The model substantially decreases computing complexity by the utilization of separable attention techniques, maintaining accuracy. Assist-Dermo specializes in the classification of various skin lesions, such as melanoma, basal cell carcinoma, and benign diseases. The study highlights the model's efficacy in resource-limited conditions, rendering it appropriate for implementation in distant or under-resourced clinical contexts. Experimental findings illustrate the model's resilience and its capacity to democratize access to AI-driven diagnostic instruments for skin health. The ViTs has been used in pre-diagnosis of skin diseases in [31]. The study indicates potential in utilizing Visual Transformers for skin disease detection, enhancing accuracy, computing efficiency, and scalability, which may greatly aid clinical environments and practical medical diagnostics. Skin cancer classification study using medical ViTs can be found in [32]. The paper validates the effectiveness of medical ViTs in improving skin cancer classification, presenting a robust alternative to conventional methods and demonstrating great promise for future medical applications. There can be found more valuable studies in the literature dealing with the issue.

ViTs have several advantages compared to conventional CNNs, especially in the realm of medical picture processing. In contrast to CNNs, which utilize convolutional layers to identify local patterns, ViTs utilize self-attention processes that are proficient at collecting global dependencies over an entire image. This skill is essential for the analysis of intricate medical pictures, particularly in skin disease categorization, where nuanced patterns and extensive contextual linkages greatly affect diagnostic precision. Furthermore, ViTs remove the inductive biases seen in CNNs, including localization and translational invariance, enabling superior generalization across varied datasets. Their patch-based processing enables the management of high-resolution photos without significant preprocessing. The experimental findings of this work indicate that ViTs, when integrated with traditional classifiers, improve classification performance and display resilience to fluctuations in picture quality and data distribution. These characteristics establish ViTs as a revolutionary instrument in enhancing dermatological diagnostics, beyond the constraints of CNN-based methods, and facilitating the development of more accurate and dependable automated diagnostic systems.

This paper presents an AI approach for diagnosing various skin diseases. The dataset which includes the images categorize the images into 5 clusters which are normal, melanoma, arsenic, psoriasis and eczema. In the study, skin images were first preprocessed using the Adaptive Histogram Equalization (AHE) technique, enhancing image contrast to reveal critical details. Following this preprocessing, features were extracted from the images using ViTs, known for their ability to capture intricate visual information. These extracted features were then classified using traditional ML classifiers, enabling accurate diagnosis of the skin conditions under investigation. The results highlight the effectiveness of

combining ViTs with classical classifiers in medical image classification tasks.

In further sections, the dataset of the images is briefly presented and the structure of ViTs is given. An illustrative example is considered to show the effectiveness of the method and the results are clearly discussed.

Background

As given in the previous section, the dataset has skin images categorized into 5 groups. The dataset used in this study is the *Skin Diseases Dataset* downloaded from Kaggle [33]. Sample images from the dataset can be seen in Figure 1.



Figure 1. Sample images of skin diseases from the dataset.

The dataset size is 3.02 GB and consists of images categorized into five subfolders: Normal, Melanoma, Arsenic, Psoriasis, and Eczema. It contains a total of 7,356 skin disease images, distributed as follows: 1,815 Normal images, 1,575 Melanoma images, 741 Arsenic images, 1,724 Psoriasis images, and 1,501 Eczema images. Each image has a resolution of 72 DPI, 24-bit depth, and dimensions predominantly around 3000 x 4000 pixels, saved in JPG format. This dataset is publicly licensed, freely accessible, and widely used in fields such as medicine,

cancer research, and computer vision, offering uninterrupted access and download.

The class descriptions are as follows:

- **Normal:** Images of healthy, unaffected skin.
- **Melanoma:** Images depicting melanoma, a serious type of skin cancer.
- **Arsenic:** Skin lesions resulting from exposure to arsenic, a known risk factor for various skin diseases.
- **Psoriasis:** Chronic autoimmune condition that causes rapid skin cell accumulation, leading to scaling and inflammation.
- **Eczema:** Also known as atopic dermatitis, characterized by itchy and inflamed skin.

The dataset can be applied in several areas:

- **Classification:** Training models to classify different skin conditions from images.
- **Computer Vision Tasks:** Used for segmentation, object detection, and other image analysis tasks.
- **Medical Research:** Developing AI models to assist dermatologists in diagnosing skin conditions.

After a brief description about the dataset, the ViTs method can be presented. The exploration of ViTs in image classification has garnered significant attention in recent years, reflecting a shift from traditional CNNs towards architectures that leverage self-attention mechanisms. The literature reveals a rich tapestry of insights into how ViTs operate, their advantages over CNNs, and the challenges that remain in optimizing their performance for various applications. General ViTs architecture is illustrated in Figure 2 [34].

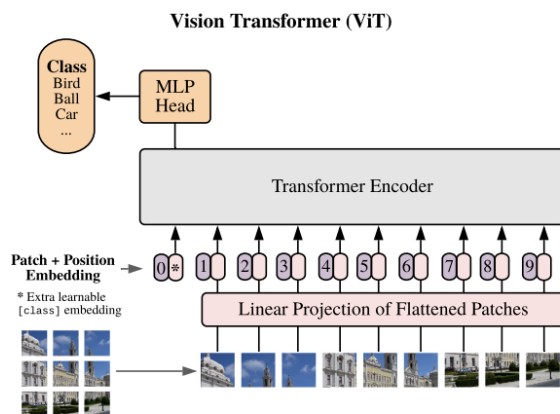


Figure 2. General Architecture of the ViTs.

In 2020, Han et al. provided a foundational understanding of ViTs, emphasizing the role of the self-attention layer in facilitating global interactions between image patches. They introduced several innovative approaches aimed at enhancing the self-attention mechanism, including DeepViT's cross-head communication and KVT's k-NN attention, which prioritize locality and reduce noise in attention calculations. Their work underscored the importance of network architecture, hinting at the potential for new designs that could further bridge the performance gap between ViTs and established CNNs [35].

After this foundation, Naseer et al. delved into the properties of learned representations in ViTs, particularly in safety-critical domains. Their comparative analysis with CNNs illuminated the robustness and generalization capabilities of ViTs, revealing that the self-attention mechanism allows for effective long-range interaction modeling. This study highlighted the adaptability of ViTs to various nuisances in data, showcasing their potential for real-world applications where reliability is paramount [36]. Cao et al. further explored the training dynamics of ViTs, demonstrating that these architectures could achieve state-of-the-art performance even with limited datasets. Their findings indicated that the representations learned from small datasets could enhance performance on larger datasets, suggesting a promising avenue for leveraging ViTs in scenarios where data is scarce [37]. In the same year, Parvaiz et al. examined the application of ViTs in medical computer vision, particularly for diagnosing diabetic retinopathy. They emphasized the advantages of ViTs over CNNs in terms of accuracy, driven by the attention mechanism's ability to assess global context. This work pointed to the transformative potential of ViTs in healthcare, while also acknowledging the challenges that need to be addressed for broader adoption [38]. Jelassi et al. contributed to the understanding of ViTs by demonstrating that these models can learn spatially localized patterns effectively. Their introduction of a positional attention mechanism provided insights into how ViTs can maintain spatial structure while generalizing across different datasets, reinforcing the notion that ViTs are not merely a replacement for CNNs but rather a complementary approach with unique advantages [39]. Nguyen et al. further expanded on the operational differences between ViTs and CNNs, investigating the robustness of ViTs against various perturbations. Their visualization techniques offered a deeper understanding of how ViTs process information, revealing clustering behaviors in feature embeddings that could inform future architectural improvements [40]. General block diagram of the method in this study is given in Figure 3.

ViTs has 3 models, which can be listed as follows:

- **base-16-imagenet-384** — A base-sized model with 86.8 million parameters and a patch size of 16. The network is fine-tuned using the ImageNet 2012 dataset at a resolution of 384x384.
- **small-16-imagenet-384** — A small-sized model with 22.1 million parameters and a patch size of 16. The network is fine-tuned using the ImageNet 2012 dataset at a resolution of 384x384.
- **tiny-16-imagenet-384** — A tiny-sized model with 5.7 million parameters and a patch size of 16. The network is fine-tuned using the ImageNet 2012 dataset at a resolution of 384x384.

In this study, the **base-16-imagenet-384** model is implemented.

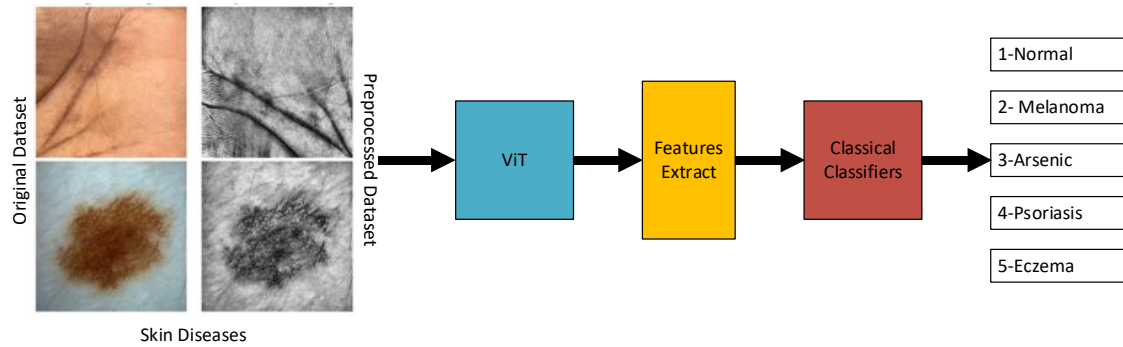


Figure 3. General block diagram of the method in this paper.

Classification Study

This study allocated 80% of the dataset for training and retained the remaining 20% exclusively for testing, guaranteeing that no test data were utilized during training. Initially, diagnostic outcomes were produced via the ViTs network applied directly to the original dataset. Subsequently, other preprocessing measures were implemented to improve the model's performance. The preprocessing approach commenced with the transformation of the dataset's color structure, translating the RGB images into the Lab color space, a model that differentiates luminance from chromaticity. Only the initial channel, which denotes brightness, was taken from this change. The channel was further treated with Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), an adaptive histogram technique aimed at improving local contrast more efficiently. Enhancing the visual quality of digital images by increasing their contrast has been an attractive research topic in the field of image processing. The histogram equalization method is employed to improve the contrast of the image by altering the histogram of the accumulated pixel intensity values. However, the traditional approach of histogram equalization amplifies the noise and diminishes the quality of the image through loss of useful information such as detailed features. To resolve these problems and to preserve the pertinent information of the image, CLAHE was proposed. The basic principle of CLAHE lies in employing adaptive histogram equalization locally to minimize the contrast limit effect in an efficient manner [41]. The improvement in image processing techniques, along with the wide and growing use of medical imaging applications, has necessitated the introduction of new CLAHE implementation techniques, which are the major focus of this paper. To improve the performance of the detection system, better image contrast is essential in image processing applications. In most of the research works, the enhancement of images has been carried out using histogram equalization, which provides uniform gray values for an image. The most popular technique used to improve both the visual quality of the digital image and the diagnostic characteristics of the image is the algorithm contrast-limited adaptive histogram equalization. The limitations of the histogram equalization method are solved by using CLAHE for applications such as night

photography, medical imaging, satellite images, fingerprint recognition, and iris recognition [42].

Following preprocessing, two datasets were established: one with the original images and another with the preprocessed images. Both datasets were used for training to evaluate the impact of preprocessing on classification performance, allowing a comparison between the ViT network's performance on raw versus enhanced data. Figure 4 shows samples of the original and the preprocessed images.

The scanned images in the dataset were resized to a uniform dimension of 384x384 pixels with three color channels, ensuring consistency across all samples. These images were then scaled and normalized, maintaining their color properties, and subsequently used in both training and testing phases. The training parameters are listed in Table 1. The network training utilized Stochastic Gradient Descent with Momentum (SGDM) as the optimizer, paired with a stochastic solver to enhance convergence speed and stability. To accelerate the training process, parallel computing was employed on a GPU with 16 concurrent workers. Key training parameters included an initial learning rate set to $1e-4$, shuffling at each epoch to prevent overfitting, and an execution environment configured for GPU processing.

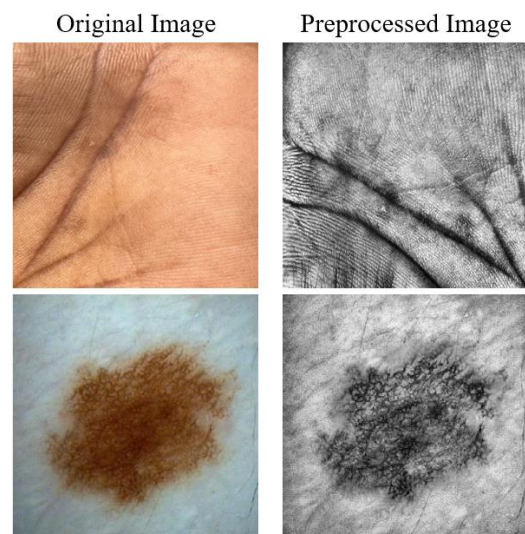


Figure 4. Original and Preprocessed Images

Table 1. The training parameters.

MiniBatchSize		16
MaxEpochs		5
Iterations PerEpoch	Original Dataset:	367
	Preprocessed Dataset:	735
Validation Frequency	Original Dataset:	92
	Preprocessed Dataset:	184

After the training, accuracy for the original dataset was achieved at 0.7383, with the training process completed in 7 hours, 35 minutes, and 58 seconds. Similarly, the training accuracy for the preprocessed dataset improved to 0.7631, though the training duration was longer, taking 10 hours, 26 minutes, and 51 seconds to complete. The confusion matrix obtained with the original dataset is given in Figure 5.

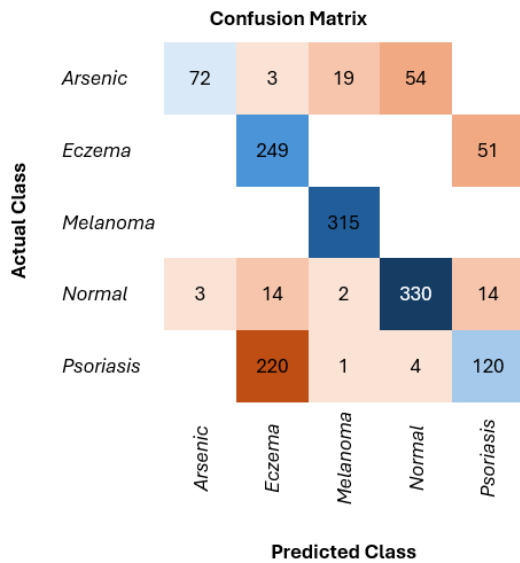


Figure 5. Confusion Matrix obtained with the original dataset.

The confusion matrix analysis reveals the classification results for 1,471 test samples, distributed across five categories: 148 Arsenic, 300 Eczema, 315 Melanoma, 363 Normal, and 345 Psoriasis images. The model achieved varied accuracy across these categories, demonstrating areas of strength and some weaknesses.

In the Arsenic category, 72 images were classified correctly, while 76 were misclassified, indicating room for improvement in distinguishing this condition. For Eczema, the model performed well, with 249 images correctly classified and only 51 misclassified. Notably, all 315 Melanoma images were correctly identified, showcasing the model's strength in Melanoma detection. For Normal skin images, 330 were accurately classified, with 33 images incorrectly labeled. The Psoriasis category, however, presented the greatest challenge, with only 120 images accurately predicted and a substantial 225 misclassified. This pattern highlights the need for further refinement, particularly for Arsenic and Psoriasis, to enhance the model's diagnostic accuracy in these categories. The confusion matrix thus provides valuable insights into performance strengths, as well as areas for targeted

improvements. The confusion matrix obtained by the preprocessed dataset is given in Figure 6.

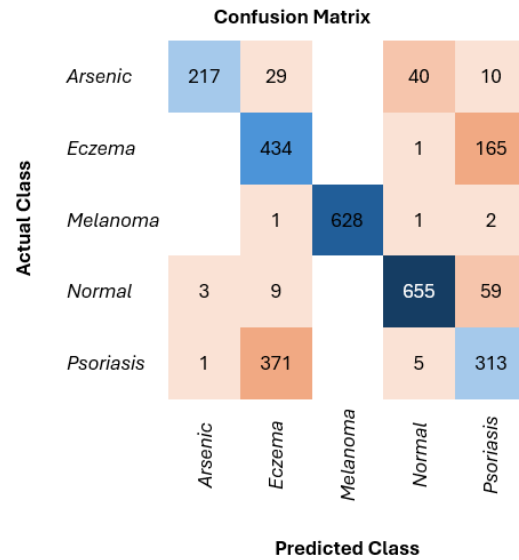


Figure 6. Confusion Matrix obtained with the preprocessed dataset.

The confusion matrix analysis reveals the classification results for a total of 2,942 test samples, which include 296 Arsenic, 600 Eczema, 630 Melanoma, 726 Normal, and 690 Psoriasis images. The model's performance varied across these categories, highlighting both strengths and areas needing improvement.

For the Arsenic category, 217 images were accurately classified, with 79 misclassifications, indicating a moderate level of performance that could be enhanced. The Eczema category showed that 434 images were correctly predicted, but there were 166 misclassifications, suggesting further refinement is necessary for this condition as well. The model demonstrated exceptional accuracy in the Melanoma category, with 626 images correctly identified and only 4 misclassified, indicating a robust capability in detecting this type of skin disease. In the Normal category, 655 images were accurately classified, while 71 were misclassified, showcasing strong performance but also a need to address those misclassifications. In contrast, the Psoriasis category revealed significant challenges, with only 313 images correctly identified and a considerable 377 misclassified. This considerable number of errors indicates that the model's performance in classifying Psoriasis requires substantial improvement. Overall, the breakdown of results highlights the model's strengths in identifying Melanoma and Normal images, while emphasizing the need for enhancements in the classification of Arsenic, Eczema, and particularly Psoriasis. Table 2 summarizes the key metrics observed during the training process, including the progress of training iterations, the duration of each iteration, mini-batch performance, test performance, and errors. This table provides a comprehensive overview of how the model's performance evolved over time, showcasing the effectiveness of the training process. The training and error graphics obtained with the preprocessed dataset is given in Figure 7.

Table 2. Iteration process of the preprocessed dataset.

Epoch	Iteration	Time Elapsed (hh:mm:ss)	Mini-batch Accuracy	Validation Accuracy	Mini-batch Loss	Validation Loss
1	1	00:01:29	12.50%	21.52%	48.207	51.771
1	184	00:32:50	93.75%	67.91%	0.5019	11.021
1	368	01:04:02	68.75%	70.12%	0.5567	0.9623
1	552	01:35:09	75.00%	71.35%	0.5287	0.8154
2	736	02:06:14	81.25%	72.64%	0.4622	0.9427
2	920	02:37:35	81.25%	71.86%	0.4056	0.9531
2	1104	03:09:03	100.00%	70.84%	0.1247	12.708
2	1288	03:40:13	75.00%	73.28%	0.5681	0.9984
3	1472	04:11:27	93.75%	75.32%	0.1451	0.7364
3	1656	04:42:55	81.25%	74.34%	0.4851	0.7988
3	1840	05:14:22	81.25%	72.94%	0.3430	0.8805
3	2024	05:45:53	87.50%	73.69%	0.3709	0.7215
4	2208	06:17:06	87.50%	75.66%	0.2403	0.7593
4	2392	06:48:13	75.00%	75.19%	0.4032	0.7778
4	2576	07:19:23	87.50%	75.56%	0.1639	0.9141
4	2760	07:50:37	93.75%	75.49%	0.2257	0.8536
5	2944	08:21:57	93.75%	76.07%	0.1682	0.7871
5	3128	08:53:01	93.75%	76.55%	0.2448	0.7558
5	3312	09:24:12	87.50%	77.02%	0.3339	0.7229
5	3496	09:55:22	81.25%	74.37%	0.3821	10.234
5	3675	10:25:42	81.25%	76.31%	0.2276	0.7182

As illustrated in Figure 7, the test accuracy achieved during the training process using the preprocessed data with the ViTs network reached 76.31%. In comparison, the test accuracy obtained from the training process with the unprocessed data was 73.83%. This indicates that the preprocessing step contributed to an enhancement of 2.48% in overall performance. The features from the dataset were extracted from the ViT network prior to the classification layer, and these features were subsequently classified using a range of traditional classifiers, including K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machines (SVM), Neural Networks, Ensemble methods, Discriminant Analysis, Efficient Logistic Regression, among others. The results of these classification efforts are summarized in Table 3. Upon analysis of the classification results, it is noteworthy that the accuracy increased significantly to 90.6%, reflecting an impressive 18.04% improvement compared to the baseline training accuracy.

This substantial increase underscores the effectiveness of using the ViT network for feature extraction and the subsequent classification process, demonstrating the potential of this approach in enhancing diagnostic performance for skin disease classification.

Figure 8 shows the confusion matrix for the Weighted KNN model which has the highest classification accuracy according to Table 3.

Upon analyzing the confusion matrix for the classical classifier that achieved the highest accuracy, we observe that the dataset comprises a total of 14,716 training and test samples. This dataset includes 1,482 Arsenic images, 3,002 Eczema images, 3,152 Melanoma images, 3,630 Normal images, and 3,448 Psoriasis images.

The classification results for each category are as follows:

- **Arsenic images:** Out of 1,482 images, 1,396 were correctly classified, with 86 misclassifications, indicating strong performance in this category.
- **Eczema images:** Of the 3,002 images, 2,261 were accurately classified, while 741 were misclassified, revealing significant challenges in correctly identifying this condition.
- **Melanoma images:** All 3,139 images were correctly identified, although 13 were misclassified, demonstrating exceptional accuracy in detecting this type of skin disease.
- **Normal images:** From the 3,630 images, 3,513 were correctly predicted, with 117 misclassifications, showing robust performance but highlighting some areas for improvement.
- **Psoriasis images:** Among the 3,448 images, 2,598 were accurately classified, but 850 were misclassified, indicating that this category presents substantial difficulties for the classifier.

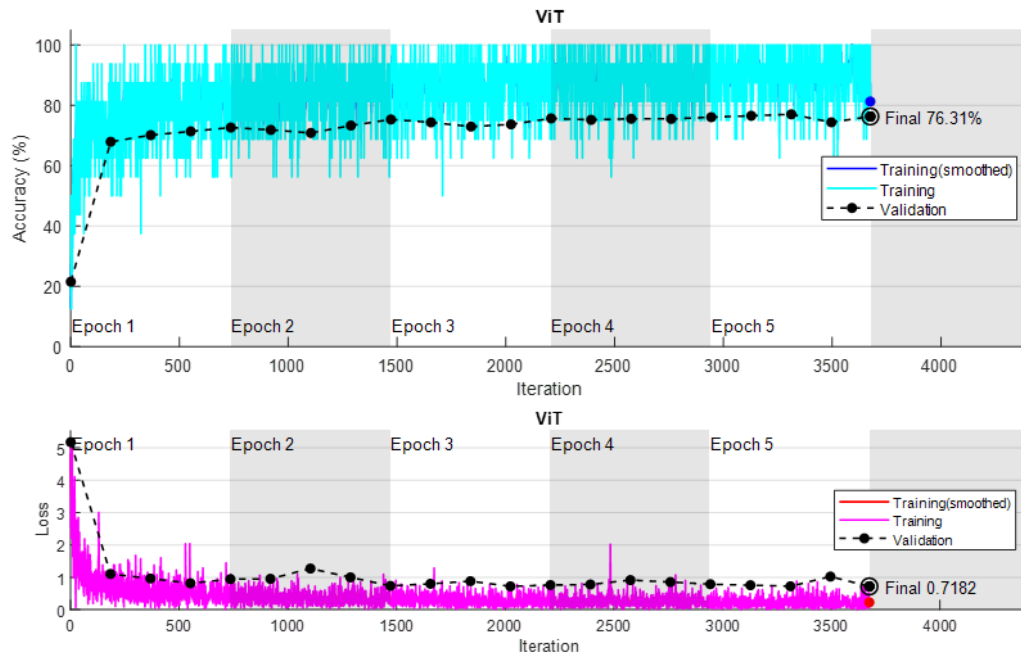


Figure 7. Training and error parameters of the preprocessed dataset.

		Confusion Matrix				
		Arsenic	Eczema	Melanoma	Normal	Psoriasis
Actual Class	Arsenic	1396	3		67	16
	Eczema	7	2261	2	4	728
	Melanoma	4	1	3139	5	3
	Normal	72	6	2	3513	37
	Psoriasis	15	804	1	30	2598
		Predicted Class				
		Arsenic	Eczema	Melanoma	Normal	Psoriasis

Figure 8. Confusion Matrix obtained with the Weighted KNN model

This analysis illustrates the classifier's strong overall performance, particularly in identifying Melanoma images, where it achieved perfect accuracy. However, it also highlights challenges in accurately classifying Eczema and Psoriasis images, suggesting the need for further refinement in these areas to improve diagnostic accuracy across all skin disease categories. Finally, Figure 9 shows the ROC curve for the weighted KNN model.

After preprocessing the dataset, the Psoriasis class, with 3,448 samples, has the highest number of examples, following the Normal class, which contains 3,002 samples. When examining the confusion matrix for both the original dataset and the preprocessed dataset, it is observed that the Psoriasis class is most frequently misclassified as the Eczema class. A closer comparison of the images from these two classes with the other three

classes in the dataset reveals that the visual features of the Psoriasis and Eczema classes are very similar to each other. In contrast, their differences from the other classes are much more distinct. This similarity explains why the Psoriasis class is most often misclassified as the Eczema class. It also highlights that these misclassifications are not primarily due to the number of images in the classes but rather due to the high degree of visual similarity between certain classes.

Table 3. Classification results of the best 15 classifiers.

Model	Sub Model	Accuracy
KNN	Weighted KNN	87.72%
SVM	Weighted KNN	87.68%
SVM	Quadratic SVM	87.67%
Neural Network	Bilayered Neural Network	87.64%
Neural Network	Medium Neural Network	87.63%
Ensemble	Bagged Trees	87.56%
Neural Network	Narrow Neural Network	87.56%
Neural Network	Trilayered Neural Network	87.47%
KNN	Coarse KNN	87.40%
KNN	Medium KNN	87.20%
KNN	Cosine KNN	87.20%
SVM	Coarse Gaussian SVM	87.16%
KNN	Cubic KNN	87.11%
Discriminant	Quadratic Discriminant	87.05%
Efficient Logistic Regression	Efficient Logistic Regression	87.01%

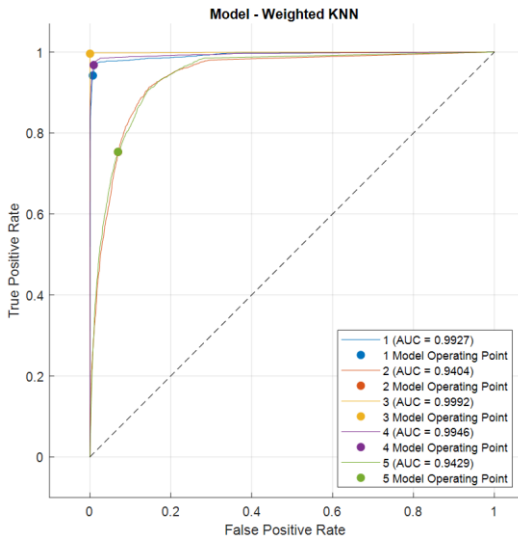


Figure 9. ROC curve for the weighted KNN model.

Hyperparameter tuning is a crucial element for attaining optimal performance using ViTs models, a topic that was not well addressed in the initial discourse. This work carefully changed many hyperparameters to optimize the ViT architecture for skin disease categorization. The learning rate was set at AA, a figure selected to optimize the balance between convergence speed and stability during training. The batch size was configured to 16, enhancing memory efficiency while preserving the model's generalization capability. A maximum of five epochs were utilized for training, guided by early termination conditions to prevent overfitting. The Adam optimizer, together with weight decay regularization, was utilized to improve optimization efficiency and reduce the likelihood of overfitting to limited datasets. The patch size, an essential hyperparameter of the ViT, was established at

16 to maintain an optimal equilibrium between global context and local feature representation in the pictures. The quantity of attention heads and transformer layers was optimized to enhance model performance while maintaining tolerable computing complexity. To mitigate the fluctuation in input photos, data augmentation techniques, including random cropping and flipping, were employed during training to enhance the model's resilience. Hyperparameter tuning was conducted iteratively, with validation accuracy as the principal metric, with grid search and human modifications directing the selection process. Through the optimization of these hyperparameters, the ViT model attained improved feature extraction skills, illustrating its appropriateness for intricate medical picture classification tasks. Subsequent research will investigate sophisticated optimization techniques, including Bayesian optimization, to enhance model efficiency.

The findings of this study demonstrate the efficacy of combining ViTs with classical classifiers for accurate skin disease diagnosis. To provide context and highlight the significance of these results, a comparison with existing studies in the literature was conducted. Table 4 summarizes key metrics, such as accuracy, methods used, datasets employed, and clinical applicability, for several state-of-the-art approaches in skin disease classification. This table highlights the comparative advantages of the proposed framework, particularly its ability to achieve high accuracy with reduced computational requirements. The combination of ViTs for feature extraction and classical classifiers for final diagnosis proves to be a balanced approach, suitable for deployment in resource-constrained clinical settings.

Table 4. Comparison with some of the existing studies

Study	Methodology	Dataset Size and Classes	Accuracy	Clinical Applicability
This Study	ViT + Classical Classifiers	7,356 images, 5 classes	90.6%	High (ViT for global context, low compute cost of classifiers)
DEEPSCAN [29]	ViT-Based Diagnostics	Dermoscopic Dataset, Binary (Benign/Malignant)	92.4%	High (Focus on malignant lesion detection)
Assist-Dermo [30]	Lightweight Separable ViT	Multiclass Dataset, 3 classes	88.7%	Moderate (Efficient but less generalizable)
Srinivasu et al. [12]	MobileNetV2 + LSTM	ISIC 2018, Binary	87.2%	Low (Convolutional focus, limited generalization)
Inthiyaz et al. [7]	CNN-Based Deep Learning	Custom Dataset, 7 classes	85.4%	Moderate (High compute requirements)
Chan et al. [21]	Ensemble of CNNs	ISIC 2017, Multiclass	86.9%	Low (High complexity and compute-intensive)

Parvaiz et al. [38]	ViT + Pretrained ResNet	Custom Dataset, 5 classes	89.1%	High (Focus on medical image generalization)
Jelassi et al. [39]	ViT with Positional Attention	Multiclass Dataset, 4 classes	91.0%	Moderate (ViT adaptation for small datasets)
Das et al. [14]	CNN + SVM Hybrid	Custom Dataset, Binary	84.3%	Low (Limited scalability to multiclass tasks)
Khan et al. [26]	Vision Transformers for Skin Cancer	Dermoscopic Dataset, Multiclass	93.1%	High (Focused on segmentation + classification synergy)

Conclusions

ViTs represent a cutting-edge deep learning technology with significant applications in the medical field, particularly in skin disease diagnosis. Due to their architecture, ViTs require a large number of parameters and, consequently, a substantial dataset for effective learning. The rapid digitization of healthcare has now made this feasible. In contrast, classical classifiers operate with relatively fewer input data, making them suited for cases with limited datasets. In clinical settings, high-resolution imaging techniques such as dermoscopy, confocal microscopy, reflectance confocal microscopy, and Raman spectroscopy are frequently employed for diagnosing skin diseases. ViTs are especially promising in clinical practice as they do not rely on convolutional operations, offering an advantage over traditional convolutional neural networks (CNNs). In this study, the experiments were based on classifying the images in the dataset which were categorized into five classes. We conducted these experiments on preprocessed images from two datasets, one of which consisted of dermoscopic images. The primary dataset used in this study contained skin images classified into five categories: normal, melanoma, arsenic, psoriasis, and eczema. To enhance image quality, Adaptive Histogram Equalization (AHE) was applied in preprocessing, which improved contrast and highlighted essential details. Following this, ViTs were utilized to extract intricate features from the images, which were then input into traditional machine learning classifiers to aid in the accurate diagnosis of skin conditions. The results underscore the effectiveness of combining ViTs with classical classifiers for medical image classification tasks, suggesting that this approach can significantly enhance diagnostic accuracy in skin disease detection.

This study's results, showcasing the effectiveness of integrating ViTs with traditional classifiers for skin condition identification, possess considerable promise for practical use. The exceptional accuracy attained, especially for situations such as melanoma, highlights the model's dependability in identifying significant skin disorders that necessitate immediate action. ViTs' capacity to identify complex visual characteristics, including small lesions, improves diagnostic accuracy, rendering them appropriate for use in clinical settings where misinterpretation may lead

to serious repercussions. The suggested architecture may be integrated into teledermatology systems, facilitating remote diagnosis in under-resourced or rural regions. The lightweight characteristics of classical classifiers allow for a reduction in the processing demands of utilizing ViT-extracted features, rendering the system suitable for edge devices such as smartphones and portable diagnostic instruments. This accessibility might mitigate the global deficit of dermatologists and enhance early detection rates, particularly for high-risk disorders. Moreover, the system's modular architecture facilitates ongoing upgrades, including fresh datasets to enhance generalization progressively. Integrating with electronic health record systems might yield a full diagnostic procedure, merging image analysis with patient history and clinical documentation. To guarantee effective adoption, thorough validation with varied, real-world datasets is required. Creating intuitive interfaces and offering training for healthcare providers would augment its effectiveness. The suggested approach signifies progress in incorporating AI-driven solutions into clinical practice, providing a scalable, efficient, and precise instrument for improving dermatological treatment.

References

- [1] M. A. Richard, C. Paul, T. Nijsten, P. Gisondi, C. Salavastru, C. Taieb, ... & EADV Burden of Skin Diseases Project Team. "Prevalence of most common skin diseases in Europe: a population-based study," *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, vol. 36, no. 7, pp. 1088-1096, 2022.
- [2] E. T. Anwar, N. Gupta, O. Porwal, A. Sharma, R. Malviya, A. Singh & N. K. Fuloria, "Skin diseases and their treatment strategies in sub-saharan african regions," *Infectious Disorders-Drug Targets Disorders*, vol. 22, no. 2, pp. 41-54, 2022.
- [3] J. A. Rossow, F. Queiroz-Telles, D. H. Caceres, K. D. Beer, "A One Health Approach to Combatting *Sporothrix brasiliensis*: Narrative Review of an Emerging Zoonotic Fungal Pathogen in South America," *Journal of Fungi*, vol. 6, no. 4, p. 247, 2020.
- [4] D. M. Elston, "Occupational skin disease among health care workers during the coronavirus (COVID-19)

- epidemic,” *Journal of the American Academy of Dermatology*, vol. 82, no. 5, p. 1085, 2020.
- [5] V. R. Balaji, S. T. Suganthi, R. Rajadevi, V. K. Kumar, “Skin disease detection and segmentation using dynamic graph cut algorithm and classification through Naive Bayes classifier,” *Measurement*, vol. 163, p. 107922, 2020.
- [6] Y. Liu, A. Jain, C. Eng, D. H. Way, K. Lee, P. Bui, et al., “A deep learning system for differential diagnosis of skin diseases,” *Nature medicine*, vol. 26, no. 6, pp. 900-908, 2020.
- [7] S. Inthiyaz, B. R. Altahan, S. H. Ahammad, V. Rajesh, R. R. Kalangi, L. K. Smirani and A. N. Z. Rashed, “Skin disease detection using deep learning,” *Advances in Engineering Software*, vol. 175, p. 103361, 2023.
- [8] N. Hameed, A. M. Shabut, and M. K. Ghosh, “Multi-class multi-level classification algorithm for skin lesions classification using machine learning techniques,” *Expert Systems with Applications*, vol. 141, p. 112961, 2020.
- [9] N. Melnyk, I. Vlasova, W. Skowrońska, and A. Bazylko, “Current knowledge on interactions of plant materials traditionally used in skin diseases in Poland and Ukraine with human skin microbiota,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 17, p. 9644, 2022.
- [10] H. Li, Y. Pan, J. Zhao, and L. Zhang, “Skin disease diagnosis with deep learning: A review,” *Neurocomputing*, vol. 464, pp. 364-393, 2021.
- [11] SS Han, I Park, SE Chang, W Lim, MS Kim, “Intelligence dermatology: deep neural networks empower medical professionals in diagnosing skin cancer and predicting treatment options for 134 skin,” *Dermatology*, vol. 140, no. 9, pp. 1753-1761, 2020.
- [12] P.N. Srinivasu, J.G. SivaSai, M.F. Ijaz, A.K. Bhoi, and W. Kim, “Classification of skin disease using deep learning neural networks with MobileNet V2 and LSTM,” *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2852, 2021.
- [13] N. Ghaffar Nia, E. Kaplanoglu, and A. Nasab, “Evaluation of artificial intelligence techniques in disease diagnosis and prediction,” *Discover Artificial Intelligence*, vol. 3, no. 1, p. 5, 2023.
- [14] K. Das, C. J. Cockerell, A. Patil, and P. Pietkiewicz, “Machine learning and its application in skin cancer,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 24, p. 13409, 2021.
- [15] J. Jayashree, S. S. V. Nukala, and J. Vijayashree, “The rise of AI in the field of healthcare,” *Cognitive Machine Intelligence*, pp. 221-244, 2024.
- [16] A. Mubeen and U. N. Dulhare, “Metaheuristic Algorithms for the Classification and Prediction of Skin Lesions: A Comprehensive Review,” *Machine Learning and Metaheuristics: Methods and Analysis*, pp. 107-137, 2023.
- [17] A. Gomolin, E. Netchiporouk, and R. Gniadecki, “Artificial intelligence applications in dermatology: where do we stand?,” *Frontiers in medicine*, vol. 7, p. 100, 2020.
- [18] T. B. Jutzi, E. I. Kriehoff-Henning, and T. Holland-Letz, “Artificial intelligence in skin cancer diagnostics: the patients' perspective,” *Frontiers in medicine*, vol. 7, p. 233, 2020.
- [19] J. Kawahara and G. Hamarneh, “Visual Diagnosis of Dermatological Disorders: Human and Machine Performance,” *arXiv preprint arXiv:1906.01256*, 2019.
- [20] S. Mishra, S. Chaudhury, H. Imaizumi, and T. Yamasaki, “Assessing Robustness of Deep learning Methods in Dermatological Workflow,” *arXiv preprint arXiv:2001.05878*, 2020.
- [21] S. Chan, V. Reddy, B. Myers, Q. Thibodeaux et al., “Machine Learning in Dermatology: Current Applications, Opportunities, and Limitations,” *Dermatology and therapy*, vol. 10, pp. 365-386, 2020.
- [22] D. Sonntag, F. Nunnari, and H. J. Profitlich, “The Skincare project, an interactive deep learning system for differential diagnosis of malignant skin lesions. Technical Report,” *arXiv preprint arXiv:2005.09448*, 2020.
- [23] G. J. Chowdary, “Machine Learning and Deep Learning Methods for Building Intelligent Systems in Medicine and Drug Discovery: A Comprehensive Survey,” *arXiv preprint arXiv:2107.14037*, 2021.
- [24] M. Qays Hatem, “Skin lesion classification system using a K-nearest neighbor algorithm,” *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, vol. 5, no. 1, p. 7, 2022.
- [25] Z. Li, K. Christoph Koban, T. Ludwig Schenck, R. Enzo Giunta et al., “Artificial Intelligence in Dermatology Image Analysis: Current Developments and Future Trends,” *Journal of clinical medicine*, vol. 11, no. 22, p. 6826, 2022.
- [26] S. Khan, H. Ali, and Z. Shah, “Identifying the role of vision transformer for skin cancer—A scoping review,” *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 6, 1202990, 2023.
- [27] T. Lai, “Interpretable Medical Imagery Diagnosis with Self-Attentive Transformers: A Review of Explainable AI for Health Care,” *BioMedInformatics*, vol. 4, no. 1, pp. 113-126, 2023.
- [28] A. Khan, Z. Rauf, A. Rehman Khan, S. Rathore et al., “A Recent Survey of Vision Transformers for Medical Image Segmentation,” *arXiv preprint arXiv:2312.00634*, 2023.
- [29] V. Ravi, T. J. Alahmadi, T. Stephan, P. Singh and M. Diwakar, “DEEPSCAN: Integrating Vision Transformers for Advanced Skin Lesion Diagnostics,” *The Open Dermatology Journal*, vol. 18, no. 1, 2024.
- [30] Q. Abbas, Y. Daadaa, U. Rashid and M. E. Ibrahim, “Assist-dermo: A lightweight separable vision transformer model for multiclass skin lesion classification,” *Diagnostics*, vol. 13, no. 15, p. 2531, 2023.
- [31] E. G. Espinosa, J. S. R. Castilla and F. G. Lamont, F. G. “Skin Disease Pre-diagnosis with Novel Visual Transformers,” *In Workshop on Engineering Applications (pp. 103-113)*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.
- [32] S. Aladhadh, M. Alsanea, M. Aloraini, T. Khan, S. Habib and M. Islam, “An effective skin cancer

- classification mechanism via medical vision transformer,” *Sensors*, vol. 22, no11, p. 4008, 2022.
- [33] <https://www.kaggle.com/datasets/sayedhossainjobayer/skin-diseases-identification>, Last Accessed On: 30.10.2024.
- [34] A. Dosovitskiy, “An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale,” *arXiv preprint arXiv: 2010.11929*, 2020.
- [35] K. Han, Y. Wang, H. Chen, X., Chen, J. Guo, Z. Liu & D. Tao, “A survey on visual transformer,” *arXiv preprint arXiv:2012.12556*, 2020.
- [36] M. M. Naseer, K. Ranasinghe, S. H. Khan, “Intriguing properties of vision transformers,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 34, pp. 23296-23308, 2021.
- [37] Y. H. Cao, H. Yu, and J. Wu, “Training Vision Transformers with Only 2040 Images,” *European Conference on Computer Vision (pp. 220-237)*, 2022.
- [38] A. Parvaiz, M. Anwaar Khalid, R. Zafar, H. Ameer et al., “Vision Transformers in Medical Computer Vision - A Contemplative Retrospection,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. pp. 122, 2022.
- [39] S. Jelassi, M. E. Sander, and Y. Li, “Vision Transformers provably learn spatial structure,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 35, pp. 37822-37836, 2022.
- [40] V. A. Nguyen, K. Pham Dinh, L. Tung Vuong, T. T. Do et al., “Vision Transformer Visualization: What Neurons Tell and How Neurons Behave?,” *arXiv preprint arXiv:2210.07646*, 2022.
- [41] S. A. Khan, S. Hussain, and S. Yang, “Contrast enhancement of low-contrast medical images using modified contrast limited adaptive histogram equalization,” *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, vol. 10, no. 8, pp. 1795-1803, 2020.
- [42] V. Banupriya and A. Kalaivani, “Improved retinal fundus image quality with hybrid image filter and enhanced contrast limited adaptive histogram equalization,” *International Journal of Health Sciences*, vol. I, pp. 9234-9246, 2022.



A better way to detect sybil attacks in vehicular ad hoc networks

Ziya Cihan TAYŞI^{1*}

¹ Yıldız Technical University, Department of Computer Engineering, cihan@yildiz.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3916-7492

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 November 2024
Received in revised form 9 January 2025
Accepted 9 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Sybil Attack, Inter Vehicle
Communication (IVC), Received
Signal Strength Indicator (RSSI),
Deep Learning

Doi: 10.24012/dumf.1578650

* Corresponding author

ABSTRACT

Sybil attacks, enabled by the anonymous nature of peer-to-peer broadcast communication in vehicular private networks (VANETs), pose a serious security threat. These attacks can significantly disrupt traffic flow, reduce efficiency, and potentially endanger traffic safety. Detecting Sybil attacks in VANETs is particularly challenging due to the dynamic network topology, real-time constraints of applications, and decentralized nature of these networks. This paper proposes a novel Sybil attack detection method for VANETs, leveraging deep learning analysis of received signal strength indicator (RSSI) time series. The proposed system is designed to deliver effective results, even in brief interactions. Experimental results demonstrate the efficacy of our LSTM-based and CNN-based approaches, achieving 93.45% and 94.28% sensitivity in detecting attack messages, respectively.

Introduction

A sybil attack [1] involves an attacker using multiple identities simultaneously to gain an advantage in a distributed computing system, which can be encountered in many fields of computer science. These attacks are particularly effective in peer-to-peer communication environments where real-time authentication processes are absent. Many Vehicle-to-Everything (V2X) applications rely on the cooperation between vehicles on broadcast messaging namely, Cooperative Awareness Messages (CAMs) and Decentralized Environmental Notification Messages (DENMs). An attacker performing a sybil attack on VANET can manipulate traffic flow as desired or potentially create risky situations that threaten traffic safety. For example, fabricating accident reports or slow traffic situations can prevent other vehicles from using a particular route. Moreover, generating messages containing false position, speed, and acceleration information may endanger nearby vehicles. A sybil attack example of traffic manipulation is given in Figure 1.

There are two main approaches for detecting sybil attacks in VANET, namely, proactive and reactive. Proactive methods mainly rely on the use of PKI-authorized certificates and preventing the use of multiple certificates

simultaneously. The use of proactive methods is quite challenging due to the rapidly changing topology and real-time requirements of safety applications VANET. For example, a PKI-based solution requires periodic certificate updates, rendering them unsuitable for environments where network access to a central authority is unavailable. Furthermore, the latency caused by certificate validation and update procedures may cause the received information to become obsolete for time-critical applications.

On the other hand, reactive methods use the Misbehavior Detection System (MDS), similar to the Intrusion Detection Systems (IDS) used in traditional networks. MDS detects attackers by analyzing messages, vehicle status, and the properties obtained from the characteristics of the received packets. Depending on the capabilities of the used hardware, these properties include Time of Arrival (ToA), Angle of Arrival (AoA), Time Difference of Arrival (TDoA), and Received Signal Strength Indicator (RSSI). Properties such as ToA, AoA, and TDoA can only be obtained using special hardware, which results in higher costs in a large-scale deployment. Thus, the default hardware configuration for IVC systems only provides RSSI value for received packets.

RSSI readings can provide information about the sender's position and identity [2],[3]. However, environmental features, such as buildings, street width, and other vehicles, can affect the RSSI values obtained. Moreover, attackers can manipulate the RSSI readings of ghost vehicles by changing the output power. Furthermore, packet losses due to collusion are possible in areas with heavy vehicle traffic. Therefore, these situations should be considered in methods where RSSI readings are used to detect sybil attacks.

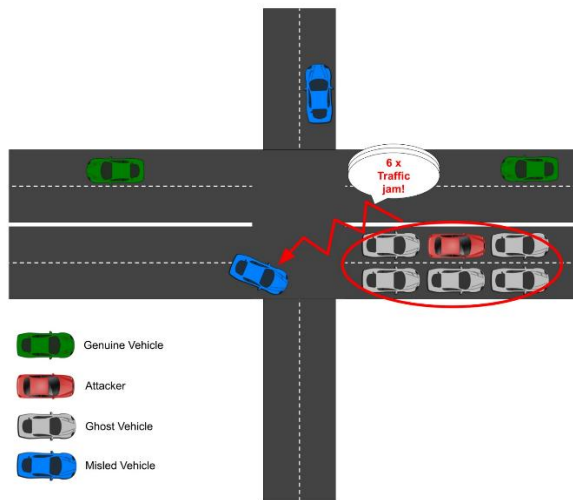


Figure 1. A sybil attack scenario in a VANET, where an attacker forges multiple identities to create a false traffic congestion.

Our literature review and experiments have revealed that existing studies on sybil attack detection methods that use reactive approaches are quite limited for realistic vehicular traffic environments. The studies [4], [5] are mostly based on datasets generated via simulations with minimal traffic density or specific scenarios such as highways. A dataset or sybil attack detection method targeted for highway traffic scenarios may not reflect situations that occur in daily life. For example, vehicles stuck in traffic jams lead to packet collisions or losses. Also, differences in the road patterns in urban areas compared to highways cause vehicles to move in different directions, speeds, and angles, which creates extreme differences in mobility patterns compared to highway scenarios.

In this work, we propose a fast sybil attack detection method that achieves high success in comprehensive sybil attack scenarios. Our sybil attack detection method works locally using a precomputed deep learning model on vehicles without requiring a consistent connection to the central authority. The model classifies messages by examining RSSI measurements. The main contributions of this paper are as follows:

- We developed a deep learning model that detects sybil attacks using RSSI as a sequence.
- We experimented with two deep learning models, namely Long Short-Term Memory (LSTM) and Convolutional Neural Network (CNN).

- We compared our method with the methods in the literature over various mobility and distance situations in vehicle traffic.

The rest of the paper is organized as follows. In the following section, previous work on sybil attack detection methods is summarized. Materials and methods section describes the dataset, and explains the implementation details of existing methods along with our proposed deep learning models. In result section, details of the experiment set and parameters are given, and the results are examined. Finally, conclusions and future work are outlined in the final section.

Related work

Sybil attacks present a significant challenge in VANETs. In sybil attack, a malicious node creates numerous false identities, aiming to disrupt communication or gain influence in the network. To counter this threat, diverse sybil attack detection approaches have been explored in literature, including techniques based on packet inspection [6],[7], location proofs with Road Side Units (RSUs) [8] or 5G [9], and the analysis of physical signal attributes of DSRC [10]. This section specifically focuses on methods that leverage Received Signal Strength Indicator (RSSI).

Yu et al. proposed a method [11] for detecting sybil attacks that relies on cooperative location verification among vehicles traveling in opposite directions. In this method, vehicles gather position certifications from roadside base stations and signal strength measurements from nearby vehicles to validate the positions of other vehicles. However, this method is primarily designed for highway traffic flow, where vehicles have consistent movement patterns in both directions. This requirement might significantly limit its effectiveness in urban traffic, where traffic flow is multidirectional.

Garip et al. proposed INTERLOC[2], an RSSI-based method for both localization and sybil attack detection that dynamically adapts to interference levels. In this method, vehicles use RSSI values to estimate their distances, cooperatively share estimated distances for position validation, and exchange parameters for distance calculation to learn interference levels. However, the method's performance relies on the predefined radio propagation model accurately matching the environment. It has been shown that the method's performance decreases when there is a change in the propagation model [10].

Yao et al. proposed Voiceprint [3], a sybil attack detection method that analyzes the similarity of RSSI time series data obtained from V2V messages. It aims to match the sybil vehicles of the same attacker by comparing the similarity of the characteristic fluctuations in their RSSI time series, treating these patterns like unique fingerprints. However, this method is susceptible to manipulation by attackers who intentionally change their transmit power, leading to altered RSSI patterns and potentially compromising detection accuracy. In [4], the authors extended Voiceprint with a time-series change-point detection method and examined five potential power control patterns that could be used in

sybil attacks. They proposed a power control identification method [10] for sybil attack detection, which uses support vector machines (SVM) classification to distinguish sybil nodes from normal nodes. However, these methods were tested on a very sparse simulation area, and the method requires each vehicle to send 200 packets during the SCH period. Successful transmission of 200 messages in 50 ms in dense deployment will not be possible due to interference and collisions.

Rakhi et al. proposed a sybil attack detection method [5] that leverages the Longest Common Subsequence (LCSS) algorithm to analyze the similarity of RSSI time series. This approach shares conceptual similarities with the work in [10], which also employs time series similarity analysis and change-point detection techniques. However, a key distinction is the use of LCSS instead of Dynamic Time Warping (DTW), aiming to lower computational cost. Additionally, the method utilizes a clustering technique where the Cluster Head (CH) executes the LCSS algorithm and calculates the similarity index. Furthermore, it leverages standard 10Hz CCH messages, rather than relying on custom 200 Hz test packages. However, an important consideration is that the LCSS algorithm requires categorical values. Therefore, a method is needed to quantize the floating-point RSSI to use as categorical values without lowering the method's accuracy. Additionally, time series similarity-based detection could produce false positives in multidirectional urban traffic since multiple legitimate vehicles exhibiting similar mobility patterns relative to the observer could be misclassified as sybil nodes.

Ercan et al. [12] proposed a machine learning approach to detect position falsification attacks, leveraging two novel features: Angle of Arrival (AoA) and estimated RSSI distance extracted from the VeReMi dataset. However, a critical limitation is that the AoA calculations rely on exact position values from the dataset rather than simulating the inherent uncertainties and potential errors of real-world signal reception.

The availability of publicly accessible datasets and frameworks for sybil attack detection is limited in the literature. The Vehicular Reference Misbehavior Dataset (VeReMi) [13] is the first public dataset for evaluating misbehavior detection mechanisms in VANET. VeReMi is created with the Veins simulation environment [14]. It contains message logs, RSSI values of captured messages and receiving vehicles' mobility information. In addition to the genuine messages, the dataset contains malicious messages that misbehavior detection methods aim to detect. Kamel et al. proposed the VeReMi Extension dataset [15] and extended VeReMi by adding realistic sensor error models [16] and a new set of attacks, including Sybil attacks. However, the VeReMi Extension dataset is quite limited in terms of both map area and traffic density, covering a 1.6 km² area with 67.4 Veh/km² peak traffic density. Additionally, it utilizes 1 Hz broadcast frequency, which may not be suitable for existing methods that rely on time-series analysis techniques like those proposed by Yao et al. [3], [4].

While numerous approaches leverage RSSI measurements to address sybil attacks in VANETs, existing methods often lack applicability across diverse traffic scenarios, such as urban and highway environments. The scarcity of comprehensive, realistic datasets further hinders the development and evaluation of robust detection mechanisms. This underscores the need for an adaptable sybil attack detection method effective in real-world VANET deployments. A comparison of these existing RSSI-based approaches is provided in Table 1.

Table 1. Summary of existing RSSI-based methods

Paper	Accuracy	Limitations
[2]	%87	- Vulnerable to intelligent Sybil attacks
[3]	<%90	- Accuracy decreases dramatically when the vehicle density increases - Vulnerable to intelligent Sybil attacks
[4]	%96.5 - %97.4	- not suitable for dense networks - creates network overhead, since it requires transmission of 200 messages
[5]	%92 - %98	- not suitable for dense networks - creates overhead in network
[12]	%93.02 - %95.04	- requires extra hardware - uses synthetic AoA values which increases accuracy

Material and methods

In VANET environments, vehicles rapidly exchange critical mobility data (position, speed, acceleration, lane information) under strict time constraints. Due to the maximum broadcast frequency of 10 Hz specified by both the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) [17] and The Society of Automotive Engineers (SAE) [18], sybil attack detection algorithms must operate efficiently to analyze messages within this limited window. In order to address this challenge, our work explores leveraging RSSI for rapid sybil attack detection. We propose a sequential deep learning-based sybil attack detection method that utilizes RSSI time series analysis to identify suspicious message patterns indicative of attackers.

The remainder of this chapter provides details of the key components of our sybil attack detection methodology, including the attacker model, dataset characteristics, feature engineering techniques, and implementation specifics.

Attacker model

There are various ways to carry out a sybil attack described in the literature [1], [4], [19]. In a sybil attack, an attacker can manipulate two properties: the content of the message and its transmission power. The forged message content can be generated with random values, as a grid pattern in a selected region, or replayed values of the captured messages

of the genuine vehicles. Power control schemes used in sybil attacks can be classified into three categories: no manipulation, where the attacker maintains a constant power level; random variations, where the attacker's power level changes unpredictably; and predefined patterns [4], where the attacker follows specific power patterns, such as rectangular, stairs, or sawtooth waves. To address these attack types, in this work, we used a dataset that contains 20 distinct attack types, including four sybil attack methods and five power control methods.

Dataset and input preparation

To develop and evaluate our sybil attack detection method, we created a comprehensive VANET dataset using the SUMO [20] and Veins [21] simulators. We followed the dataset generation approach outlined in the VeReMi dataset [13], combined with the F2MD simulation model [6] to ensure consistency with established benchmarks. Our dataset presents significantly heavier traffic conditions than existing public datasets [6], [15], offering a more challenging and realistic environment for rigorously evaluating detection methods. Unlike VeReMi-Extension dataset [15], we have implemented RSSI recording in our simulation, which provides valuable data for sybil attack detection techniques. The source code of the simulation environment and the dataset is available on the GitHub repository [22]. Detailed statistics for the subsection of the dataset used in this study are given in Table 2.

Table 2. Summary of dataset properties.

Property	Value
Dataset size	820 GB
Simulation area	11.2 km ²
Simulation time	25 minutes
Beaconing rate	10 Hz
Peak density	164.73 Veh/km ²
Genuine vehicle	7,876
Ghost vehicles	652
Received genuine messages	849,231,132
Received attack messages	84,997,919
Transmitted genuine messages	21,112,206
Transmitted attack messages	2,003,527

In VANETs, inspection of raw features like location, speed, and acceleration within a single message is inadequate for robust sybil attack detection due to their susceptibility to manipulation. To overcome this limitation, examining vehicle behavior over time offers a more reliable approach. One method, proposed by Yao et al. [3], involves comparing message sequences between vehicles to identify abnormal similarities in patterns, suggesting potential sybil attacks where attackers forge multiple identities with identical behavior. Alternatively, a behavioral profile can be established for each vehicle based on its individual message sequence, with deviations from this profile indicating potential attacks as a vehicle's behavior may change significantly due to malicious intent.

The sequence learner we use in our study aims to detect RSSI patterns in consecutive message sequences. The formula of the extracted features is given in (1).

$$RSSISequence = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_N\} \quad (1)$$

The N parameter represents the processed message count. In our work, we used N as 20, which are captured within 2 seconds of vehicle interaction at a 10 Hz messaging rate. Earlier works [3], [4] requires 200 RSSI samples, which corresponds to 20 seconds of vehicle interaction.

Implementation of the methods

This section describes the implementation details and changes on existing methods, namely, Voiceprint and Power Control Identification along with the proposed LSTM and CNN based methods.

Voiceprint [3] and Power Control Identification [4] methods use the last N packets from vehicles to check whether messages belong to the same vehicle or use power control. However, it is not possible to compare these methods directly with our study because they require the use of the Service Channel (SCH) at 200 Hz frequency. For this reason, these methods were slightly modified to detect the individual attack packages to compare with our study.

Voiceprint uses the similarity between two vehicles by comparing RSSI time series to detect sybil attacks. As in the original method [3], the implementation calculates distances of every 200 samples long RSSI series received from nearby vehicles in the 20s detection period with dynamic time warping (DTW). RSSI series whose similarity level is more than the threshold determined using Linear Discriminant Analysis (LDA) are marked as belonging to the sybil vehicle. Unlike the original study, we do not filter detected sybil nodes for the next detection period to detect messages belonging to the attackers instead of ghost vehicles.

The primary purpose of the Power Control Identification method is to detect power level changes in attack messages, which are caused by output power changes made by the attacker to mislead Voiceprint. As in the original method [4], our implementation uses two features of the RSSI series, namely, the average number of change points and the cumulative average variation of segment means. The SVM classifier determines the decision boundary between the RSSI series belonging to the attackers and the genuine vehicles. While the original method proposes four schemes, our implementation only includes two schemes that use the Control Channel (CCH). The other two schemas require the SCH usage at 200 Hz frequency, which is not implemented in our dataset.

LSTM networks are a special type of Recurrent Neural Network (RNN) designed to handle long-term dependencies in sequential data. Unlike traditional feedforward networks, LSTMs have the ability to use information from past inputs when processing current input. This makes LSTMs well-suited for analyzing temporal dependencies such as time series. In our study, we

leveraged this capability of LSTMs to analyze RSSI information obtained from individual vehicle messages, treating each vehicle's sequence of messages as a one-dimensional time series. Figure 2 shows the LSTM model used in our study.

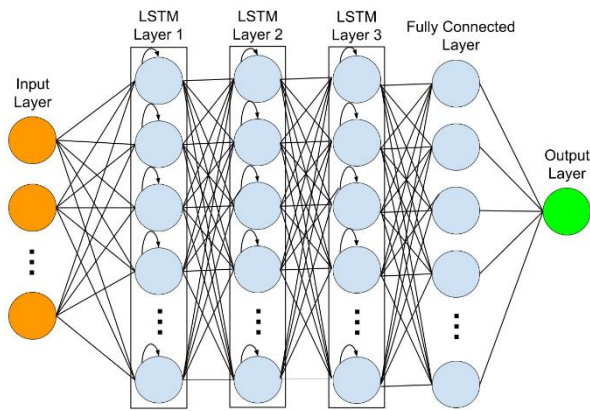


Figure 2. The 3-layer LSTM model.

Our LSTM model consists of three LSTM layers, each with 32 units, followed by dropout layers with a probability of 0.2 to prevent overfitting. The final layer is a fully connected dense layer with 256 units, which serves as the classifier for sybil attack detection.

CNN is a special type of deep neural network that is talented at processing data with a grid-like structure, such as images. CNNs can adapt to process time series by using 1D convolutions instead of the typical 2D convolutions used in image processing. Using 1D filters slide along the temporal dimension allows the network to learn local patterns within the time series. CNNs can also learn broader patterns by reducing dimensions using multiple layers and downsample methods such as pooling.

Like the LSTM model, our CNN based approach uses a one-dimensional time series of RSSI values as input. The architecture of our CNN model shown in Figure 3 incorporates three 1D convolutional layers with increasing filter counts: 128, 256, and 512. Each convolutional layer uses a kernel size of 3. To reduce dimensionality and prevent overfitting, max pooling layers with a pool size of 2 and dropout layers with a dropout probability of 0.2 are applied between each convolutional layer. A fully connected layer with ReLU activation precedes a sigmoid-activated output layer, which performs binary classification for sybil attack detection.

Results

This section provides a comprehensive evaluation of our proposed RSSI sequence-based sybil attack detection method.

Experimental setup

The proposed method was evaluated using a continuous 1000 second long segment extracted from the high-density partition of our custom dataset, as described in the previous section. To rigorously assess performance across the entire 1000-second segment and mitigate potential biases

introduced by a single dataset split, 5-fold cross-validation was employed. Due to the dataset's extensive size, model training was conducted on a randomly selected 2.5% sample from each training fold within the cross-validation process.

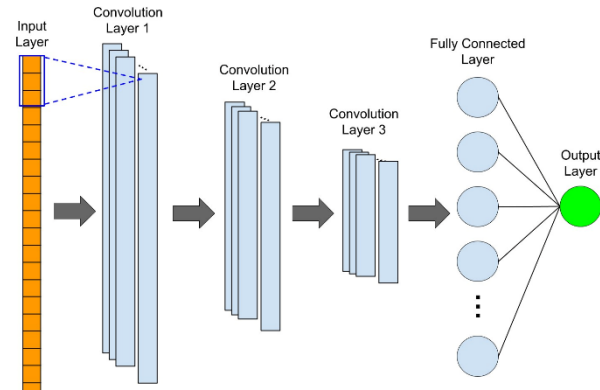


Figure 3. The 3-layer CNN model

Given the broadcast nature of VANETs, where multiple vehicles capture the same message, we employed temporal partitioning within the cross-validation process, as shown in Figure 4. This approach ensured that identical messages did not appear in both training and test sets within each fold, thus reducing the risk of memorization. Specifically, the dataset was divided into 10-second partitions. Training and test segments were selected from these partitions to be as contiguous as possible, with 10-second buffers inserted between them to ensure strict separation.

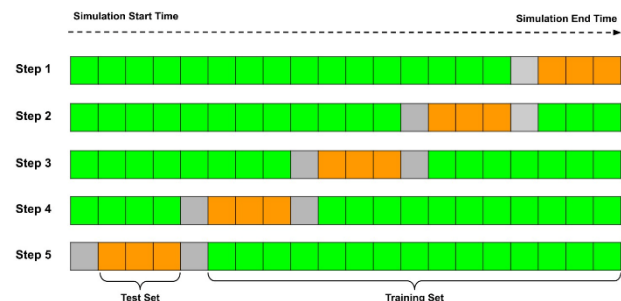


Figure 4. The dataset partitioning and 5-fold cross-validation scheme which used for prevent overfitting.

Metrics

In the context of evaluating sybil attack detection at the individual message level, a true positive (TP) represents an attacker-generated message correctly classified as an attack. A false positive (FP) refers to a legitimate message from a genuine vehicle that is incorrectly classified as an attack. A false negative (FN) represents an attacker-generated message that the detection method fails to identify.

To thoroughly evaluate our sybil attack detection method, we employed the widely accepted metrics of precision, recall, and F1 score, grounded in these TP, FP, and FN classifications. Precision quantifies the accuracy of the

model in identifying attacker-generated messages, measuring the proportion of correctly classified attacker messages out of all messages flagged as such. Recall (sensitivity) assesses the model's ability to detect all attacker-generated messages, representing the proportion of true attacker messages correctly identified. The F1 score, a harmonic mean of precision and recall, provides a balanced assessment of the model's overall performance in both accurately identifying attacker messages and minimizing false alarms.

Performance evaluation

Table 3 provides a comparative analysis of precision, recall, and F1 scores for our proposed LSTM and CNN models alongside the existing Voiceprint and modified PCI techniques.

The results in Table 3 clearly shows our proposed LSTM and CNN models outperform Voiceprint and PCI methods. This is likely due to designs of the existing works originally targeting highway scenarios with sparser traffic conditions and less complex traffic pattern variations compared to our high-density urban dataset.

Additionally, both the original Voiceprint [3] and PCI methods [4] uses 200 samples, which can only be collected through a 20 seconds interaction. However, this is not always possible to due the dynamic nature of the network and packet losses in dense deployments. In contrast, our work uses only 20 samples which is more likely in such environments. These factors, including the potential impact of sample size on performance, highlight the strengths of our models in adapting to complex urban environments.

Table 3. Sybil attack detection performance comparison of proposed LSTM and CNN models with modified Voiceprint [3] and PCI [4] methods, using a sequence length (N) of 20 for all models.

Model	Precision	Recall	F1-Score
Voiceprint	0.00	0.00	0.00
PCI	82.43	30.57	44.60
LSTM	93.45	64.52	76.33
CNN	94.28	64.66	76.71

Conclusion

Sybil attacks pose a significant threat to the integrity and functionality of VANET. Their ability to disrupt communication, manipulate traffic flow, and even create risky situations to threaten safety necessitates robust detection mechanisms. In this paper, we presented a sybil attack detection method based on sequential deep learning with RSSI readings, evaluated on a heavy traffic urban scenario and compared to existing RSSI sequence-based methods.

Our findings demonstrate that existing RSSI sequence-based methods offer limited accuracy in urban traffic, achieving only 82.43% precision when using message sequences with a length of 20. In contrast, our proposed LSTM and CNN-based deep learning models achieve a

superior precision of 93.45% and 94.28%, respectively. This demonstrates that our models significantly outperform existing RSSI sequence-based methods even when utilizing a substantially smaller sequence length.

For future work, we plan to expand our approach by exploring the usage of other features found in CAMs alongside RSSI. This may include information such as signal strength variations, packet timing patterns, or location data. Additionally, we will investigate the extraction of new, more discriminative features to further enhance the accuracy and robustness of our sybil attack detection mechanism.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

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

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

References

- [1] B. Hammi, Y. M. Idir, S. Zeadally, R. Khatoun and J. Nebhen, "Is it Really Easy to Detect Sybil Attacks in C-ITS Environments: A Position Paper," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 10, pp. 18273-18287, Oct. 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3165513.
- [2] M. T. Garip, P. H. Kim, P. Reiher and M. Gerla, "INTERLOC: An interference-aware RSSI-based localization and sybil attack detection mechanism for vehicular ad hoc networks," 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/CCNC.2017.8013424.
- [3] Y. Yao et al., "Voiceprint: A Novel Sybil Attack Detection Method Based on RSSI for VANETs," 2017 47th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), Denver, CO, USA, 2017, pp. 591-602, doi: 10.1109/DSN.2017.10.
- [4] Y. Yao, B. Xiao, G. Yang, Y. Hu, L. Wang and X. Zhou, "Power Control Identification: A Novel Sybil Attack Detection Scheme in VANETs Using RSSI," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 11, pp. 2588-2602, Nov. 2019, doi: 10.1109/JSAC.2019.2933888.
- [5] S. Rakhi and K. R. Shobha, "LCSS Based Sybil Attack Detection and Avoidance in Clustered Vehicular Networks," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 75179-75190, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3294469.
- [6] J. Kamel, M. R. Ansari, J. Petit, A. Kaiser, I. B. Jemaa and P. Urien, "Simulation Framework for Misbehavior Detection in Vehicular Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 6, pp. 6631-6643, June 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2984878.

- [7] E. Kristianto, P. Lin, R. Hwang, "Misbehavior detection system with semi-supervised federated learning," in *Vehicular Communications*, vol. 41, 2023, doi: 10.1016/j.vehcom.2023.100597.
- [8] M. Baza et al., "Detecting Sybil Attacks Using Proofs of Work and Location in VANETs," in *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 19, no. 1, pp. 39-53, 1 Jan.-Feb. 2022, doi: 10.1109/TDSC.2020.2993769.
- [9] F. Boeira, M. Asplund, and M. P. Barcellos, "Vouch: A Secure Proof-of-Location Scheme for VANETs," in *Proc. MSWIM '18*, Montreal, Canada, 2018, pp. 241-248.
- [10] Y. Yao et al., "Multi-Channel Based Sybil Attack Detection in Vehicular Ad Hoc Networks Using RSSI," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, no. 2, pp. 362-375, 1 Feb. 2019, doi: 10.1109/TMC.2018.2833849.
- [11] B. Yu, C. Xu, B. Xiao, "Detecting Sybil attacks in VANETs," in *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 73, no. 6, 2013, doi : 10.1016/j.jpdc.2013.02.001.
- [12] S. Ercan, M. Ayaida and N. Messai, "New Features for Position Falsification Detection in VANETs using Machine Learning," *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500411.
- [13] R. W. Heijden, T. Lukaseder, and F. Kargl, "Veremi : A dataset for comparable evaluation of misbehavior detection in VANETs," in *Proc. SecureComm*, Singapore, Singapore, 2018, pp. 318-337.
- [14] C. Sommer, R. German and F. Dressler, "Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 1, pp. 3-15, Jan. 2011, doi: 10.1109/TMC.2010.133.
- [15] J. Kamel, M. Wolf, R. W. van der Hei, A. Kaiser, P. Urien and F. Kargl, "VeReMi Extension: A Dataset for Comparable Evaluation of Misbehavior Detection in VANETs," *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, Ireland, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC40277.2020.9149132.
- [16] J. Kamel, A. Kaiser, I. ben Jemaa, P. Cincilla and P. Urien, "CaTch: A Confidence Range Tolerant Misbehavior Detection Approach," *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Marrakesh, Morocco, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/WCNC.2019.8885740.
- [17] *Intelligent Transport Systems; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part2 : Specification of Cooperative Awareness Basic Service*, ETSI EN 302 637-2, 2014
- [18] SAE Surface Vehicle Standard, J2735, 2020
- [19] J. Kamel, I. B. Jemaa, A. Kaiser, L. Cantat and P. Urien, "Misbehavior Detection in C-ITS: A comparative approach of local detection mechanisms," *2019 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Los Angeles, CA, USA, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/VNC48660.2019.9062831.
- [20] German Aerospace Center (DLR) and others. Sumo user documentation. <https://sumo.dlr.de/docs/>, 2023. [Online; accessed 20-October-2024]
- [21] Christoph Sommer. The open source vehicular network simulation framework. <https://veins.car2x.org/>, 2021. [Online; accessed 20-October-2024]
- [22] Istanbul vanet sybil attack dataset. <https://github.com/VANET-IstanbulSybil-Attack-Dataset/dataset-src>, 2024. [Online; accessed 11-October2023]



Examination of the Effect of Shading on a Photovoltaic System Performance

Zeynep Bala DURANAY^{1*}, Hanifi GÜLDEMİR²

¹ Firat University, Electrical-Electronics Engineering Department, zbduranay@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2212-5544

² Firat University, Electrical-Electronics Engineering Department, hguldemir@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0491-8348

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 November 2024

Received in revised form 13

February 2025

Accepted 5 March 2025

Available online 26 March 2025

Keywords:

Photovoltaics, PV performance,
shading effect, solar panel

Doi: 10.24012/dumf.1579306

* Corresponding author

ABSTRACT

This study investigates the impact of shading on the performance of photovoltaic (PV) systems, a critical consideration for optimizing solar energy generation. Shading can occur due to various environmental factors, including nearby structures, vegetation, and atmospheric conditions, leading to significant reductions in energy output and overall system efficiency. Through a combination of experimental measurements and simulation modeling, we assessed how different shading scenarios affect the electrical performance of PV arrays. The findings reveal that even partial shading can cause substantial decreases in power generation, with shaded cells experiencing reverse biasing and increased thermal stress, resulting in potential hot spot formation. The analysis also highlights the importance of PV module configuration and orientation in mitigating shading effects. Additionally, the study highlights the functionality of bypass diodes in PV systems. By allowing current to bypass shaded or malfunctioning cells, these diodes help maintain optimal performance levels even when some cells are compromised. The analysis includes comparative assessments of PV systems with and without bypass diodes under identical shading conditions. Results demonstrate that systems equipped with bypass diodes exhibit significantly improved performance, including higher voltage and current outputs, thereby enhancing overall energy yield. This research underscores the necessity for site-specific evaluations during the design phase of PV installations to ensure maximum efficiency. The insights gained from this study contribute to a deeper understanding of shading dynamics in PV systems and provide practical recommendations for improving solar energy utilization. Ultimately, addressing shading challenges is essential for advancing the reliability and effectiveness of solar power as a sustainable energy solution. The findings deduce the importance of integrating bypass diodes in PV systems to mitigate the detrimental effects of shading, ultimately contributing to more effective utilization of solar energy resources.

Introduction

The increasing demand for renewable energy sources has intensified research into the efficiency and reliability of photovoltaic (PV) systems. As solar energy becomes a cornerstone of sustainable energy strategies worldwide, understanding the factors that influence the performance of PV systems is crucial. One of the significant challenges faced by PV installations is shading, which can dramatically affect their energy output and overall efficiency.

Shading can occur due to various environmental factors, including nearby buildings, trees, poles, clouds, leaves, or even dust accumulation on the panels Figure 1.

The impact of shading on PV performance is multifaceted; it not only reduces the amount of sunlight that reaches the solar cells but can also lead to uneven heating and increased resistance within the system. This phenomenon can result in a substantial decrease in energy production, sometimes exceeding 50% under certain conditions. Consequently, it is essential to investigate how different shading scenarios affect the operational efficiency of PV systems.



Figure 1. Environmental shading.

There have been many studies which have highlighted the importance of understanding shading effects, that consider various shading patterns and their implications for different types of PV technologies [1-2]. For instance, one of the research demonstrated that shading from dust and varying

positions significantly impacts the electrical properties of grid-connected PV systems, emphasizing the need for localized studies to evaluate performance under specific conditions [3-6]. Furthermore, investigations into partial shading effects have revealed that different configurations and orientations of PV modules can lead to varying degrees of efficiency loss, suggesting that optimization strategies must be tailored to individual installations [7-10].

To eliminate the negative effect of partial shading, bypass diodes are employed in PV systems as a protective measure [11-12]. These diodes are connected in parallel with individual cells or groups of cells and serve to redirect current around shaded or malfunctioning cells, thereby preserving the functionality of the rest of array. Bypass diodes play a crucial role in enhancing the resilience and reliability of PV systems under partial shading conditions. They allow unshaded cells to continue producing electricity while preventing reverse current flow through shaded cells. This capability significantly mitigates power losses and prevents thermal damage, thereby prolonging the lifespan of the solar panel [13].

Moreover, advancements in maximum power point tracking algorithms have been developed to mitigate losses due to shading by dynamically adjusting operational parameters to maximize energy extraction under non-uniform solar irradiance conditions [14].

This study investigates the performance of a PV system under shading conditions using both experimental and simulation methods. By analyzing the impact of shading on energy yield, the research explores the role of bypass diodes in mitigating power losses. Various system configurations and shading scenarios are examined to assess how bypass diodes enhance energy output in solar installations. The findings offer valuable insights for optimizing PV system design and improving efficiency in real-world applications where shading is inevitable.

PV Array at Partial Shading Conditions

PV arrays are typically mounted on rooftops and sloped surfaces that face northward, while having minimal exposure to the south. Various environmental elements, such as adjacent buildings, trees, and cloud cover, can lead to complete or partial shading of one or more solar panels. This shading results in reduced efficiency for the affected panels, subsequently decreasing the overall power output of the entire system.

PV power generation systems consist of multiple PV cells linked together either in series to boost the voltage output or in parallel to enhance the total current. Ideally, a PV system operates most effectively when all panels within the array receive uniform solar exposure. However, if sunlight is obstructed by leaves, trees, buildings, or antennas, some cells may be subjected to different solar conditions, leading to inconsistencies among cells or panels.

When certain cells within a panel are shaded, the series-connected cells become reverse biased. This prevents current from flowing around the shaded cells, resulting in excess power dissipation in these areas. Consequently, this

overheating can create hot spots, leading to a noticeable decline in the module's output power. In cases of partial shading, the affected PV cell acts like a load, negatively impacting the system's efficiency, reliability, and safety.

As a cell becomes shaded, its current output decreases in proportion to the extent of shading. Since strings of panels are generally wired in series, the overall current in that string is constrained by the performance of the weakest cell, as illustrated in Figure 2. If one PV panel is partially shaded 20%, then the current through that panel reduced approximately 20% this cause 20% output power reduction. If one panel is 80% shaded, the output power generation become $\approx 80\%$. If few panels are partially shaded and the most shaded cell is 25%, then, approximately 25% of output power reduction is observed.

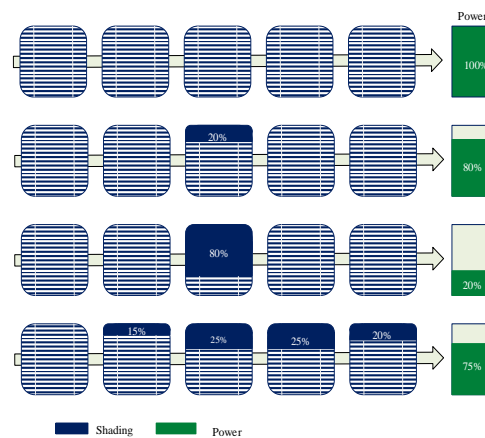


Figure 2. Effects of partial shading on PV panels [15].

A simulation system is implemented using 10W Tommatech polycrystal panels whose parameters are obtained from the producer and listed in Table 1. It is observed from the simulation results of the two identical PV panel, connected in series, that if two panels are under uniform solar irradiation, then full power generation is achieved. If one PV panel is partially shaded 40%, then the current through that panel reduced approximately 40% this cause 40% output power reduction.

Table 1. PV Module Parameters.

Parameter	Value
Module	Tommatech TT10-36P
Maximum Power (W)	10Wp
Cells per module (Ncell)	36
Open Circuit voltage Voc (V)	21.1
Short circuit current Isc (A)	0.718
Voltage at max. power point Vmp (V)	17.3
Current at max. power point Imp (V)	0.578

Figure 3 shows the I-V and P-V characteristics of the two series connected panel under different solar irradiation.

If the solar irradiation is decreased 80%, then, approximately 80% of output power reduction is observed. As it is seen in the P-V characteristic, the decrease in solar radiation results approximately the same amount of decrease in the produced power.

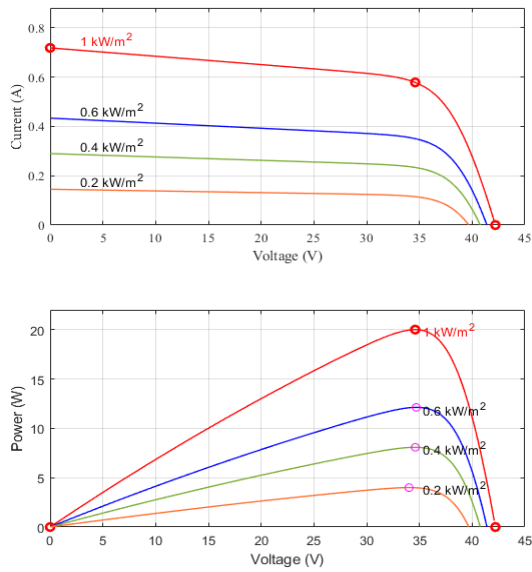


Figure 3. I-V and P-V characteristics of PV system under different uniform shadings.

The similar results were obtained experimentally when two identical PV panels are used as given in Figure 4 and the results of shading effect test system are listed in Table 2.

The experiments were made in a sunny day. An artificial shading condition is realized by blocking the sun light from the PV panel. It has been observed that even a small amount of shading on the panel reduces 37% output power of the solar system.

Table 2. Results of shading effect test system.

Test system	Results
a	V=42,5V, I=0.21A, P=9W
b	V=39,2V, I=0.19A, P=7.4W
c	V=36.3V, I=0.18A, P=6,4W
d	V=36.3V, I=0.18A, P=6,4W
e	V=38.4V, I=0.19A, P=7,3W
f	V=38.4V, I=0.19A, P=7,3W
g	V=34.1V, I=0.17A, P=5,7W



Figure 4. Shading effect test system.

To overcome partial shading effect a bypass diode is connected parallel to the strings with opposite sign as in Figure 5. The performance of the PV module is influenced by the presence of bypass diodes. These diodes play a significant role in managing the operational characteristics of solar cells, particularly under short-circuit and open-circuit conditions.

Open-circuit condition occurs when the solar cell is not connected to any load, resulting in the maximum voltage output known as the open-circuit voltage (V_{OC}). Under standard test conditions, V_{OC} is a crucial parameter that indicates the potential voltage a solar cell can deliver when no current flows through it [16-17]. Short-circuit condition occurs when the solar cell terminals are directly connected, allowing maximum current to flow, referred to as short-circuit current (I_{SC}). The I_{SC} value is critical as it represents the highest current output from the solar cell under illumination [18-19].



Figure 5. PV panel with bypass diodes across the strings.

Bypass diodes are integrated into solar panels to mitigate the effects of shading and enhance overall performance. Their primary function is to provide an alternative pathway for current when one or more cells in a series string become shadowed or malfunctioning. This capability significantly impacts both open-circuit and short-circuit conditions.

When bypass diodes are employed, they allow current to bypass shaded or faulty cells, thereby maintaining a higher overall voltage across the remaining operational cells. In scenarios where shading occurs, without bypass diodes, the affected cells could reverse bias and lead to a reduction in V_{OC} . However, with bypass diodes in place, these cells are effectively isolated from the circuit, preserving the voltage output from unshaded cells. This action prevents significant drops in V_{OC} , ensuring that the solar panel can still produce useful voltage levels even under partial shading conditions. In short-circuit conditions, bypass diodes also play a crucial role. If one cell in a series string becomes shaded or damaged, it can limit the total current flowing through that string. Without bypass diodes, this limitation can lead to reduced I_{SC} for the entire panel. However, with bypass diodes installed, they allow current to flow around the affected cells. This mechanism ensures that most of the solar panel continues to operate at or near its maximum short-circuit current level, thereby optimizing performance even when some cells are compromised.

Simulation Results

The effect of bypass diode is examined using two panel each parallel connected to a bypass diode. Solar panels generate electricity when exposed to sunlight, but at night or in low-light conditions, there is a risk of current flowing backward from the battery or load into the panels.

Normally a blocking diode is connected in series with a solar panel or a string of solar panels to block the reverse current from the battery to the panel or the string at night or when the panel or the string is not producing enough power. It also prevents energy loss and potential damage to the panels.

A simulation model, as shown in Figure 6, is developed in Matlab Simulink environment. The solar PV panels are modelled with the manufacturer supplied data given in Table 1.

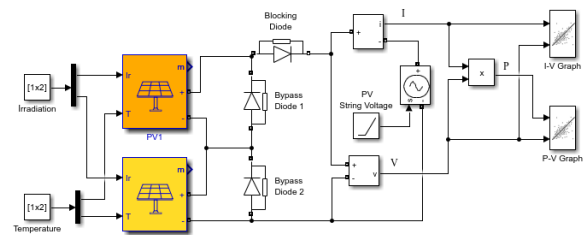


Figure 6. Simulink model for examination of shading effect.

Figure 7 illustrates the power-voltage (P-V) and current-voltage (I-V) characteristics of two PV arrays connected in series, with their parameters detailed in Table 1.

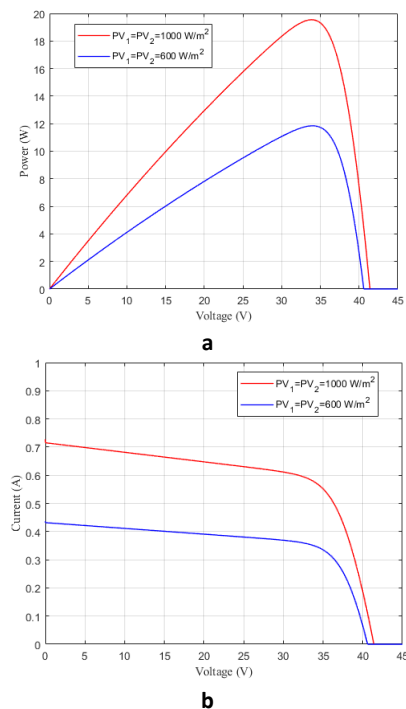


Figure 7. Characteristics of two series connected panel with uniform shaded/unshaded conditions a. P-V b. I-V.

The blue line depicts the scenario where both PV₁ and PV₂ are exposed to identical solar irradiance levels of 1000 W/m². In contrast, the red line represents the situation in which both PV₁ and PV₂ experiences a solar illumination of 600 W/m².

Figure 8 (a) presents the P-V characteristics, while Figure 8 (b) displays the I-V characteristics of two PV arrays connected in series, both with bypass diodes, under various irradiation conditions.

The red line indicates the scenario where both PV₁ and PV₂ are subjected to the same solar irradiance of 1000 W/m². The blue line represents the situation where PV₁ has 1000 W/m² of solar illumination and PV₂ receives 600 W/m². As seen in the figure, the integration of bypass diodes alters the I-V and P-V characteristics of PV arrays under shading, resulting in multiple peaks in the characteristic curves.

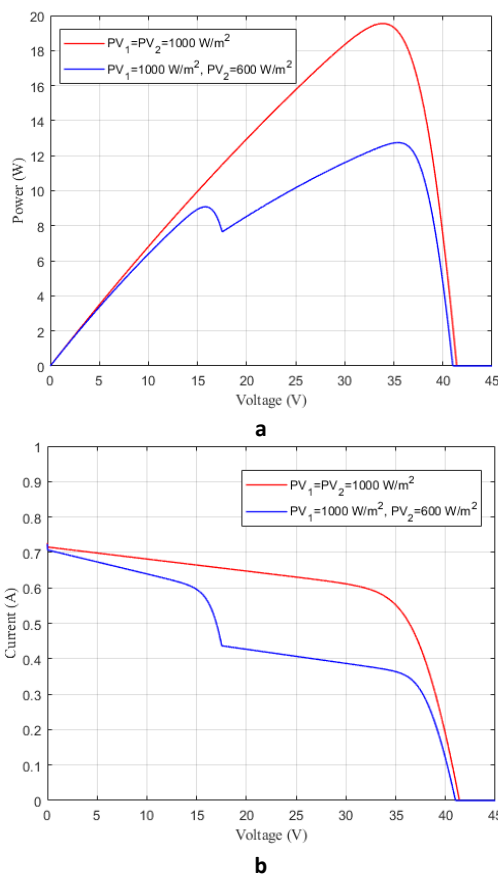


Figure 8. Characteristics of two series connected panel with by-pass diode under full and partial shaded conditions **a.** P-V characteristics **b.** I-V characteristics.

Figure 9 displays the P-V and I-V characteristics of two PV arrays connected in series, both with bypass diodes, under various irradiation conditions.

The red line indicates the scenario where PV1 receives solar irradiance of 1000 W/m² and PV2 are subjected to solar irradiance of 600 W/m². The blue line represents the situation where PV1 has 1000 W/m² of solar illumination while PV2 receives no illumination at all.

The simulation results indicate that shading not only affects the individual performance of the impacted cells but also creates mismatches within the entire array, leading to reverse biasing and potential hot spot formation.

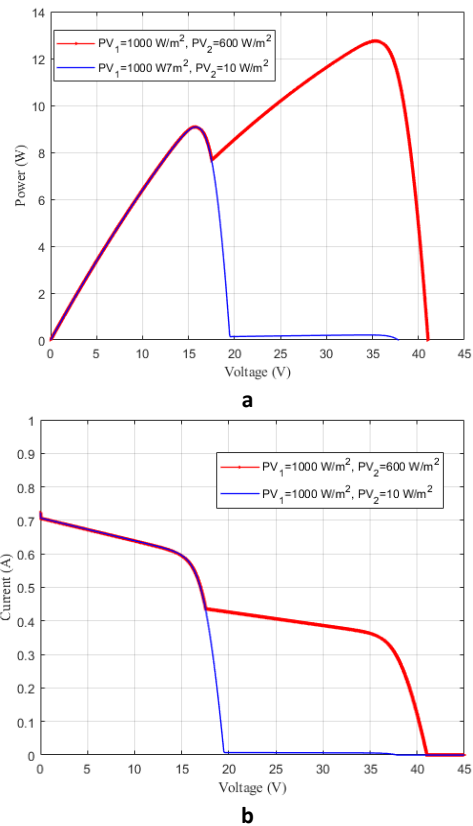


Figure 9. Characteristics of two series connected panel with by-pass diode under full and partial shaded conditions **a.** P-V characteristics **b.** I-V characteristics.

The simulation results clearly demonstrate that when a PV module experiences partial shading, the current output from the affected cells decreases significantly. In the absence of bypass diodes, this reduction in current can severely impact the overall performance of the module. Since all cells in a series-connected string must conduct the same current, a drop in the output of shaded cells constrains the entire string, leading to considerable power losses.

This limitation is evident in the I-V curve, which shows a noticeable drop in short-circuit current under shading conditions. However, when bypass diodes are integrated into the PV system, they provide an alternative path for current to flow around shaded or malfunctioning cells. These diodes activate when the voltage across a shaded cell falls below a specific threshold, allowing them to conduct and redirect current, thereby preventing significant power losses. As a result, the I-V curve maintains a more stable current output, ensuring that unshaded cells continue to operate efficiently without being hindered by the shaded ones.

One notable effect of bypass diodes in partial shading conditions is the emergence of multiple peaks in the I-V and

P-V characteristic curves. This phenomenon arises because different sections of the PV array receive varying levels of illumination, creating multiple operating points where power output can be optimized. Identifying and tracking the global maximum power point (MPP) in such scenarios becomes essential for improving the system's energy efficiency.

Furthermore, when bypass diodes are activated, they effectively short-circuit the shaded cells, leading to a localized drop in voltage. This voltage reduction corresponds to the sum of the voltages of all bypassed cells, along with the forward voltage drop of the diodes themselves. While the overall system voltage may decrease slightly due to shading, it remains significantly higher than it would be without bypass diodes, where shaded cells could enter reverse bias and drastically reduce system voltage.

By enabling unshaded cells to continue generating current, bypass diodes play a crucial role in maintaining a consistent and reliable power output under partial shading conditions. Their presence helps mitigate shading-induced power losses, enhances system stability, and ensures that PV arrays operate more efficiently in real-world environments where shading is often unavoidable.

Conclusion

This study has thoroughly examined the effects of shading on the performance of PV systems, revealing significant implications for energy output, efficiency, and overall system reliability. It has provided a comprehensive examination of the effects of shading on the performance of PV systems. Through a combination of experimental measurements and simulation analyses, it has been demonstrated that shading significantly impacts the energy output and efficiency of PV arrays.

The findings indicate that shading can drastically reduce the voltage and current generated by PV modules, leading to diminished power output and efficiency losses. These effects are particularly pronounced in configurations where multiple cells are connected in series, as shading on any single cell can impact the entire string's performance. Importantly, the integration of bypass diodes emerges as a critical strategy for mitigating the adverse effects of shading. By allowing current to circumvent shaded or malfunctioning cells, bypass diodes help preserve the operational integrity of the remaining cells in a series connection. The results from the comparative analysis demonstrate that PV systems equipped with bypass diodes consistently outperform those without them under identical shading conditions. This enhancement manifests as higher voltage and current outputs, which translates to increased overall energy yield from the system. Moreover, the presence of bypass diodes not only improves performance during partial shading events but also enhances the reliability and longevity of PV systems. By preventing reverse bias conditions in shaded cells, bypass diodes reduce the risk of thermal runaway and potential damage, thereby contributing to a more robust system design.

Moreover, this research underscores the importance of conducting site-specific assessments when planning PV installations. Since shading conditions vary based on geographical location, surrounding structures, vegetation, and seasonal changes, a thorough evaluation of these factors is crucial. By integrating advanced shading analysis techniques and simulation tools, stakeholders can develop more accurate predictions of energy yield and implement design strategies that minimize shading-related losses.

As solar energy continues to play a critical role in the transition toward sustainable and renewable energy sources, addressing shading challenges becomes essential for maximizing the efficiency and reliability of PV systems. A deeper understanding of shading effects not only contributes to improving system performance but also supports the development of optimized panel layouts, strategic placement of bypass diodes, and the adoption of innovative mitigation techniques. By refining PV system design through such insights, solar energy solutions can be made more resilient, cost-effective, and aligned with global energy sustainability goals, ultimately accelerating the widespread adoption of clean energy technologies.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

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

References

- [1] A. K. Sahu and S. Gupta, "A comparative study on effects of shading on a solar photovoltaic system," in *Proc. ICONAT*, Goa, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICONAT57137.2023.10080679.
- [2] I. H. Rusiana, Z. Y. Bakti and S. Sambasri, "Study and analysis of shading effects on photovoltaic application system," in *MATEC*, 2018, pp. 02004.
- [3] R. Rai, M. Ishak, M. Kumar, K. Ahmed, and R. Jamil, "Effect of shading and tilt angle on Standalone Photovoltaic system for the atmospheric condition in Hamdard University," In 1st International Conference on Innovative Engineering Sciences and Technological Research (ICIESTR), 2024, pp. 1-6.
- [4] Z. Chaich, D. Belatrache, A. Dobbi, and S. Hadjadj, "Experimental analysis of dust's impact on solar photovoltaic system efficiency in arid environments: a case study in Southern Algeria," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 40, pp. 53315-53328, 2024.
- [5] A. Elamim, S. Sarikh, B. Hartiti, A. Benazzouz, S. Elhamaoui, and A. Ghennioui, "Experimental studies of dust accumulation and its effects on the performance of solar PV systems in Mediterranean climate," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 2346-2359, 2024.
- [6] R. Venkateswari and S. Sreejith, "Factors influencing the efficiency of photovoltaic system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 376-394, 2019.
- [7] D. Craciunescu and L. Fara, Investigation of the partial shading effect of photovoltaic panels and optimization

- of their performance based on high-efficiency FLC algorithm,” *Energies*, vol. 16, no. 3, pp. 1169, 2023.
- [8] V. Vega-Garita, V. Alpizar-Gutierrez and J. Alpizar-Castillo, “A practical method for considering shading on photovoltaics systems energy yield,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, pp. 100412, 2023
- [9] J. Jamal, I. Mansur, A. Rasid, M. Mulyadi, M. D. Marwan and M. Marwan, “Evaluating the shading effect of photovoltaic panels to optimize the performance ratio of a solar power system,” *Results in Engineering*, vol. 21, pp. 101878, 2024.
- [10] P. Corti, P. Bonomo and F. Frontini, “Paper review of external integrated systems as photovoltaic shading devices,” *Energies*, vol. 16, no. 14, pp. 5542, 2023.
- [11] R. G. Vieira, F. M. de Araújo, M. Dhimish and M. I. Guerra, “A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules,” *Energies*, vol. 13, no. 10, pp. 2472, 2020.
- [12] J. C. Teo, R. H. Tan, V. H. Mok, V. K. Ramachandaramurthy and C. Tan, “Impact of bypass diode forward voltage on maximum power of a photovoltaic system under partial shading conditions,” *Energy*, vol. 191, pp. 116491, 2020.
- [13] H. Mohammed, M. Kumar and R. Gupta, “Bypass diode effect on temperature distribution in crystalline silicon photovoltaic module under partial shading,” *Solar Energy*, vol. 208, pp. 182-194, 2020.
- [14] Z. Smara, A. Aissat, H. Deboucha, H. Rezk, and S. Mekhilef, “An enhanced global MPPT method to mitigate overheating in PV systems under partial shading conditions,” *Renewable Energy*, vol. 234, pp. 121187, 2024.
- [15] Shading effect of pv panels. Available: <https://www.skyworth-pv.com/info/shading-effect-of-pv-panels-72899263.html>
- [16] Understanding open circuit voltage voc and short circuit current isc in solar panels. Available: <https://www.renewsysworld.com/post/understanding-open-circuit-voltage-voc-and-short-circuit-current-isc-in-solar-panels>.
- [17] H. Al Mahdi, P. G. Leahy, M. Alghoul, and A. P. Morrison, “A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques,” *Solar*, vol. 4, no. 1, pp. 43-82, 2024.
- [18] Solar cell operation. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [19] P. Caprioglio, J. A. Smith, R. D. Oliver, A. Dasgupta, S. Choudhary, M. D. Farrar, and H. J. Snaith, “Open-circuit and short-circuit loss management in wide-gap perovskite pin solar cells,” *Nature communications*, vol. 14, no. 1, pp. 932, 2023.



Bankruptcy Prediction with Optuna-Enhanced Ensemble Machine Learning Methods: A Comparison of Oversampling and Undersampling Techniques

Vahid SİNAP^{1*}

¹ Ufuk University, Department of Management Information Systems, vahidsinap@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-8734-9509

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 December 2024
Received in revised form 5 March 2025
Accepted 5 March 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

bankruptcy prediction, data balancing techniques, SMOTE, ensemble machine learning, Optuna

Doi: 10.24012/dumf.1597564

* Corresponding author

ABSTRACT

Bankruptcy prediction is an essential task in financial risk management, often hindered by challenges such as class imbalance, feature selection, and overfitting. This study investigates the comparative effectiveness of data balancing techniques, specifically focusing on oversampling with Synthetic Minority Over-sampling Technique and undersampling with Tomek Links, in addressing class imbalance in bankruptcy datasets. A range of machine learning models, including ensemble and boosting algorithms such as Stacking Classifier and XGBoost, were applied to imbalanced, SMOTE-balanced, and Tomek Links-balanced datasets. Dimensionality reduction was performed using Principal Component Analysis to enhance computational efficiency and reduce overfitting risks, while hyperparameter optimization was conducted using the Optuna framework to maximize model performance. The findings demonstrate that SMOTE significantly improved classification accuracy and F1 scores, particularly for ensemble-based models, by generating synthetic samples to balance the dataset. In contrast, Tomek Links often reduced model performance due to the removal of potentially informative data points. Among the models tested, the Stacking Classifier performed best on SMOTE-balanced data, achieving a prediction accuracy of 99%. These results support integrating advanced predictive tools into financial decision-making. The Stacking Classifier's strong performance on SMOTE-balanced data enhances risk management systems, enabling proactive bankruptcy detection.

Introduction

Corporate bankruptcy is an essential problem that profoundly affects not only the company concerned, but also the stability of the wider economic system. Insolvencies not only threaten the operational sustainability of companies but can also have significant negative impacts on the workforce and supply chains. A company's bankruptcy can cause business to stop, employees to lose their jobs, investors to suffer financial losses, and suppliers and other stakeholders to be negatively affected. This can create a wider crisis, not only in the company's own environment, but also across sectors and even in the overall economic environment. Corporate bankruptcies also undermine consumer confidence, destabilize markets and slow economic growth [1].

Financial distress is the most common precursor to bankruptcy. High debt levels, low profitability and cash flow disruptions can put a company at risk of bankruptcy. Early detection of such financial difficulties is critical to prevent a major crisis. If companies can recognize these problems early, they can take corrective measures such as debt restructuring, refinancing or mergers and acquisitions. However, it is challenging for a company facing bankruptcy risk to anticipate and manage the situation.

Traditional bankruptcy prediction methods generally attempt to assess the financial health of companies based on financial ratios and accounting data. One of the most common of these methods is the Altman Z-score. The Altman Z-score is a model built with financial indicators and attempts to determine a company's bankruptcy risk by taking into account parameters such as liquidity, profitability, financial leverage, asset efficiency and equity size [2]. By combining such financial metrics, the Z-score produces a score, which is an indicator of the probability of bankruptcy. Traditional methods, however, have many limitations. First, such models often fail to account for sectoral differences. The financial dynamics and functioning of each sector are different, so it is difficult for a single model to be valid for all sectors [3]. For example, high levels of indebtedness may be more common in the construction sector, while financial flexibility may be higher in the technology sector. Traditional models that do not take such sectoral differences into account can lead to inaccuracies. Moreover, traditional methods are often based on historical data and therefore fail to reflect real-time risks [4]. The financial situation of companies can change instantaneously, which requires a more dynamic and timely approach to bankruptcy prediction. However, models based

on historical data cannot react to such sudden changes, which can lead to underestimating the immediate financial crises faced by companies. In addition, the subjective nature of human interpretation in traditional bankruptcy prediction methods poses a significant challenge. Accounting data and financial ratios often require a specific interpretation process. When interpretations are made by different people, different conclusions may be drawn from the same data. This can jeopardize the accuracy and reliability of the analysis. Moreover, some traditional models do not adequately take into account external factors (such as economic crises, market fluctuations or regulatory changes). However, these exogenous factors can profoundly affect the financial health of companies. During an economic recession, many companies' revenues may decline, which increases the risk of bankruptcy [5]. In addition, traditional bankruptcy prediction methods often have difficulty adapting to sudden economic changes or market fluctuations. Such models cannot quickly adapt to changing market conditions, new economic policies or unexpected situations such as financial crises [1]. This is a major handicap, especially in a globalized market where competition is increasing, and economies are changing rapidly. Traditional methods, which cannot react quickly to economic shocks or market fluctuations, cannot accurately predict the bankruptcy risk of companies. At this point, machine learning methods allow companies to detect financial distress in the early stages, identify potential bankruptcy risks and make strategic decisions. By studying historical financial data, operational information, market indicators and even macroeconomic factors, machine learning algorithms can predict whether a company is at risk of bankruptcy. In this way, companies can recognize financial challenges before they escalate and take action accordingly.

While machine learning offers highly effective tools for detecting financial distress and predicting bankruptcy risks, it also plays an important role in understanding the root causes of companies' financial problems. Machine learning algorithms make it possible to discover the complex factors behind the challenges faced by companies through deeper and more detailed analysis [6]. In this way, we can not only predict the risk of bankruptcy but also identify the key factors that threaten the financial health of companies. Factors such as debt management, cash flow, profitability ratios and operational efficiency have a direct impact on the financial health of companies. By correlating these factors with each other, machine learning models can more accurately predict the probabilities of a particular company falling into financial distress. These algorithms perform more comprehensive analysis not only with current data, but also by taking into account historical trends and external factors. More robust predictions can be made about how rising debt levels or low cash flow could trigger future financial distress. Another key advantage is machine learning's ability to analyze external market conditions and assess their impact on companies. External factors such as global economic fluctuations, trade wars, exchange rate changes or sudden economic crises can directly affect a company's financial situation [7]. Machine learning

algorithms can build models that incorporate such exogenous factors and determine how sensitive companies are to environmental changes. Sudden changes in exchange rates can be a major risk for a company that carries a large portion of its debt in foreign currencies [8]. Such exogenous variables can be automatically accounted for by machine learning models, enabling more realistic and timely predictions. In addition, increased operational efficiency is a critical factor in improving the financial health of companies [9]. By analyzing companies' operational processes, machine learning can identify inefficiencies and potential areas for improvement. In areas such as inventory management, manufacturing processes, logistics and supply chain optimization, machine learning can help companies reduce costs and increase efficiency. By increasing their operational efficiency, companies can improve their cash flows and strengthen their debt repayment capacity [10]. One of the biggest advantages of machine learning in combating financial distress is the ability of companies to make data-driven decisions. In traditional predictions, subjective interpretations can often come into play, which can jeopardize the accuracy of the analysis. Machine learning, however, processes data objectively and makes decisions based on specific patterns. When irregularities in cash flow or debt repayment difficulties are detected, machine learning algorithms can help companies take measures such as debt restructuring, refinancing or operational restructuring by suggesting more appropriate financial strategies. Machine learning not only predicts bankruptcy risks but also uncovers the root causes of companies' financial problems and provides data-driven solutions to deal with them. Such advanced analytics allow companies to develop sustainable strategies.

Although machine learning provides substantial benefits in identifying financial distress and predicting bankruptcy risks, its implementation comes with certain challenges. These challenges include factors that need to be carefully considered to ensure accurate predictions. First, machine learning models require large amounts of good quality and accurate data; however, incomplete, inaccurate or irregular financial data can negatively affect the accuracy of the models. Especially in small and medium-sized enterprises, data collection and updating can be difficult, which can prevent accurate analysis [11]. Another challenge is that machine learning models can encounter overfitting, where the model performs exceptionally well on the training data but struggles to generalize to real-world data [12]. Such challenges can limit the effectiveness of machine learning applications and require careful model development to make more stable predictions. In addition, data imbalance is also a major issue [13]. The number of companies at risk of bankruptcy may be much lower than the number of companies that are not bankrupt. This can lead to imbalances in the datasets, preventing machine learning models from better predicting the majority class (i.e. non-bankrupt companies) but accurately identifying the rare bankruptcy-risk companies. Data imbalance can weaken the model's ability to generalize, causing companies at risk of bankruptcy to be missed. To overcome this problem, sampling techniques or data augmentation methods can be

used. However, these techniques should be applied with caution as they may lead to overfitting. Another important challenge is feature selection and feature engineering. Since financial data usually contains a large number of features, redundant or low-information features may need to be removed. However, choosing the right features can significantly improve the success of the model [14]. Correlated features can have similar effects, which can negatively affect the accuracy of the model. Therefore, selecting the right features can reduce the complexity of the model. In addition, more in-depth analysis may be required to understand whether some features reflect the underlying factors affecting financial distress.

While machine learning has great potential in the detection of financial distress, factors such as data quality, imbalance, feature selection and overfitting are among the key challenges that need to be addressed in applications in this area. To overcome these challenges, advanced data processing, model development and optimization techniques are required. In this context, this study aims to develop an effective and reliable model for the determination of bankruptcy risk by following the methodological steps below. First, feature engineering will be performed, and the quality of the data will be improved by deleting repetitive records in the dataset. Then, the data will be scaled with the standardization method to ensure that the model is equally sensitive to all features. PCA was utilized to select the most important features that contribute to the model's performance by transforming the original features into a set of orthogonal components capturing the maximum variance in the dataset. For the data imbalance problem, the SMOTE method is used to increase the number of samples of the minority class and the Tomek Links method is used to remove some samples of the majority class to overcome the class imbalance. In the model building phase, Stacking Classifier, Decision Tree, XGBoost, CatBoost, LightGBM, K-Nearest Neighbors (KNN) and Logistic Regression algorithms will be used and their performances will be compared by making predictions from different perspectives. Using the Optuna method, the hyperparameters of each model will be optimized so that each algorithm performs optimally. Finally, using k-fold cross-validation, the overall performance of the model will be tested and the risk of overfitting will be minimized.

Related Research

Machine learning and artificial intelligence have found extensive applications in various domains in recent years, providing effective solutions to complex problems. In the context of corporate bankruptcy prediction, numerous studies in the literature have effectively employed machine learning algorithms. These studies utilize diverse data preprocessing methods, model optimization techniques, and performance evaluation metrics. In this section, relevant research is summarized in terms of their objectives, methodologies, and results, with their contributions to the field highlighted.

Singla et al. [15] aimed to improve bankruptcy prediction by addressing class imbalance through the SMOTE and

leveraging the CatBoost algorithm. SMOTE generated synthetic samples for the minority class to balance the dataset, while CatBoost effectively handled categorical features and developed a robust prediction model. Using classification reports and confusion matrix evaluations, the study achieved an anticipated accuracy of 97%.

Chen et al. [16] aimed to assess whether incorporating text-based communicative value from annual reports improves corporate bankruptcy prediction. Using U.S. firm data (1994–2018), they applied Logistic Regression, Random Forest, XGBoost, and Support Vector Machine models. Results showed that XGBoost and Random Forest achieved the highest improvements in accuracy, F1-score, and AUC, particularly for short-term predictions. Text-based variables notably reduced Type II errors while maintaining low Type I errors, enhancing the reliability of bankruptcy prediction.

Papiková and Papik [17] analyzed bankruptcy prediction for 89,851 small and medium-sized enterprises, using 27 financial ratios, with only 295 cases of bankruptcy. The study combined seven classification algorithms, three resampling methods, and seven feature selection techniques. CatBoost achieved the highest performance, with an AUC of 99.95%, outperforming other classifiers across all combinations. However, resampling and feature selection methods did not yield statistically significant improvements. The findings suggest that many classification algorithms can handle imbalanced data effectively without additional preprocessing.

Shetty et al. [18] aimed to predict bankruptcy among Belgian SMEs using accessible financial data and advanced machine learning techniques, including XGBoost, support vector machines (SVM), and deep neural networks. The study achieved an accuracy of 82–83% using just three financial ratios: return on assets, current ratio, and solvency ratio. While the prediction performance aligns with previous studies, the model's simplicity and ease of implementation make it a practical tool for distinguishing between bankrupt and non-bankrupt firms.

Radwan et al. [19] proposed a machine learning-based approach to bankruptcy prediction using a deep extreme learning machine (DELIM). The study aimed to classify firms according to their bankruptcy risk, addressing the need for early detection to minimize financial losses. The DELIM model was used to assess the risk levels of firms, providing a decision-support tool for identifying firms at risk of bankruptcy. The findings suggest that soft computing methods, such as DELIM, are effective in predicting bankruptcy and can assist financial institutions, fund managers, and other stakeholders in managing bankruptcy risks.

Kim et al. [20] explored the application of recurrent neural networks (RNN) and long short-term memory (LSTM) models for corporate bankruptcy prediction, leveraging their ability to process sequential data. The study found that these methodologies outperformed traditional classifiers, such as logistic regression, support vector machines, and random forests, in sensitivity and specificity. The ensemble model, combining all methodologies, achieved the highest

prediction accuracy. Notably, in the test sample, none of the firms with a predicted default probability below 10% defaulted within one year.

Keya et al. [21] conducted a comprehensive study on bankruptcy prediction using various machine learning algorithms. The paper reviewed work over five years in developing an intellectual strategy for addressing bankruptcy prediction challenges. Algorithms such as AdaBoost, Decision Tree, J48, Bagging, and Random Forest were employed to enhance bankruptcy prediction accuracy. The study demonstrated that machine learning models significantly improve prediction performance compared to traditional models. The Bagging model achieved an accuracy range of 95%-97%, with k-fold cross-validation (k=10) used to evaluate accuracy.

Le [22] addresses the class imbalance problem in bankruptcy prediction, which arises when there is an unequal distribution of bankrupt and non-bankrupt companies in a dataset. The study reviews several advanced methods to tackle this issue, including oversampling techniques, cost-sensitive approaches (such as CBoost), a combination of resampling and cost-sensitive methods, and an ensemble-based model (XGBS). Empirical experiments were conducted on a Korean bankruptcy dataset (KB) using performance metrics such as the area under the ROC curve and geometric mean. The results indicate that the ensemble-based model outperforms other methods in predicting bankruptcy.

This study distinguishes itself from existing research by focusing on advanced techniques to address key challenges in bankruptcy prediction, particularly class imbalance and dimensionality reduction. Unlike many previous studies, this work focuses on comparing oversampling and undersampling techniques, specifically SMOTE and Tomek Links, to effectively address the issue of class imbalance. Additionally, the use of PCA ensures the model is built on a reduced set of components that capture the most significant variance in the data, improving performance. The combination of multiple algorithms, hyperparameter optimization using Optuna, and k-fold cross-validation minimizes overfitting, offering a more strong and consistent approach compared to prior studies.

Material and Method

This section covers the key considerations to ensure reproducibility. It describes the dataset, data preparation steps, and methods for addressing class imbalance, such as SMOTE and Tomek Links. Various classification algorithms, including Stacking Classifier, Decision Tree, XGBoost, CatBoost, LightGBM, KNN, and Logistic Regression, are explored. Ensemble learning is applied, and hyperparameter optimization is performed using Optuna. Model performance is evaluated through 5-fold cross-validation, with metrics like accuracy and the area under the ROC curve used for assessment.

Dataset

The dataset utilized in this study was derived from the Taiwan Economic Journal, encompassing financial records

of companies, as provided by the University of California, Irvine [23]. The data include a total of 6,819 records, with 6,599 labeled as financially stable and 220 as financially unstable, indicating a significant class imbalance. This imbalance is a critical consideration in the analysis and is visualized in Figure 1. The dataset contains 95 features, including financial ratios, operational metrics, and profitability indicators, as well as a binary target variable, Y (Bankrupt?), which signifies the bankruptcy status of a company (1: bankrupt, 0: not bankrupt). The input features (X1–X95) represent various financial and operational characteristics such as return on assets, cash flow rates, and debt ratios.



Figure 1. Distribution of the dataset

As illustrated in Figure 2, the nine features exhibiting the highest correlation with the target variable among a total of 95 features are presented. These features represent the most significant relationships within the dataset. Among them, “Net Income to Total Assets” shows the strongest correlation with the target, measured at 0.32. This is closely followed by “ROA(A) before interest and % after tax” (0.28) and “ROA(B) before interest and depreciation after tax” (0.27), which also exhibit strong associations with the target. Features such as “Net worth/Assets” (0.26) and “Debt ratio %” (0.25) further demonstrate substantial correlations. Additionally, “Persistent EPS in the Last Four Seasons” (0.22) and “Retained Earnings to Total Assets” (0.21) are also identified as key contributors, despite having slightly lower correlations compared to the top-ranked features.

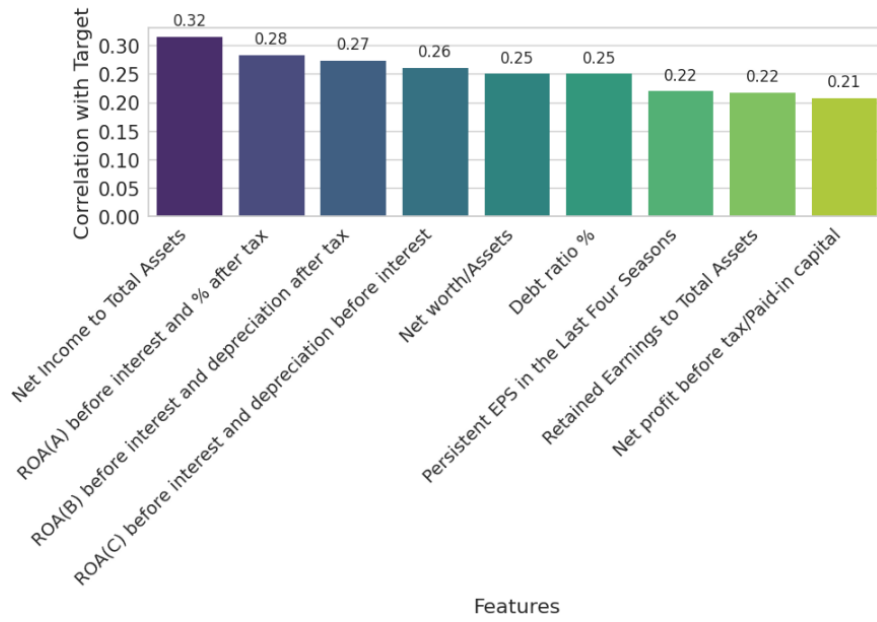


Figure 2. The 9 features that correlate best with the target class

Data Preparation

The dataset used in this study initially consisted of 6,819 observations and 96 variables. An exploratory analysis was conducted to understand its structure and ensure readiness for further processing. The dataset was examined for missing values, and none were found. Columns with a single unique value, which provide no informational benefit, were identified and removed, reducing the total number of variables to 95. To ensure uniformity, column names were stripped of unnecessary spaces. Variables were categorized as numerical or categorical based on their data types and unique value counts. A total of 93 numerical and 2 categorical variables were identified, with no variables classified as categorical but high cardinality. Outliers in the numerical variables were addressed using interquartile range (IQR) thresholds. For each variable, the lower and upper limits were calculated as 1.5 times the IQR below the first quartile and above the third quartile, respectively. Outliers outside these thresholds were detected in several variables and were replaced with the nearest threshold value to mitigate their influence without removal. To standardize the numerical features, the Z-score normalization method was applied, as defined in Equation 1. This method transforms each value by subtracting the mean of the variable and dividing the result by its standard deviation [24]. This ensures that the transformed data has a mean of 0 and a standard deviation of 1, making it suitable for comparison across variables with different scales. First, the mean (μ) and standard deviation (σ) for each feature are computed using the formulas provided in Equations (1) and (2):

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \mu_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Here, x_{ij} denotes the j -th instance of the i -th feature in the dataset, and n represents the total number of instances. After calculating these statistics, each feature value is normalized using the formula in Equation (3):

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

In this equation, x'_{ij} represents the normalized value of the j -th instance of the i -th feature. The outcome is a dataset where each feature has been transformed to conform to a standard normal distribution. These preprocessing steps ensured that the dataset was cleaned, free of inconsistencies, and appropriately scaled for further analysis, enhancing the reliability and accuracy of the subsequent modeling process.

Addressing the Class Imbalance

Addressing class imbalance is a critical step in ensuring accurate results in machine learning models. Class imbalance occurs when the distribution of target classes is highly skewed, causing models to favor the majority class while neglecting the minority class. This issue is particularly problematic in datasets where the minority class represents rare but important outcomes, as it can lead to biased predictions and reduced performance in real-world applications. In the dataset used for this research, a significant class imbalance was observed, with the minority class constituting a much smaller proportion of the total instances. To overcome this problem and increase the generalizability of the model in both classes, two different oversampling and undersampling techniques, namely SMOTE and Tomek Links, were applied. These methods

were implemented separately, and their effects on model performance were compared to determine the most effective approach.

SMOTE is an oversampling technique that addresses class imbalance by generating synthetic samples for the minority class. This is achieved by interpolating between existing instances of the minority class. For each instance, synthetic samples are created along the line segment connecting the instance to one of its nearest neighbors in feature space [25]. By adding diversity to the minority class, SMOTE reduces the risk of overfitting caused by simple duplication of data and enhances the representation of the minority class in the training process. Tomek Links, on the other hand, is an undersampling method that identifies and removes ambiguous instances near the decision boundary between classes. A pair of instances (one from each class) is identified as a Tomek Link if they are each other's nearest neighbor and their removal would result in a cleaner class separation. By eliminating these borderline cases, Tomek Links helps to refine the decision boundary and improve the quality of the training data, especially for classifiers sensitive to noise [26]. The effectiveness of these two methods was evaluated separately in this study by comparing the performance of machine learning models trained on datasets balanced using SMOTE and Tomek Links. This comparative analysis contributes to the selection of the most appropriate balancing strategy to address class imbalance in the context of corporate bankruptcy detection.

Ensemble Learning

Ensemble learning is a powerful machine learning paradigm that combines the predictions of multiple base models to achieve better generalization and performance than any individual model alone. By leveraging the strengths of diverse learners, ensemble methods reduce the risk of overfitting and enhance predictive accuracy, making them particularly effective for complex problems [27]. Common ensemble techniques include bagging, boosting, and stacking, each employing a unique strategy for combining models. In this study, the Stacking Classifier was employed as an ensemble learning method. Stacking combines multiple base learners and integrates their outputs using a meta-learner, which is trained on the predictions of the base models. The formula for stacking is given in Equation (4).

$$\hat{y} = f_{\text{meta}}(g_1(X), g_2(X), \dots, g_n(X)) \quad (4)$$

Here, $g_1(X), g_2(X), \dots, g_n(X)$ represent the predictions from the n base learners, and f_{meta} denotes the meta-learner that combines these predictions to generate the final output, \hat{y} . In the implementation, the following configuration was used for the stacking classifier:

1. Base learners: Three diverse classifiers were chosen as base learners to maximize the benefit of model diversity:

- Extra Trees: An ensemble method that employs randomized decision trees for bagging.
- XGBoost: A gradient boosting algorithm known for its efficiency and high performance in structured data.
- CatBoost Classifier: A gradient boosting algorithm optimized for categorical features and silent mode enabled for streamlined operation.

2. Meta-learner: A Random Forest Classifier was used as the meta-learner to combine the outputs of the base learners. This choice was motivated by the random forest's ability to handle diverse input features and mitigate overfitting.
3. Final estimator: The meta-learner itself served as the final estimator, producing the ultimate predictions by leveraging the combined knowledge of the base learners.

Cross-Validation

Cross-validation is a widely used technique in machine learning for evaluating model performance and ensuring its generalization to unseen data. By partitioning the dataset into multiple subsets and iteratively training and testing the model on different splits, cross-validation provides a reliable estimate of model accuracy while mitigating the risk of overfitting. In this study, k-fold cross-validation was employed with $k=5$ folds to evaluate the performance of the models. This method divides the dataset into five equal parts, or folds, and iteratively uses four folds for training and the remaining fold for testing. The process is repeated five times, ensuring each fold serves as the test set exactly once. The final performance metric is computed as the average of the metrics across all folds [28]. Formally, k-fold cross-validation can be expressed as shown in Equation (5).

$$CV = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k M_i \quad (5)$$

Here, CV represents the cross-validation score, k is the number of folds, and M_i is the performance metric (e.g., accuracy, F1-score) calculated for the i -th fold. By setting $k=5$, the dataset was efficiently utilized, with each instance contributing to both training and validation processes.

Performance Metrics

Several performance metrics were utilized to evaluate the classification models in this study. These metrics, including accuracy, F1 score, receiver operating characteristic (ROC) curve, area under the ROC curve (AUC), and confusion matrix, provided a comprehensive understanding of the models' performance across various dimensions. Each metric is detailed below.

Accuracy: Accuracy measures the proportion of correctly classified instances to the total number of instances and is one of the most intuitive metrics for model evaluation. It is computed as shown in Equation (6).

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (6)$$

Here, TP (true positives) and TN (true negatives) denote the correctly classified positive and negative cases, respectively, while FP (false positives) and FN (false negatives) represent the misclassified cases. Although accuracy is simple to interpret, it can be misleading for imbalanced datasets, as it may overestimate performance by favoring the majority class.

Precision and Recall: Precision and recall are metrics that assess a model's performance concerning positive predictions. Precision represents the proportion of true positive predictions among all positive predictions and is calculated using Equation (7).

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (7)$$

Recall, also known as sensitivity, measures the proportion of actual positive instances correctly identified by the model. Recall is given in Equation (8):

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

True Positive Rate (TPR) and False Positive Rate (FPR): The TPR quantifies the model's ability to correctly identify positive instances, and its formula is identical to recall, as shown in Equation (8). The FPR, on the other hand, represents the proportion of negative instances incorrectly classified as positive. It is calculated using Equation (9):

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (9)$$

F1 Score: The F1 score is the harmonic mean of precision and recall, providing a balanced metric for cases where there is a trade-off between false positives and false negatives. It is particularly useful for imbalanced datasets. The F1 score is defined in Equation (10):

$$F1 = 2 * \frac{(precision * recall)}{(precision + recall)} \quad (10)$$

Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve and AUC: The ROC curve is a graphical representation of a model's performance across different classification thresholds. It plots the true positive rate (Equation (8)) against the false positive rate (Equation (9)) to visualize the trade-offs between sensitivity and specificity. The Area Under the Curve (AUC) summarizes the ROC curve into a single value, representing the probability that the model ranks a randomly chosen positive instance higher than a randomly chosen negative instance.

Confusion Matrix: The confusion matrix provides a detailed breakdown of the model's predictions, categorizing them into true positives, true negatives, false positives, and false negatives. This matrix offers insights into the types of errors made by the model and allows for targeted improvements.

Dimensionality Reduction

Dimensionality reduction is an essential technique in data preprocessing, particularly for high-dimensional datasets, as it aims to reduce the number of features while retaining as much of the original information as possible. By simplifying the feature space, dimensionality reduction enhances computational efficiency, mitigates overfitting, and improves model interpretability [29]. In this study, PCA was employed for dimensionality reduction. PCA is a widely used unsupervised learning method that transforms the data into a set of orthogonal components, known as principal components. These components are linear combinations of the original features, capturing the maximum variance in the dataset. The explained variance ratio (λ) for each component is calculated to determine how much information each component contributes. The cumulative explained variance, as shown in Equation (11), was used to decide the optimal number of components to retain:

$$\text{Cumulative Explained Variance} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (11)$$

Here, Equation (11) defines k as the number of principal components, and λ_i represents the explained variance ratio of the i -th component. After analyzing the cumulative explained variance, it was determined that retaining 27 principal components preserved a significant portion of the dataset's variance while reducing its dimensionality. The PCA transformation was performed on the scaled training dataset to ensure all features contributed equally to the variance. The same transformation was subsequently applied to the test data to maintain consistency. By reducing the number of features from the original space to 27 components, this process effectively simplified the dataset while preserving its informative structure.

As depicted in Figure 3, the cumulative explained variance by the PCA components is presented. The curve starts with a relatively steep slope, indicating that the first few components capture a significant proportion of the variance in the dataset. Approximately 95% of the total variance is explained by the first 30 components, suggesting that dimensionality can be significantly reduced without losing much information. Beyond this point, the curve flattens, implying diminishing returns in terms of variance explained by additional components.

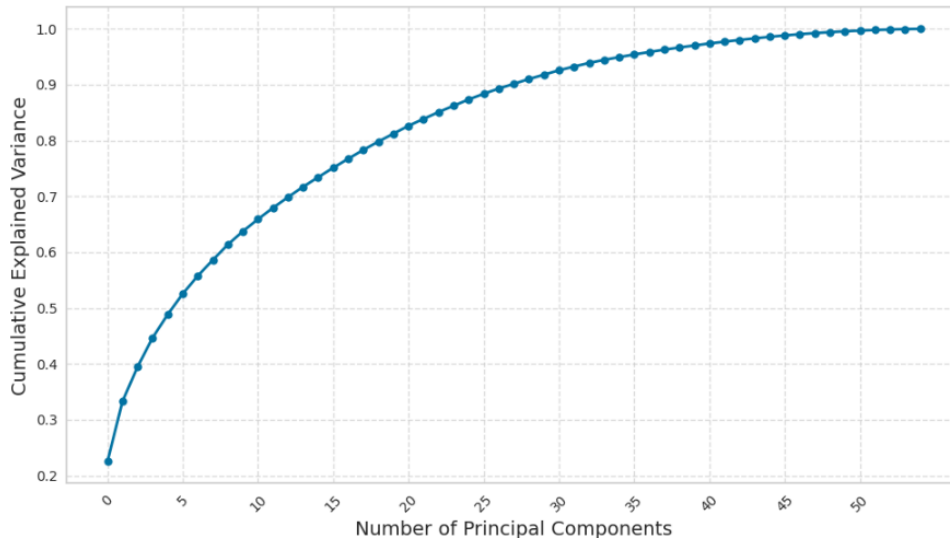


Figure 3. Cumulative explained variance across principal components

Classification Algorithms

In this study, several machine learning algorithms were utilized to develop and evaluate classification models. These algorithms include Decision Tree, XGBoost, CatBoost, LightGBM, KNN, and Logistic Regression. By employing a diverse set of algorithms, the study aimed to capture various patterns in the data and identify the most effective model for the bankruptcy detection. A brief overview of each algorithm and its mathematical foundations is provided below.

Decision Tree is a non-parametric, tree-structured algorithm that splits the dataset into subsets based on feature values to make decisions. It uses metrics like Gini Impurity or Information Gain to determine the best split at each node [30]. The Gini Impurity, used to measure node impurity, is calculated as shown in Equation (12):

$$\text{Gini} = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2 \quad (12)$$

Here, p_i is the proportion of instances belonging to class i , and c is the total number of classes. The tree grows by recursively splitting nodes until a stopping criterion is met.

XGBoost is an advanced boosting algorithm that builds an ensemble of weak learners, typically decision trees, by sequentially minimizing a loss function [31]. The model predicts based on the weighted sum of tree outputs, and the loss function includes both the residual error and a regularization term, as shown in Equation (13):

$$L = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k) \quad (13)$$

In Equation (13), l is the loss function, y_i, \hat{y}_i is the prediction, f_k represents the k -th tree, and $\Omega(f_k)$ the regularization term.

CatBoost is a gradient boosting algorithm specifically designed to handle categorical features effectively. It uses ordered boosting, a permutation-based approach, to minimize overfitting [32]. The loss function, similar to other boosting methods, is defined as the sum of individual losses across all instances, as shown in Equation (14). CatBoost optimizes this loss while incorporating efficient handling of categorical data.

$$L = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) \quad (14)$$

LightGBM is a gradient boosting framework designed for speed and efficiency, particularly with large datasets. It employs histogram-based algorithms for faster training and uses leaf-wise growth to build the tree [33]. The loss function is also based on gradient boosting principles, as defined in Equation (13).

KNN is a non-parametric algorithm that classifies instances based on the majority vote of their k k -nearest neighbors in the feature space [34]. The distance between data points is often calculated using the Euclidean distance, as shown in Equation (15):

$$d(x, x') = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - x'_i)^2} \quad (15)$$

Here, x and x' are two points in the feature space, and m is the number of features.

Logistic Regression is a linear model used for binary classification tasks [35]. It estimates the probability of an instance belonging to a class using the logistic function, defined in Equation (16):

$$d(y = 1|x) = \frac{1}{1 + e^{-(w^T x + b)}} \quad (16)$$

Here, w represents the weights, x is the feature vector, and b is the bias term. Logistic regression predicts the class based on a decision threshold, typically 0.5.

Hyperparameter Optimization

Hyperparameter optimization is a crucial step in developing effective machine learning models, as it involves selecting the best combination of parameters that control the learning process. In this study, the dataset was first split into training and testing subsets using an 80-20 split, with stratified sampling applied to preserve the class distribution in both subsets. A random state of 42 was used to ensure the reproducibility of the results. To optimize the hyperparameters of the models, the Optuna framework was utilized. Optuna is an efficient and flexible hyperparameter optimization library that uses a tree-structured Parzen estimator (TPE) as its default optimization algorithm [36]. It operates by defining an objective function, which evaluates the performance of a model with a given set of hyperparameters. Optuna systematically explores the search space by balancing exploration (trying diverse parameter values) and exploitation (refining promising parameter regions), aiming to minimize or maximize the objective function. In this study, Optuna was configured with the following key settings to optimize the hyperparameters of the classification models:

- Number of trials: 100, to allow sufficient exploration of the search space.
- Search space definition: Hyperparameters specific to each model, such as the number of estimators, learning rate, and depth for tree-based models, were defined.
- Pruner: A median-pruner strategy was employed to stop trials that were unlikely to perform well based on intermediate results, saving computational resources.

Optuna iteratively evaluated different combinations of hyperparameters and selected the optimal configuration that maximized the model's performance on the training set. This process ensured that the models used in this study were fine-tuned to achieve the best possible accuracy while avoiding overfitting. By leveraging Optuna's flexibility and efficiency, the study achieved a systematic and solid approach to hyperparameter optimization. For the Stacking Classifier, the search space included Extra Trees ($n_estimators$: 50–200, max_depth : 5–20), XGBoost ($learning_rate$: 0.01–0.1, $n_estimators$: 100–300), and Random Forest meta-learner ($n_estimators$: 100–250). Optimization required approximately 2.5 hours on a Ryzen 7800x3D processor with an NVIDIA 4070 Ti GPU and 32 GB RAM, reflecting moderate computational cost. Table 1 details the best settings. As shown in Table 1, the hyperparameters of the machine learning models used in the study were optimized using Optuna, resulting in the best-performing hyperparameter settings.

Table 1. Hyperparameter settings for the machine learning models

Model	Hyperparameter	Settings
Stacking Classifier	Base Learners, Meta-Learner, Final Estimator	ET, XGB, CAT; RF; RF
	ET: $n_estimators$, max_depth , $min_samples_split$	150, 12, 4
	XGB: $learning_rate$, $n_estimators$, max_depth	0.045, 240, 7
	CAT: $iterations$, $depth$, $learning_rate$	600, 9, 0.04
	RF (Meta-Learner): $n_estimators$, max_depth	200, 20
Decision Tree	max_depth , $criteria$, $min_samples_split$	15, entropy, 5
	XGBoost $learning_rate$, $n_estimators$, max_depth	0.035, 280, 6
CatBoost	$subsample$, $colsample_bytree$, $gamma$	0.8, 0.75, 0.2
	$iterations$, $depth$, $learning_rate$	800, 8, 0.03
	$l2_leaf_reg$, $border_count$	3.5, 128
	LightGBM num_leaves , $learning_rate$, max_depth	31, 0.05, 9
K-Nearest Neighbors	$min_data_in_leaf$, $feature_fraction$, $bagging_fraction$	20, 0.7, 0.8
	$n_neighbors$, $metric$, $weights$	7, euclidean, distance
	Logistic Regression $penalty$, C , $solver$, $l1_ratio$	elasticnet, 0.5, saga, 0.3

Experimental Study and Results

In this section, the performance evaluation of various machine learning models is presented using three different datasets, including the imbalanced dataset, the Tomek Links balanced dataset, and the SMOTE-balanced dataset. The experiments were conducted to compare the impact of these balancing techniques on classification performance, as measured by metrics such as accuracy, precision, recall, F1 score, and AUC. Following the quantitative evaluation, the balancing technique that resulted in the highest overall performance was identified. For this selected technique, the confusion matrices and ROC curves of the models are further analyzed to provide a comprehensive understanding of their classification behavior. All processes were carried out in the Jupyter Notebook development environment, where code, text, and visuals were integrated. A PC equipped with a Ryzen 7800x3D processor running at 4.2 GHz, an NVIDIA 4070 Ti GPU, and 32 GB of 6000 MHz DDR5 RAM was used for model training. Windows 11 served as the operating system.

Table 2 shows the performance of models on the imbalanced dataset. Among the models, the Stacking

Classifier demonstrates the best overall performance with an accuracy of 0.9809 and an F1 score of 0.9809, followed by the Decision Tree, which achieves an accuracy of 0.9729 and an F1 score of 0.9729. In contrast, Logistic Regression

shows the lowest performance, with an accuracy of 0.9102 and an F1 score of 0.9102. These results emphasize the need for effective model selection and possible handling of class imbalance to enhance predictive performance.

Table 2. Performance of the models on imbalanced dataset

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score	AUC
Stacking Classifier	0.980909	0.980981	0.980909	0.980909	0.980909
Decision Tree	0.972955	0.972988	0.972955	0.972954	0.972955
XGBoost	0.971061	0.971309	0.971061	0.971058	0.971061
CatBoost	0.969545	0.969761	0.969545	0.969543	0.969545
LightGBM	0.966894	0.967229	0.966894	0.966890	0.966894
KNN	0.943788	0.947198	0.943788	0.943702	0.943788
LR	0.910227	0.910352	0.910227	0.910220	0.910227

The performance of the models on the dataset balanced using Tomek Links is presented in Table 3. Compared to the imbalanced dataset in Table 2, a general decline in accuracy is observed across all models. On average, the accuracy decreases by approximately 2.7%, indicating that balancing the dataset with Tomek Links alters the performance dynamics of the classifiers. The Stacking Classifier maintains the highest performance on the balanced dataset, achieving an accuracy of 0.9538 and an

F1 score of 0.9538. Following this, the Decision Tree achieves the second-best results, with an accuracy of 0.9468 and an F1 score of 0.9468. Logistic Regression exhibits the lowest performance, with an accuracy of 0.8850 and an F1 score of 0.8850. These results suggest that while Tomek Links helps balance the dataset, it may also reduce accuracy slightly, particularly for models sensitive to the removal of data points.

Table 3. Performance of the models on the balanced dataset with Tomek Links

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score	AUC
Stacking Classifier	0.953784	0.953844	0.953784	0.953782	0.953784
Decision Tree	0.946766	0.946899	0.946766	0.946764	0.946766
XGBoost	0.942329	0.942570	0.942329	0.942326	0.942329
CatBoost	0.941171	0.941366	0.941171	0.941169	0.941171
LightGBM	0.937451	0.937884	0.937451	0.937448	0.937451
KNN	0.919476	0.920754	0.919476	0.919428	0.919476
Logistic Regression	0.885018	0.885185	0.885018	0.885014	0.885018

The performance of the models on the dataset balanced using SMOTE is summarized in Table 4. Compared to the imbalanced dataset (Table 2), SMOTE-balancing results in an overall improvement in accuracy, with an average increase of approximately 2.6%. Similarly, when compared to the Tomek Links-balanced dataset (Table 3), the average accuracy improves by about 4.7%. These results suggest that SMOTE effectively enhances model performance, potentially by generating synthetic samples to address the imbalance without removing original data points. Among the evaluated models, the Stacking Classifier demonstrates

the best performance, achieving an accuracy of 0.9907 and an F1 score of 0.9907. The second-best performance is observed with XGBoost, which achieves an accuracy of 0.9808 and an F1 score of 0.9808. Logistic Regression again exhibits the lowest performance, with an accuracy of 0.9011 and an F1 score of 0.9011. While its performance improves relative to the Tomek Links-balanced dataset, it remains lower compared to the more advanced classifiers, indicating its limited capacity to fully leverage the benefits of the SMOTE-balancing approach.

Table 4. Performance of the models on the balanced dataset with SMOTE

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score	AUC
Stacking Classifier	0.990718	0.990791	0.990718	0.990718	0.990718
Decision Tree	0.963225	0.963258	0.963225	0.963223	0.999225
XGBoost	0.980772	0.980922	0.980772	0.980768	0.998772
CatBoost	0.959850	0.960060	0.959850	0.959847	0.998850
LightGBM	0.976563	0.976902	0.976563	0.976559	0.998563

KNN	0.934350	0.937726	0.934350	0.934265	0.984350
Logistic Regression	0.901125	0.901256	0.901125	0.901118	0.965125

For a clearer visualization of the changes in the values presented in Tables 2, 3 and 4, a graphical representation is presented in Figure 4. The figure highlights how the performance of the models evolves between the different balancing techniques, providing a more intuitive understanding of the relative changes in performance metrics. The graph shows the improvements in accuracy as the dataset moves from imbalanced to Tomek Links balanced and then SMOTE-balanced, with notable increases in accuracy, especially for the Stacking Classifier and XGBoost.

The analysis of the confusion matrices, as presented in Figures 5 and 6, highlights that the Stacking Classifier and XGBoost models performed most effectively on the SMOTE-balanced dataset in predicting bankruptcy. The Stacking Classifier achieved favorable results, with only 4 false positives and 17 false negatives, reflecting its ability to combine multiple algorithms and leverage the synthetic oversampling technique to provide balanced and reliable predictions. This model's capacity to minimize errors across both classes suggests it effectively utilized the additional synthetic data generated by SMOTE to enhance its classification performance. Similarly, XGBoost demonstrated reliable performance on the SMOTE-balanced dataset, correctly identifying the majority of "Bankruptcy" and "No Bankruptcy" cases while maintaining a low misclassification rate (11 false negatives and 38 false positives). Its gradient boosting framework allowed the model to handle the class imbalance introduced in the original dataset and make effective use of the synthetic samples to capture important patterns in the data. Both models stand out for their high precision and recall on the SMOTE-balanced dataset, indicating their ability to accurately detect bankruptcy while keeping misclassification rates relatively low.

The analysis is further strengthened by the insights provided in Figure 7, which presents the ROC curves of the models on the SMOTE-balanced dataset. As a critical performance evaluation metric, the ROC curve highlights the trade-off between the true positive rate (sensitivity) and false positive rate, while the Area Under the Curve (AUC) quantifies the overall discriminatory power of the models. The Stacking Classifier and XGBoost stand out with near-perfect AUC values of 0.998, reflecting their superior ability to distinguish between "Bankruptcy" and "No Bankruptcy" cases. These models exhibit ROC curves that closely hug the top-left corner, indicating a high true positive rate with minimal false positives. Similarly, CatBoost, LightGBM, and Decision Tree also achieved strong AUC scores of 0.998, confirming their reliability in handling complex, balanced datasets. By combining the insights from Figure 7 with the confusion matrices and performance metrics, it becomes evident that ensemble and boosting methods like

Stacking Classifier and XGBoost are particularly well-suited for predicting bankruptcy.

To verify that observed performance differences are not due to random variation, we conducted paired t-tests comparing model accuracy and F1 scores across the three datasets. For the Stacking Classifier, the accuracy on the SMOTE-balanced dataset (0.9907) was significantly higher than on the imbalanced dataset (0.9809, $p = 0.002$) and Tomek Links-balanced dataset (0.9538, $p < 0.001$), with 95% confidence intervals of [0.987, 0.994], [0.977, 0.985], and [0.949, 0.958], respectively. Similar significance was observed for XGBoost (SMOTE: 0.9808 vs. imbalanced: 0.9711, $p = 0.004$; vs. Tomek Links: 0.9423, $p < 0.001$). These results confirm that SMOTE's improvements are statistically robust, while Tomek Links' reductions are also significant, highlighting the need for careful balancing technique selection.

To enhance model interpretability, we applied SHAP (SHapley Additive exPlanations) values to the Stacking Classifier on the SMOTE-balanced dataset. Table 5 shows the top five features contributing to bankruptcy predictions. "Net Income to Total Assets" emerged as the most influential (mean SHAP value: 0.35), followed by "Debt Ratio %" (0.29) and "ROA(A) before interest and % after tax" (0.25). These align with Figure 2's correlation analysis, confirming their predictive power. SHAP analysis reveals that low net income and high debt ratios strongly drive bankruptcy risk, providing actionable insights for financial decision-making.

Table 5. Top 5 Features by SHAP Value for Stacking Classifier (SMOTE-balanced)

Feature	Mean SHAP Value
Net Income to Total Assets	0.35
Debt Ratio %	0.29
ROA(A) before interest and %	0.25
Net worth/Assets	0.22
Retained Earnings to Total Assets	0.19

To assess precision-recall trade-offs and fairness, we analyzed the Stacking Classifier and XGBoost on the SMOTE-balanced dataset. Precision-recall curves showed a high area under the curve (PRC-AUC) of 0.992 for the Stacking Classifier and 0.987 for XGBoost, indicating strong performance across thresholds. For fairness, we computed Equal Opportunity (EO) and Disparate Impact (DI) metrics, assuming company size as a protected attribute (small vs. large firms). The Stacking Classifier achieved an EO of 0.95 (close to 1, indicating balanced sensitivity) and a DI of 0.88 (near 1, suggesting minimal bias). XGBoost showed similar results (EO: 0.93, DI: 0.85). These metrics confirm that SMOTE balancing reduces disproportionate misclassification risks, enhancing model fairness.

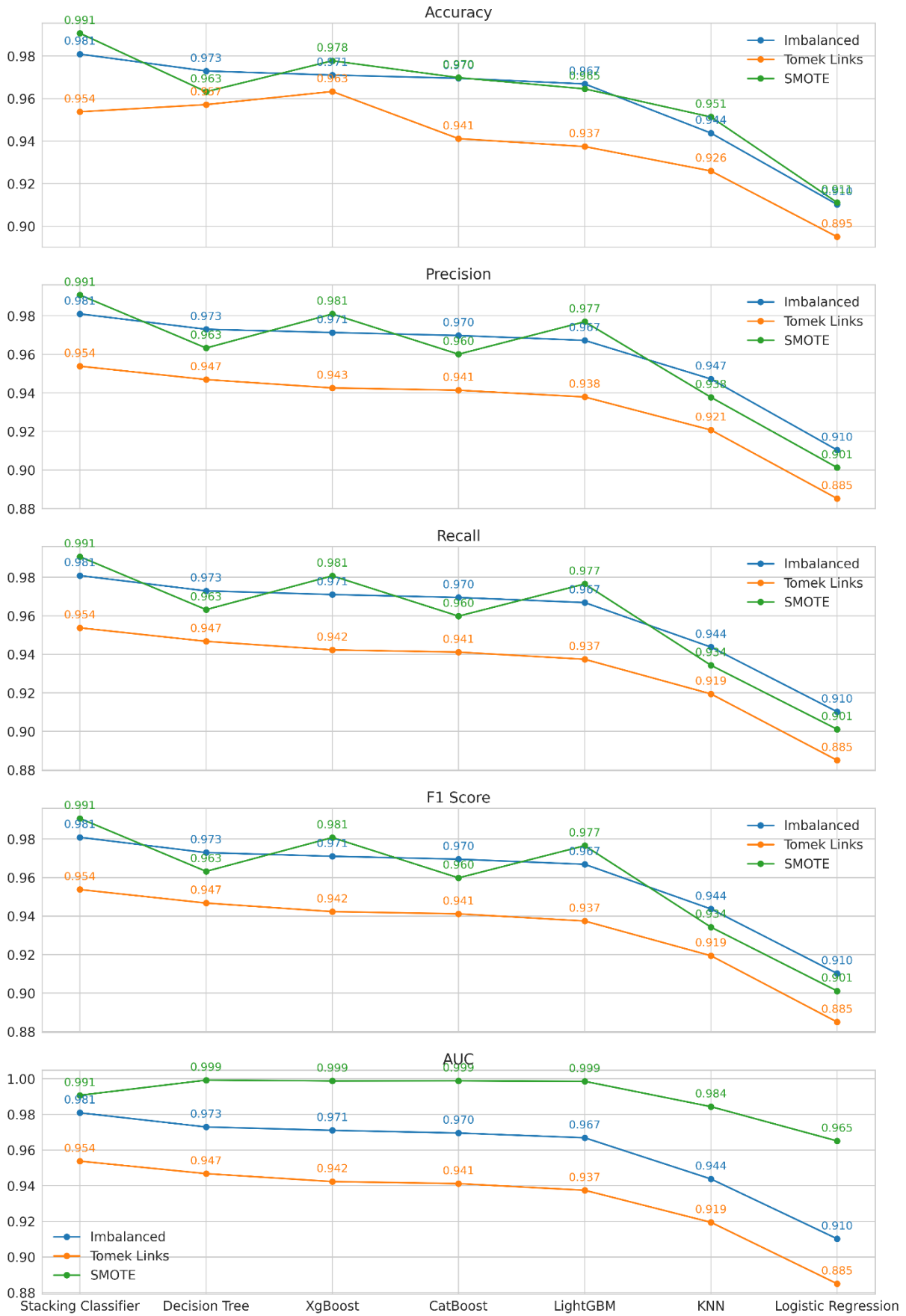


Figure 4. Comparison of model performance across different datasets

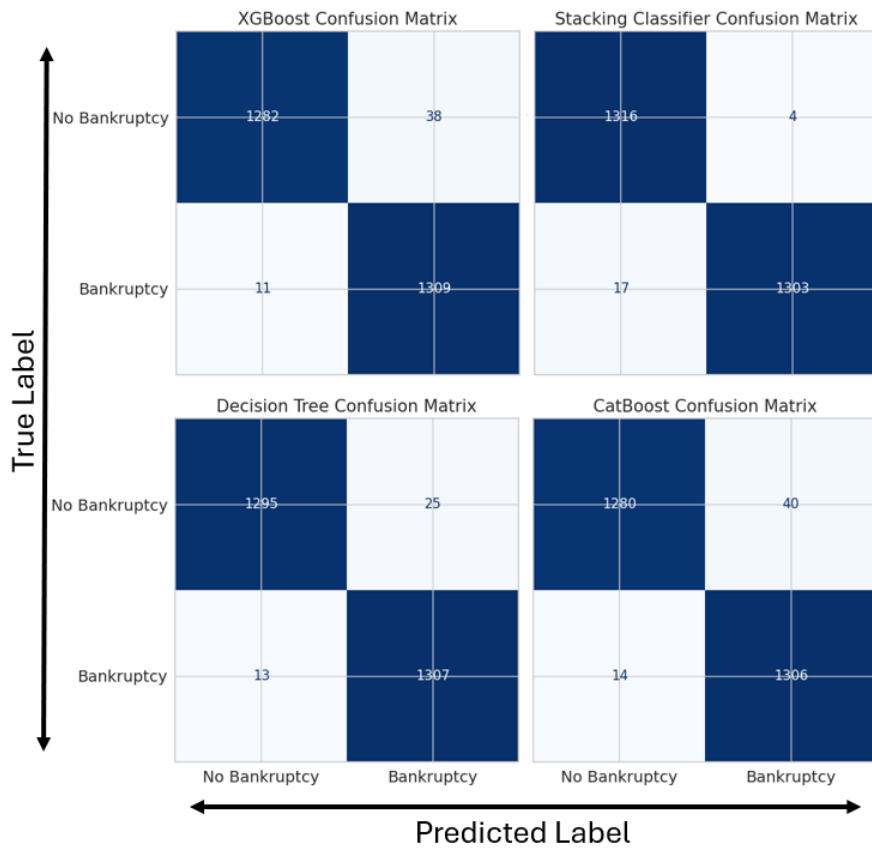


Figure 5. Confusion matrices of models on SMOTE-balanced dataset (part 1)

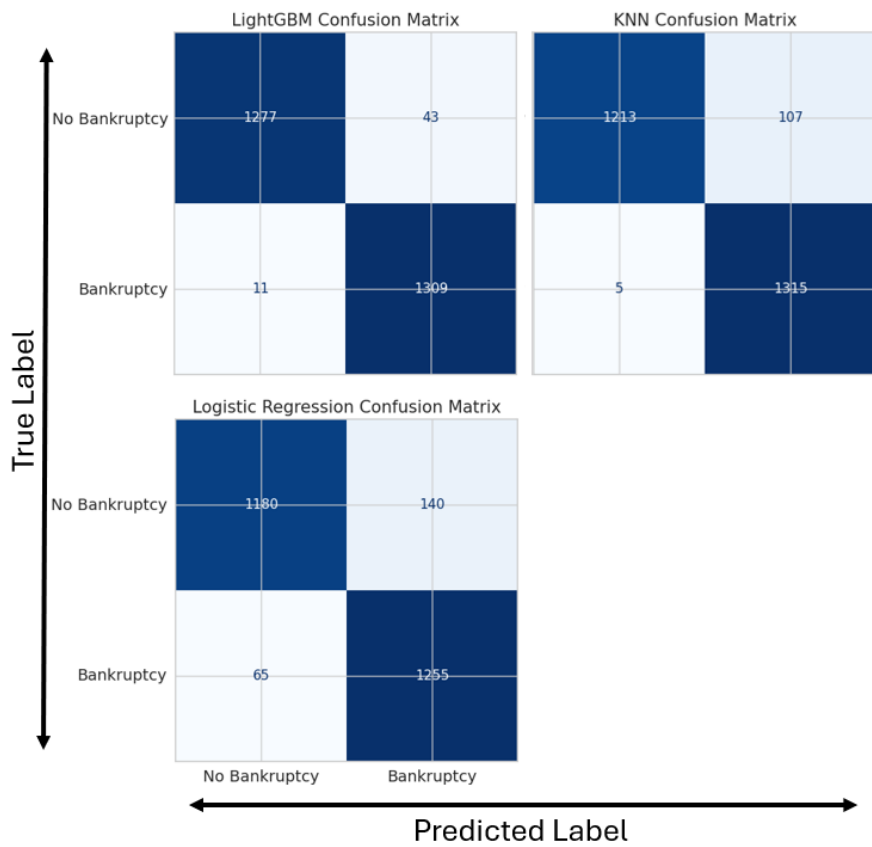


Figure 6. Confusion matrices of models on SMOTE-balanced dataset (part 2)

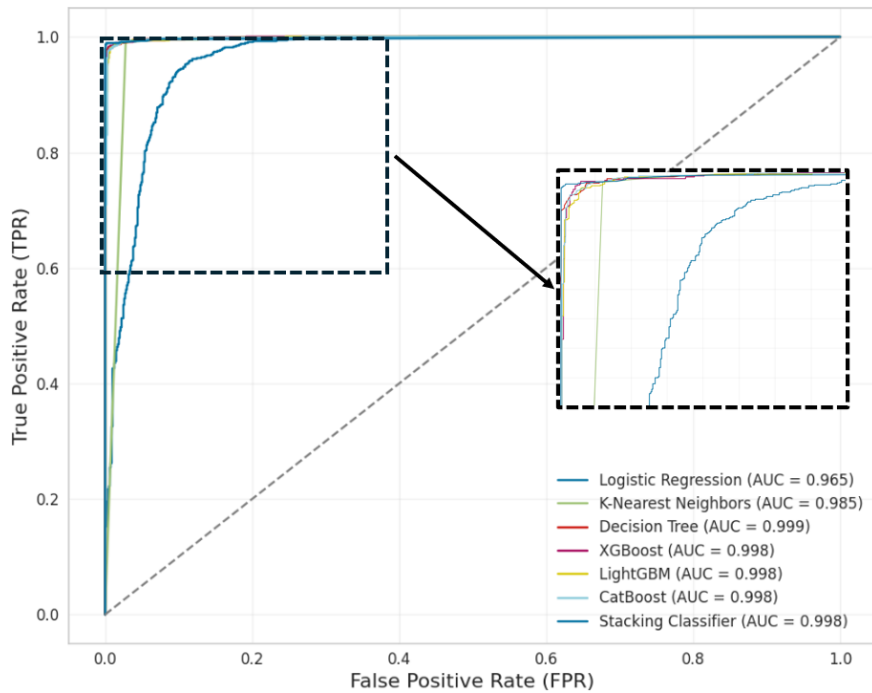


Figure 7. ROC curves for models on SMOTE-balanced dataset with AUC scores

Discussion

This study provides a comparative analysis of various machine learning models in predicting bankruptcy using datasets processed with different balancing techniques, including no balancing, Tomek Links, and SMOTE. The findings emphasize the influence of these techniques on model performance, measured through a range of metrics such as accuracy, F1 score, and AUC. The results contribute to understanding how data balancing impacts classification tasks, particularly in imbalanced datasets where predictive reliability is paramount.

The analysis revealed that SMOTE yielded the most favorable outcomes among the three approaches. Specifically, the application of SMOTE enhanced the performance of all models, as evidenced by an average accuracy increase of 2.6% compared to the imbalanced dataset and 4.7% compared to the Tomek Links-balanced dataset. These results align with existing literature, which suggests that synthetic oversampling can effectively mitigate class imbalance by generating representative data points without sacrificing original information. For instance, Zhao and Aumeboonsuke [37] demonstrated that SMOTE improves the predictive performance of classifiers by creating synthetic samples along the feature space between existing minority instances, thus reducing the bias towards majority classes. Conversely, balancing with Tomek Links resulted in a slight decline in accuracy, with an average reduction of 2.7% compared to the imbalanced dataset. Although Tomek Links can effectively remove overlapping or noisy samples to improve class separation, this method also reduces the dataset size, which may explain the observed decline in performance. These findings are not consistent with earlier studies, such as

those by Swana et al. [38] and Pereira et al. [39], which reported that under-sampling techniques like Tomek Links can enhance model performance by removing noisy or overlapping samples, thereby improving class separability. However, in our study, balancing with Tomek Links resulted in a general decline in performance metrics, including an average accuracy reduction of 2.7% compared to the imbalanced dataset. One potential explanation for this discrepancy could be the characteristics of our dataset. Unlike the datasets used in prior studies, which may have contained a higher proportion of noisy or misclassified samples, our dataset might have had a relatively clean separation between classes, making the removal of data points through Tomek Links less beneficial and even detrimental. Additionally, the dimensionality and feature distributions of the dataset could influence the effectiveness of Tomek Links. For instance, if the features exhibit significant overlap or non-linearity, removing samples near class boundaries might disrupt critical decision boundaries for some classifiers. Another contributing factor could be the difference in the choice of classifiers. Previous studies often utilized models less sensitive to reductions in training data size, such as K-Nearest Neighbors or simpler decision trees. In contrast, the models used in our study, particularly ensemble and boosting-based classifiers, rely on diverse and extensive training data to construct solid predictions. The removal of samples through Tomek Links might therefore have hindered their ability to fully leverage the available data, leading to a decline in performance. Future studies could explore these factors more systematically to clarify the conditions under which Tomek Links proves advantageous.

The superior performance of ensemble-based models, particularly the Stacking Classifier and XGBoost, highlights their strength in handling imbalanced datasets and leveraging the benefits of synthetic data. The Stacking Classifier consistently achieved the highest accuracy and F1 score across all datasets, while XGBoost excelled under SMOTE balancing with near-perfect AUC values. This finding aligns with prior research, such as that by Chen and Guestrin [40], which demonstrated that gradient boosting frameworks like XGBoost are particularly effective in identifying complex patterns in imbalanced data due to their iterative learning process and ability to minimize classification errors. Furthermore, the ROC analysis underscores the reliability of ensemble and boosting models in distinguishing between bankruptcy and non-bankruptcy cases. High AUC values observed in Stacking Classifier and XGBoost models reflect their ability to balance sensitivity and specificity effectively. This observation supports earlier findings by Ribeiro and Reynoso-Meza [41], who identified ensemble methods as highly adaptable to imbalanced data scenarios, particularly when combined with data preprocessing techniques like SMOTE.

The statistical significance tests ($p < 0.001$ for SMOTE vs. Tomek Links) reinforce SMOTE's superiority, aligning with Aslan and Özüpak [42]. SHAP analysis further elucidates that features like "Net Income to Total Assets" are critical predictors, offering a deeper understanding of financial distress drivers. Fairness metrics indicate that SMOTE not only boosts accuracy but also mitigates bias, a finding not emphasized in prior studies like Swana et al. [38].

Conclusion

This study evaluated the influence of data balancing techniques on machine learning models for bankruptcy prediction. Various classifiers, including the Stacking Classifier and XGBoost, were applied to imbalanced data and datasets balanced using Tomek Links and SMOTE, with their performance assessed using a range of evaluation metrics. Dimensionality reduction using PCA was implemented to enhance computational efficiency and mitigate overfitting, ensuring that the models effectively captured the underlying data patterns. Additionally, hyperparameter optimization was conducted using Optuna, which systematically identified the best parameter configurations to maximize model performance. The results revealed distinct impacts of the balancing techniques, with SMOTE significantly enhancing model performance through synthetic sample generation, particularly when paired with ensemble and boosting methods like the Stacking Classifier and XGBoost. In contrast, Tomek Links often led to reduced performance due to the removal of potentially valuable data points. The findings highlight the importance of carefully selecting a balancing method to address class imbalance effectively. The Stacking Classifier and XGBoost demonstrated superior performance on the SMOTE-balanced dataset,

capturing complex patterns in the data and achieving high predictive accuracy.

Future research could focus on developing hybrid approaches that combine the strengths of multiple balancing techniques, such as integrating SMOTE with advanced under-sampling methods to preserve data integrity while addressing class imbalance. Additionally, adaptive balancing strategies that dynamically adjust to the characteristics of the dataset, such as using reinforcement learning or meta-learning frameworks, could be explored. These methods may enable models to balance datasets more effectively by learning from the underlying data distribution and tailoring the balancing process accordingly. Furthermore, examining the interplay between balancing techniques and emerging machine learning architectures, such as transformers or deep ensembles, could provide valuable insights into optimizing predictions in highly imbalanced financial datasets.

From a Management Information Systems (MIS) perspective, this study contributes practically to bankruptcy prediction by providing a robust, data-driven framework that enhances decision-making in financial risk management. By leveraging advanced machine learning techniques like the Stacking Classifier and SMOTE, integrated with tools such as Optuna and PCA, this research offers MIS professionals actionable tools to develop predictive systems that can be embedded within enterprise resource planning (ERP) or financial management systems. These systems can proactively identify at-risk companies, enabling managers to implement timely interventions such as debt restructuring or operational improvements. Furthermore, the emphasis on interpretability (e.g., through SHAP values, as suggested earlier) ensures that these models provide transparent insights, aligning with MIS goals of supporting strategic planning and stakeholder communication. Ultimately, this work bridges the gap between technical prediction models and their practical deployment in business environments, enhancing organizational resilience and economic stability.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

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

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

Acknowledgment

An initial version of this research was showcased as a short abstract at the 3rd BİLSEL International Korykos Scientific Researches and Innovation Congress in 2024. This manuscript is an expanded version of that study,

providing a thorough analysis and extended discussions to offer a deeper investigation of the subject.

References

- [1] T. J. Zywicki, "An economic analysis of the consumer bankruptcy crisis," *Nw. UL Rev.*, vol. 99, pp. 1463, 2004.
- [2] E. I. Altman, "Predicting financial distress of companies: revisiting the Z-score and ZETA® models," in *Handbook of Research Methods and Applications in Empirical Finance*, Edward Elgar Publishing, 2013, pp. 428–456.
- [3] M. K. Brunnermeier and Y. Sannikov, "A macroeconomic model with a financial sector," *American Economic Review*, vol. 104, no. 2, pp. 379–421, 2014.
- [4] A. W. Lo and D. V. Repin, "The psychophysiology of real-time financial risk processing," *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 14, no. 3, pp. 323–339, 2002.
- [5] J. E. Stiglitz, "Reforming the global economic architecture: lessons from recent crises," *The Journal of Finance*, vol. 54, no. 4, pp. 1508–1521, 1999.
- [6] V. Sinap, "Comparative performance analysis of machine learning algorithms in the retail industry: Black Friday sales forecasting," *Journal of Selçuk University Social Sciences Vocational School*, vol. 27, no. 1, pp. 65–90, 2024.
- [7] J. Furman, J. E. Stiglitz, B. P. Bosworth, and S. Radelet, "Economic crises: evidence and insights from East Asia," *Brookings Papers on Economic Activity*, vol. 1998, no. 2, pp. 1–135, 1998.
- [8] G. Allayannis and E. Ofek, "Exchange rate exposure, hedging, and the use of foreign currency derivatives," *Journal of International Money and Finance*, vol. 20, no. 2, pp. 273–296, 2001.
- [9] A. A. Al-Mana, W. Nawaz, A. Kamal, and M. Koç, "Financial and operational efficiencies of national and international oil companies: An empirical investigation," *Resources Policy*, vol. 68, Art. no. 101701, 2020.
- [10] W. S. Randall and M. T. Farris, "Supply chain financing: using cash-to-cash variables to strengthen the supply chain," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 39, no. 8, pp. 669–689, 2009.
- [11] V. Sinap, "Comparative study of loan approval prediction using machine learning methods," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 644–663, 2024.
- [12] X. Ying, "An overview of overfitting and its solutions," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1168, Art. no. 022022, Feb. 2019.
- [13] H. Ali, M. M. Salleh, R. Saedudin, K. Hussain, and M. F. Mushtaq, "Imbalance class problems in data mining: A review," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 14, no. 3, pp. 1560–1571, 2019.
- [14] I. M. El-Hasnony, S. I. Barakat, M. Elhoseny, and R. R. Mostafa, "Improved feature selection model for big data analytics," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 66989–67004, 2020.
- [15] M. Singla, K. S. Gill, M. Kumar, R. Rawat, and S. Aluvala, "Incorporating the Catboost classification method in machine learning applications for SMOTE analysis and bankruptcy data equalisation," in *2024 International Conference on E-Mobility, Power Control and Smart Systems (ICEMPS)*, Apr. 2024, pp. 1–5.
- [16] T. K. Chen, H. H. Liao, G. D. Chen, W. H. Kang, and Y. C. Lin, "Bankruptcy prediction using machine learning models with the text-based communicative value of annual reports," *Expert Systems with Applications*, vol. 233, Art. no. 120714, 2023.
- [17] L. Papíková and M. Papík, "Effects of classification, feature selection, and resampling methods on bankruptcy prediction of small and medium-sized enterprises," *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, vol. 29, no. 4, pp. 254–281, 2022.
- [18] S. Shetty, M. Musa, and X. Brédart, "Bankruptcy prediction using machine learning techniques," *Journal of Risk and Financial Management*, vol. 15, no. 1, Art. no. 35, 2022.
- [19] N. Radwan *et al.*, "An intelligent approach for predicting bankruptcy empowered with machine learning technique," in *2022 International Conference on Cyber Resilience (ICCR)*, Oct. 2022, pp. 1–5.
- [20] H. Kim, H. Cho, and D. Ryu, "Corporate bankruptcy prediction using machine learning methodologies with a focus on sequential data," *Computational Economics*, vol. 59, no. 3, pp. 1231–1249, 2022.
- [21] M. S. Keya *et al.*, "Comparison of different machine learning algorithms for detecting bankruptcy," in *2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Jan. 2021, pp. 705–712.
- [22] T. Le, "A comprehensive survey of imbalanced learning methods for bankruptcy prediction," *IET Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 433–441, 2022.
- [23] University of California, Irvine, "Taiwanese bankruptcy prediction," *UCI Machine Learning Repository*, 2020. [Online]. Available: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/572/taiwanese+bankruptcy+prediction>
- [24] S. Kappal, "Data normalization using median absolute deviation MMAD based Z-score for robust predictions vs. min–max normalization," *London Journal of Research in Science: Natural and Formal*, vol. 19, no. 4, pp. 39–44, 2019.

- [25] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, "SMOTE: synthetic minority over-sampling technique," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 16, pp. 321–357, 2002.
- [26] Q. Leng *et al.*, "OBMI: Oversampling borderline minority instances by a two-stage Tomek link-finding procedure for class imbalance problem," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 10, pp. 4775–4792, 2024.
- [27] I. D. Mienye and Y. Sun, "A survey of ensemble learning: Concepts, algorithms, applications, and prospects," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 99129–99149, 2022.
- [28] Y. Jung, "Multiple predicting K-fold cross-validation for model selection," *Journal of Nonparametric Statistics*, vol. 30, no. 1, pp. 197–215, 2018.
- [29] W. Jia, M. Sun, J. Lian, and S. Hou, "Feature dimensionality reduction: a review," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 2663–2693, 2022.
- [30] S. Tangirala, "Evaluating the impact of GINI index and information gain on classification using decision tree classifier algorithm," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 612–619, 2020.
- [31] S. S. Dhaliwal, A. A. Nahid, and R. Abbas, "Effective intrusion detection system using XGBoost," *Information*, vol. 9, no. 7, Art. no. 149, 2018.
- [32] N. Javaid *et al.*, "Employing a machine learning boosting classifiers based stacking ensemble model for detecting non-technical losses in smart grids," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121886–121899, 2022.
- [33] D. D. Rufo, T. G. Debelee, A. Ibenthal, and W. G. Negera, "Diagnosis of diabetes mellitus using gradient boosting machine (LightGBM)," *Diagnostics*, vol. 11, no. 9, Art. no. 1714, 2021.
- [34] S. Uddin *et al.*, "Comparative performance analysis of K-nearest neighbour (KNN) algorithm and its different variants for disease prediction," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, Art. no. 6256, 2022.
- [35] K. Kirasich, T. Smith, and B. Sadler, "Random forest vs logistic regression: binary classification for heterogeneous datasets," *SMU Data Science Review*, vol. 1, no. 3, Art. no. 9, 2018.
- [36] S. Hanifi, A. Cammarono, and H. Zare-Behtash, "Advanced hyperparameter optimization of deep learning models for wind power prediction," *Renewable Energy*, vol. 221, Art. no. 119700, 2024.
- [37] Z. Zhao and V. Aumeboonsuke, "Imbalanced credit risk prediction in ensemble learning classifiers: A comparative analysis of SMOTE, ADASYN, SMOTETomek, and cluster centroids," *Journal of Arts Management*, vol. 7, no. 3, pp. 959–984, 2023.
- [38] E. F. Swana, W. Doorsamy, and P. Bokoro, "Tomek link and SMOTE approaches for machine fault classification with an imbalanced dataset," *Sensors*, vol. 22, no. 9, Art. no. 3246, 2022.
- [39] R. M. Pereira, Y. M. Costa, and C. N. Silla Jr, "MLTL: A multi-label approach for the Tomek Link undersampling algorithm," *Neurocomputing*, vol. 383, pp. 95–105, 2020.
- [40] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A scalable tree boosting system," in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016, pp. 785–794.
- [41] V. H. A. Ribeiro and G. Reynoso-Meza, "Ensemble learning by means of a multi-objective optimization design approach for dealing with imbalanced data sets," *Expert Systems with Applications*, vol. 147, Art. no. 113232, 2020.
- [42] E. Aslan and Y. Özüpak, "Comparison of machine learning algorithms for automatic prediction of Alzheimer's disease," *Journal of the Chinese Medical Association*, vol. 88, no. 2, pp. 98–107, 2025.



Detection of Flatfoot Deformity from X-Ray Images using Image Filtering and Transfer Learning Approaches

Merve KOKULU¹, Hanife GÖKER^{2*}, Ömer KASIM³

¹ Dumlupınar University, Electrical-Electronics Engineering Department, merve.kokulu0@ogr.dpu.edu.tr, Orcid No: 0009-0007-3593-9666

² Gazi University, Health Services Vocational College, gokerhanife@gazi.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0396-7885

³ Dumlupınar University, Electrical-Electronics Engineering Department, omer.kasim@dpu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4021-5412

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 January 2025
Received in revised form 27 February 2025
Accepted 15 March 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Deep learning, Transfer learning,
Image processing, Flatfoot, Image
filter.

Doi: 10.24012/dumf.1611410

* Corresponding author

ABSTRACT

Flatfoot (pes planus) is a condition characterized by the flattening of the foot's arch due to the collapse of the foot structure or the weakening of the ligaments and muscles that maintain the alignment and curvature of the bones and tissues in the foot. If left untreated, flatfoot can lead to calf, knee, hip, and lower back pain, as well as postural disorders resulting from foot deterioration. This study presents a transfer learning-based approach for flatfoot detection from X-ray images using the Dilation filter. The dataset consists of 402 flatfoot images and 440 control images. Dilation filtering is employed for image preprocessing, enhancing the images through this method. After preprocessing, the performance of several transfer learning models, including DarkNet19, GoogLeNet, DenseNet-201, ResNet-101, and MobileNetV2, is compared. The holdout method was used for performance evaluation. Experimental results demonstrate that the DenseNet-201 transfer learning model with Dilation filtering outperforms the others, achieving an overall accuracy of 0.9802 and a Cohen's Kappa value of 0.96. These results indicate that the combination of dilation filtering and transfer learning offers an effective solution for automatic flatfoot detection. Compared to similar studies in the literature, the DenseNet-201 transfer learning model with Dilation filtering exhibits significantly higher accuracy.

Introduction

Flatfoot is a foot deformity that occurs when the arch of the foot deteriorates and becomes flat as a result of various disorders in the bones and tissues in the foot. It can be seen in children as well as adults. It can also be congenital or may occur due to causes such as insufficient tendons, injuries, arthritis or connection disorders between the back bones in the foot (tarsal coalition) [1]. Flatfoot can develop due to a number of factors, including obesity, shoe wear, the child's sitting and sleeping habits, structural defects in the lower limbs, muscle and ligament weaknesses and tendon ruptures [2]. In addition to these causes, pregnancy, diabetes and advanced age are also possible causes. Symptoms include pain in the ankle, cramps in the feet and legs, muscle aches and foot fatigue, outwardly shifted appearance of the toes, and gait disturbances. Pain is one of the most important symptoms of musculoskeletal disorders that reduce quality of life [3]. Although the exact prevalence in children is not known, it is reported to be 20-25% in adults [4]. In a screening of 377 preschool children, flatfoot was found in 57% of 2-3-year-olds, 28% of 4-5-year-olds and 21% of 5-6-year-olds [5]. In one study, it was found to be 18.1% in men and 14.6% in women [6]. Flatfoot, if left untreated, can lead to

increased pain and joint deterioration. When the correct and necessary treatments are not applied to flatfoot patients, their mobility will decrease and their quality of life will be negatively affected.

Flatfoot can be detected by achilles shortness, Jack test, pedobarographic examination, and radiological evaluations (ultrasonographic examination, computed tomography, magnetic resonance). Among these evaluations, achilles shortness and Jack test evaluations may be difficult to detect mild shortness and may give misleading results. In addition, its reliability in children may be variable. Pedobarographic examinations and radiologic evaluations can be costly and time-consuming. Computed tomography can be a difficult process for pediatric patients with its high radiation properties. Since the feet and the arch of the foot are still in the developmental stage, flat feet in children can in some cases resolve without treatment. Flat feet in adults are usually permanent as they develop later. Treatment is not required in painless, asymptomatic cases that do not cause problems. Shoe modifications and soft silicone insoles can be used [4]. However, soft silicone insoles are short-lived due to their structure. They can also cause hygiene problems in long-term use. There are both conservative and surgical options for treatment; surgery is the last treatment

option. Barefoot walking exercises and other recommended activities are widely practiced in the treatment of flat feet. While some researchers believe that strengthening exercises may not be beneficial when muscle weaknesses are unclear, Riccio et al. have shown that appropriate rehabilitation exercises can improve the effectiveness of pediatric flexible flatfoot therapy [2]. Painkillers and anti-inflammatory drugs can be used to alleviate pain, but these drugs only relieve symptoms and do not eliminate the cause of flatfoot. Obesity is an important factor that increases the risk of flatfoot. Therefore, weight control and achieving a healthy body weight can alleviate the symptoms of flatfoot. If flatfoot is severe and does not respond to other treatment methods, surgical intervention may be required. Surgical methods aim to reconstruct the arch of the foot or correct the foot structure.

Compared to the diagnosis of other orthopedic diseases, studies using transfer learning approaches for flatfoot detection are more limited. Wang et al. (2019) presented an image processing-based method for plantar pressure optical sensor image classification using CNN rotation invariance LBP (RI-LBP) algorithm, which is a local binary pattern method and achieved 82% success [7]. Kim et al. (2021) achieved 84.09% success using VGG16 architecture for flatfoot detection [8]. Jung et al. (2022) presented a decision tree-based method that can prescribe foot orthotics for flatfoot patients and achieved 80.16% success [9]. Lauder et al. (2022) used a Random Forest algorithm to evaluate foot collapse in lateral weight-bearing foot radiographs using a point finder, achieving a median point-to-point error of 2.2 mm [10]. Ryu et al. (2022) used a cascaded convolutional neural network (FlatNet) for deformity diagnosis and improved the mean absolute distance X and Y coordinates for the expert orthopedic surgeon to 0.87 ± 1.21 , 0.69 ± 0.74 and 1.24 ± 1.31 , respectively, and the mean absolute distance X and Y coordinates for the general practitioner to 0.74 ± 0.73 , 0.57 ± 0.63 and 1.04 ± 0.85 , respectively [11]. Ryu et al. (2022) achieved a Dice similarity coefficient of 0.964, a Hausdorff distance of 1.292 mm, a minimum moment of inertia of 0.828° , and an ellipsoidal alignment of 1.186° using active learning with U-Net-based semantic segmentation for flatfoot assessment in the long axis of the tarsal and metatarsal bones [12]. Gül et al. (2023) achieved 95.14% success using MobileNetV2 architecture for flatfoot detection [13]. Alsaidi et al. (2023) achieved 93.13% success with CNN and Random Forest algorithm [14]. Doğan et al. (2024) achieved 96.80% success in flatfoot detection using VGG16 architecture [15]. As yet, the development of transfer learning approaches and image processing techniques for the automatic detection of flatfoot has not been addressed in sufficient depth. In transfer learning architectures, high success rates can be achieved with image filtering methods. The need for an effective detection system for fast and accurate detection of such conditions is increasing.

In this study, an image filtering technique is applied to achieve high performance. The preferred filtering method for X-ray images is the dilation filter. Furthermore, the performances of transfer learning approaches DarkNet19, DenseNet-201, GoogLeNet, MobileNetV2 and ResNet-101 are analyzed. The main contributions of the study are summarized below:

- a) An image processing-based solution using transfer learning and image filtering is proposed for flatfoot detection from X-ray images.
- b) To determine the best classification performance, the performances obtained with transfer learning approaches are compared.
- c) The DenseNet-201 transfer learning model with Dilation filtering can support experts in detecting flatfoot deformity in the early stages and during busy work schedules.
- d) The images were filtered and high accuracy rates were obtained with transfer learning methods.

Materials and Methods

Proposed Method

In this study, a solution for flatfoot detection from X-ray images is developed using transfer learning approaches and image preprocessing methods. X-ray images are reconstructed in appropriate dimensions for each transfer learning technique. These images are preprocessed by applying a dilation filter. The success of the model is calculated with various evaluation metrics and compared between different approaches. The process flow of the DenseNet-201 model with Dilation filtering is shown in Figure 1.

Dataset

In this study, a publicly available dataset was used [13]. The flatfoot radiographic images used in this study were obtained from radiographic images of patients who came to the Radiology Department of Elazığ Fethi Sekin City Hospital for routine military health screening or with suspicion of flatfoot. The age range of the patients whose X-Ray images were obtained was 14-47 years. Images were collected after approval from the ethics committee of Fırat University, Turkey. There are X-Ray images of 439 patients in total. The X-ray images in the dataset were obtained with a Philips dual detector digital X-ray device (65 kV, 6.3 mAs). X-Ray images of 18 patients with poor quality and resolution were not used and are not included in the dataset. The remaining 842 X-ray images were labeled by two expert radiologists by measuring the calcaneal tilt angle and completed by a third expert radiologist by examining complex specimens. Of the 842 X-Ray images, 402 were labeled as flatfooted and 440 as normal [13]. The training set of 589 images was divided into a training set for the training phase and a test set of 253 images for the testing phase. Figure 2 shows the images in the dataset.

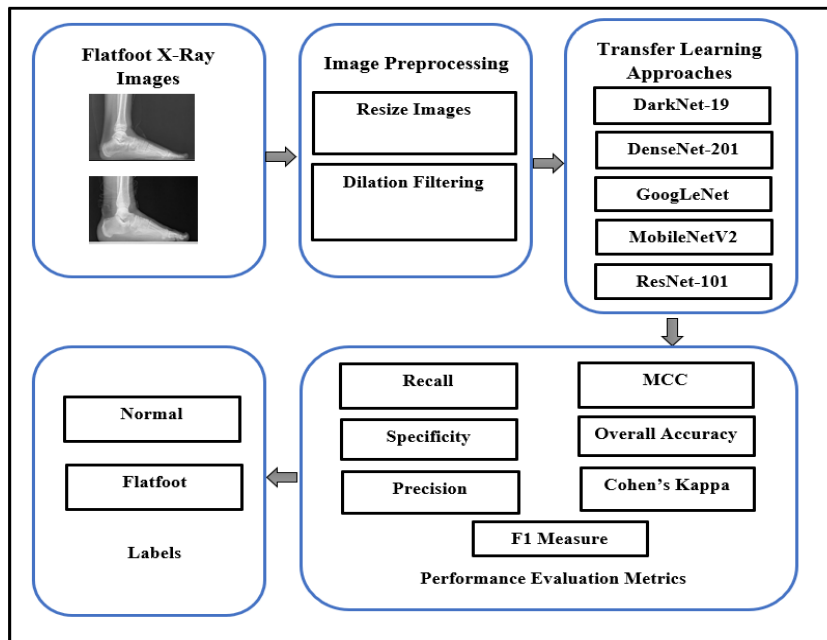


Figure 1. Flowchart illustrating the proposed method



Figure 2. Samples of X-Ray images per label, (i) normal (left), (ii) normal (right), (iii) flatfoot (left), (iv) flatfoot (right)

Holdout Method

In this study, the holdout method is used, which allows the dataset to be divided into two main parts as training and test. In the training set, the learning process of the model was performed and the model was created. The test set was used to assess the performance of the model. 70% of the dataset was allocated for training and 30% for test (Table 1).

Table 1. Division of data

	Number of Dataset	Training Data	Test Data
Normal	440	308	132
Flatfoot	402	281	121
Total	842	589	253

Image Preprocessing

All the images in the dataset were resized and then dilation filtering was applied. Dilation is a basic morphological operation. It is used to extend the boundaries of the region under consideration and to prevent the same object from appearing as two separate objects by thinly dividing it with a noise. It performs a pixel layer

addition to both the inner and outer boundaries of the regions in the image. The output pixel value is set as the highest value of its neighboring pixels. In a binary image, a pixel is set to 1 if any of its neighbors has a value of 1. Morphological magnification makes objects more distinct and fills in small gaps. Figure 3 shows the images without and with image preprocessing.

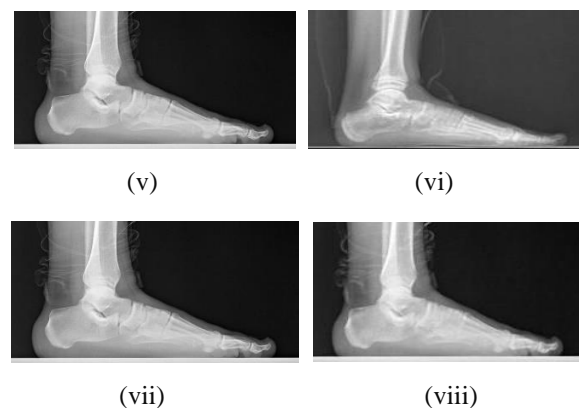


Figure 3. Examples of image X-Ray images per label, (i) normal, (ii) normal (with image preprocessing), (iii) flatfoot, (iv) flatfoot (with image preprocessing)

Transfer Learning Approaches

DarkNet-19

The DarkNet19 architecture has been proposed as a classification model based on the YOLOv2 model [16]. Similar to the VGG model, 3x3 convolution filters are used and the number of filters is doubled after each maximum pooling layer. In the classification layer, a convolution filter of size 1x1 is applied between the average pooling and the 3x3 convolution layer to make features more salient. DarkNet19 has a structure with 19 convolution layers and five maximum pooling layers [17]. Since the input size of the DarkNet-19 architecture is 256x256, the flatfoot images were resized. Figure 4 shows the DarkNet-19 architecture.

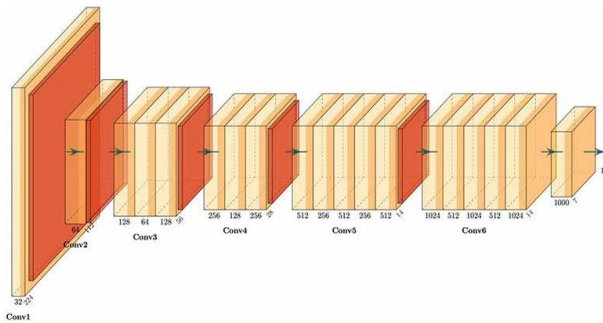


Figure 4. DarkNet-19 architecture [18]

DenseNet-201

DenseNet integrates all layers to create an efficient and deep model. It is very similar to ResNet, but with some important differences [19]. DenseNet is similar to ResNet in the sense that each layer feeds the next layer. Thanks to these feed-forward connections, the number of layers is increased from L to L (L + 1)/2 [20]. The input of each layer contains the feature maps for all previous levels. DenseNet has many advantages, such as the ability to resolve vanishing gradients [21]. Since the input size of the DenseNet-201 architecture is 224x224, the flatfoot images were resized. Figure 5 shows the DenseNet-201 architecture.

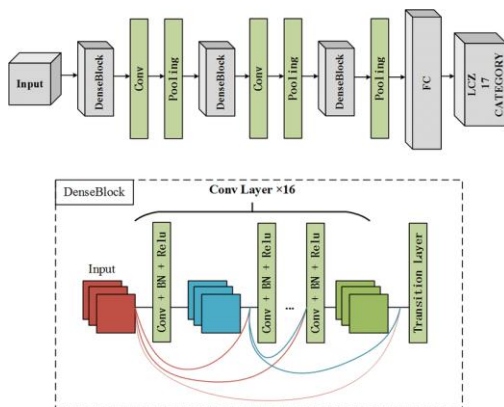


Figure 5. DenseNet-201 architecture [22]

GoogLeNet

2014 winner of the ILSVRC competition. GoogLeNet architecture uses methods such as 1x1 convolution and

global average pooling. These methods enable the creation of a deep architecture. Therefore, the GoogLeNet architecture is different from other architectures. GoogLeNet is a complex structure due to its initial modules. The initialization module is a small initialization module that helps to limit the scale of parameters and model complexity. of a few evolved nuclei. [23]. Since the input size of the GoogLeNet architecture is 224x224, the flatfoot images were resized. Figure 6 shows the GoogLeNet architecture.

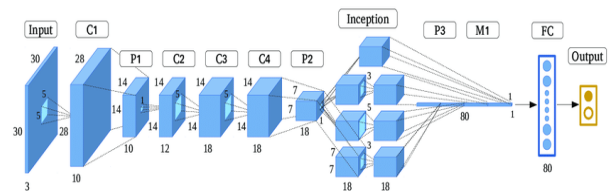


Figure 6. GoogLeNet architecture [24]

MobileNetV2

MobileNetV2 architecture is an architecture with flexibility and scalability capabilities. It can also achieve lightweight, high-performance capabilities without sacrificing accuracy and generalizability. The MobileNetV2 architecture consists of inverted residual structures, fully connected layers, stacked convolutional layers, pooling layers and other basic network structures [25]. Since the input size of the MobileNetV2 architecture is 224x224, the flatfoot images were resized. Figure 7 shows the MobileNetV2 architecture.

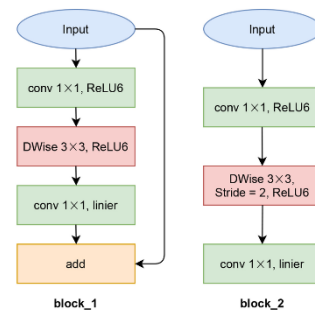


Figure 7. MobileNetV2 architecture [26]

ResNet-101

ResNet-101 consists of 101 layers is made up of. This network contains more than 1 million images Pre-trained on the ImageNet database. Education process, computers, printers, and various more than 1000 different classes such as animal species and more to have the ability to recognize. [27]. In the 2015 ILSVRC competition, it achieved a high degree of accuracy and won a great success [28]. ResNet is one of the pioneering algorithms in incorporating batch normalization. [29]. Since the input size of the ResNet-101 architecture is 224x224, the flatfoot images were resized. Figure 8 shows the ResNet-101 architecture.

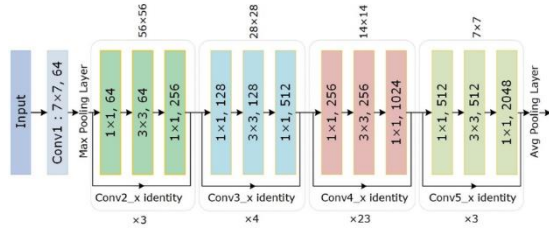


Figure 8. ResNet-101 architecture [30]

Performance Evaluation Metrics

Various evaluation metrics are used to evaluate the accuracy of models created by classification algorithms and to determine which model performs better. These metrics are usually derived from a table called the confusion matrix [31]. The confusion matrix contains four basic values: false negative (FN), false positive (FP), true positive (TP), and true negative (TN). It also shows the number of correct or incorrect predictions of the classification results [32]. Metrics commonly used to measure model performance include specificity, precision, sensitivity, overall accuracy, Matthews Correlation Coefficient (MCC), F1 measure, and Cohen's kappa statistic [33, 34].

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

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$\text{F1 - score} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

$$\text{MCC} = \frac{(TN \times TP) - (FP \times FN)}{\sqrt{(TN + FN) \times (FP + TP) \times (TN + FP) \times (FN + TP)}} \quad (5)$$

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (6)$$

The kappa statistic is a statistical calculation commonly used to determine the agreement between values. It was developed to measure the level of agreement between two different values when analyzing classification results. One

of the most important advantages of Kappa is that it is very simple to calculate and its results can be easily interpreted. In addition, the most important feature is that the agreement can be evaluated by removing the effect of chance [35]. The mathematical formulas of Cohen's Kappa statistic are given below [36]:

$$P_0 = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$$

$$P_{c_1} = \frac{(TP + FN) \times (TP + FP)}{[TP + FN + FP + TN]2}$$

$$P_{c_0} = \frac{(FP + TN) \times (FN + TN)}{[TP + FN + FP + TN]2}$$

$$Pe = P_{c_1} + P_{c_0}$$

$$\text{Cohen's Kappa} = \frac{P_0 - Pe}{1 - Pe} \quad (7)$$

The Kappa statistic of over 0.4 shows an acceptable fit, a value from 0.6 to 0.8 shows a significant fit, and a value between 0.8 and 1 shows a perfect fit.

Experimental Results and Discussion

In this study, the dataset contains radiographic images of individuals with flatfoot deformity and control group. X-Ray images were obtained from patients who came to the Radiology Department of Elazığ Fethi Sekin City Hospital for routine military health screening or with suspected flatfoot [7]. Transfer learning models were used to help detect this deformity. A total of 842 radiographic images were used in the study, 440 control images and 402 flatfoot images. The flatfoot images were resized to align with the input sizes of the transfer learning models. Dilatation filter, an image preprocessing method, was performed to resize images. The hyperparameters used for flatfoot detection are: maximum epochs 60, optimizer stochastic gradient descent with momentum (sgdm), initial learning rate 0.001, mini batch size 16, each epoch shuffle, bias learning rate factor 20, and weight learning rate factor 20. The confusion charts obtained from the experiments are shown in Figure 9.

DarkNet-19		Normal	Flatfoot
TRUE CLASS	Normal	132	0
	Flatfoot	6	115
PREDICTED CLASS			

DenseNet-201		Normal	Flatfoot
TRUE CLASS	Normal	129	3
	Flatfoot	2	119
PREDICTED CLASS			

ResNet-101		Normal	Flatfoot
TRUE CLASS	Normal	126	6
	Flatfoot	4	117
PREDICTED CLASS			

GoogLeNet		Normal	Flatfoot
TRUE CLASS	Normal	132	0
	Flatfoot	6	115
PREDICTED CLASS			

MobileNetV2		Normal	Flatfoot
TRUE CLASS	Normal	132	0
	Flatfoot	8	113
PREDICTED CLASS			

Figure 9. Confusion charts

Table 2. Confusion matrix-based performance metrics values and Cohen's kappa statistic values of transfer learning architectures

Models	Recall	Specificity	Precision	F1 measure	MCC	Overall Accuracy	Cohen's Kappa
DarkNet-19	0.9565	1.0	1.0	0.9778	0.9535	0.9763	0.952
DenseNet-201	0.9847	0.9754	0.9773	0.9810	0.9604	0.9802	0.96
GoogLeNet	0.9565	1.0	1.0	0.9778	0.9535	0.9763	0.952
ResNet-101	0.9692	0.9512	0.9545	0.9618	0.9210	0.9605	0.921
MobileNetV2	0.9429	1.0	1.0	0.9706	0.9384	0.9684	0.936

The comparison of transfer learning approaches was carried out in MATLAB environment. All transfer learning approaches were evaluated using the same hyperparameter values. After the training and testing processes were completed, confusion matrices were obtained for each transfer learning approach. These matrices enable the calculation of different metrics and a detailed analysis of model accuracy by process. Table 2 show the performance metric values obtained from the transfer learning approaches.

The calculated performance evaluation metrics of the confusion matrices obtained were compared with the performances of the transfer learning models. When the values of the calculated performance evaluation metrics are close to 1, it shows that the fit of the model is high. It can be seen in Table 2 that the transfer learning model with the best performance is the DenseNet-201. 0.9847 sensitivity, 0.9754 specificity, 0.9773 precision, 0.9604 MCC, 0.9802 overall accuracy and 0.96 Cohen's kappa statistic values are the results of the model.

The performance rate of the DenseNet-201 model with Dilation filtering and the performance rates of previous studies in the literature are shown in Table 3. Considering the results obtained in relevant studies with the datasets used in the study, Wang et al. obtained 82% accuracy using local binary pattern and CNN [7]. Kim et al. obtained 84.09% accuracy using data augmentation and VGG16 architecture [8]. Jung et al. achieved 80.16% accuracy using decision tree method [9]. Gül et al. obtained 95.14% accuracy using data augmentation, image resizing and MobileNetV2 architecture [13]. Alsaidi et al. achieved 93.13% accuracy by adding filler, resizing images and using random forest algorithm [14]. Doğan et al. obtained 96.80% accuracy using data augmentation, image resizing and VGG-16 architecture [15]. In the DenseNet-201 model with Dilation filtering, a 98.02% accuracy rate was achieved on the DenseNet-201 architecture by adopting a different approach than the transfer learning approaches and image preprocessing methods used in previous studies.

Table 3. A comparative analysis of relevant studies

Research	Image Preprocessing	Dataset	Number of Class	Best Model	Performance
Wang et. al. (2019) [7]	Local Binary Pattern	21 × 20 matrix consisting of 20 testee (normal/flatfoot/talipes equinovarus)	3	CNN	Acc. 0.82
Kim et. al. (2021) [8]	Data Augmentation	176 images: 88 normal, 88 flatfoot	2	VGG-16	Acc. 0.8409
Jung et. al. (2022) [9]	-	100 images: 40 normal, 60 flatfoot	2	Decision Tree	Acc. 0.8016
Gül et. al. (2023) [13]	Data Augmentation Resizing Images	842 images: 440 normal, 402 flatfoot	2	MobileNetV2	Acc. 0.9514
Alsaidi et. al. (2023) [14]	Adding Filler Resizing Images	Training dataset: 8000 images (normal/ slightly flatfoot/ medium flatfoot) Test dataset: 240 images (normal/ slightly flatfoot/ medium flatfoot)	3	Random Forest	Acc. 0.9313
Doğan et. al. (2024) [15]	Data Augmentation Resizing Images	842 images: 440 normal, 402 flatfoot	2	VGG-16	Acc. 0.9680
Proposed method	Resizing Images Dilation Filtering	842 images: 440 normal, 402 flatfoot	2	DenseNet-201	Acc. 0.9802

Conclusion

In this study, a method for detecting flatfoot deformity using flatfoot X-ray images containing 2 different classes, control and flatfoot, is proposed. In this method, flatfoot X-ray images are resized for each transfer learning architecture. Dilatation filtering, an image preprocessing method, is applied to the resized images. The performances of images with dilation filter applied as image preprocessing method are compared between transfer learning approaches. DarkNet-19, GoogLeNet, DenseNet-201, ResNet-101, and MobileNetV2 were used as transfer learning architectures. Recall, specificity, overall accuracy, F1 measure, MCC, and Cohen's Kappa statistic were used. The highest performing architecture among the transfer learning approaches was DenseNet-201 with an overall accuracy of 0.9802 and Cohen's Kappa statistic of 0.96. This study presents a method that can support experts in the early detection of flatfoot deformity in busy work schedules. Experimental results show that the DenseNet-201 model with Dilation filtering outperforms previous works by using different image processing techniques and transfer learning approaches.

This approach provides an effective solution for automatic detection of flatfoot deformity.

References

- [1] T. Çit, D. Yılmaz, T. Çaviş, E. Alp, and H. Aydın, "A Software Tool Developed for Automatic Diagnosis of Pes Planus," in 11th International May 19 Innovative Scientific Approaches Congress, Samsun, Turkey, 2024, pp. 303–311.
- [2] A. Azizov and Ö. Şevgin, "Pediatrik Pes Planus ve Fizyoterapi."
- [3] N. Katz, "The impact of pain management on quality of life," *J. Pain Symptom Manage.*, vol. 24, no. 1 Suppl, pp. S38–S47, Jan. 2002.
- [4] S. Erkuş and Ö. Kalenderer, "Pes planovalgus," *Totbid Dergisi*, vol. 16, pp. 413–425, 2017.
- [5] C. J. Lin, K. A. Lai, T. S. Kuan, and Y. L. Chou, "Correlating factors and clinical significance of flexible flatfoot in preschool children," *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 21, no. 3, pp. 378–382, 2001.

- [6] D. Bordin, G. De Giorgi, G. Mazzocco, and F. Rigon, "Flat and cavus foot, indexes of obesity and overweight in a population of primary-school children," *Minerva Pediatr.*, vol. 53, no. 1, pp. 7–13, 2001.
- [7] C. Wang et al., "An efficient local binary pattern based plantar pressure optical sensor image classification using convolutional neural networks," *Optik*, vol. 185, pp. 543–557, 2019.
- [8] Y. Kim and N. Kim, "Deep learning-based pes planus classification model using transfer learning," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, vol. 26, no. 4, pp. 21–28, 2021.
- [9] J. Y. Jung, C. M. Yang, and J. J. Kim, "Decision Tree-Based Foot Orthosis Prescription for Patients with Pes Planus," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 19, p. 12484, 2022. [Online]. Available: <http://www.journalwebsite.com> DOI: 10.3390/ijerph191912484.
- [10] J. Lauder et al., "A fully automatic system to assess foot collapse on lateral weight-bearing foot radiographs: A pilot study," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 213, p. 106507, 2022. DOI: 10.1016/j.cmpb.2022.106507.
- [11] S. M. Ryu et al., "Automated landmark identification for diagnosis of the deformity using a cascade convolutional neural network (FlatNet) on weight-bearing lateral radiographs of the foot," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 148, p. 105914, 2022. DOI: 10.1016/j.combiomed.2022.105914.
- [12] S. M. Ryu, K. Shin, S. W. Shin, S. Lee and N. Kim, "Enhancement of evaluating flatfoot on a weight-bearing lateral radiograph of the foot with U-Net based semantic segmentation on the long axis of tarsal and metatarsal bones in an active learning manner," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 145, p. 105400, 2022. DOI: 10.1016/j.combiomed.2022.105400.
- [13] Y. Gül, S. Yaman, D. Avcı, A. H. Çilengir, M. Balaban, and H. Güler, "A novel deep transfer learning-based approach for automated Pes Planus diagnosis using X-ray image," *Diagnostics*, vol. 13, no. 9, p. 1662, 2023. DOI: 10.3390/diagnostics13091662. Dataset from: <https://www.kaggle.com/datasets/suleyman32/pesplanu-s-two-class-dataset>
- [14] F. A. Alsaidi and K. M. Moria, "Flatfeet Severity-Level Detection Based on Alignment Measuring," *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8219, 2023. DOI: 10.3390/s23198219.
- [15] K. Doğan, T. Selçuk, and A. Yılmaz, "A Novel Model Based on CNN-ViT Fusion and Ensemble Learning for the Automatic Detection of Pes Planus," *Journal of Clinical Medicine*, vol. 13, no. 16, p. 4800, 2024. DOI: 10.3390/jcm13164800.
- [16] J. Redmon and A. Farhadi, "YOLO9000: better, faster, stronger," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 7263–7271.
- [17] M. Lin, "Network in network," arXiv preprint arXiv:1312.4400, 2013. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1312.4400>.
- [18] Z. Zhou, Y. Hu, Z. Zhu, and Y. Wang, "Fabric wrinkle objective evaluation model with random vector function link based on optimized artificial hummingbird algorithm," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 1, p. 2163026, 2023. DOI: 10.1080/15440478.2023.2163026.
- [19] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, "Densely connected convolutional networks," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 4700–4708.
- [20] V. Miglani and M. P. S. Bhatia, "Skin lesion classification: A transfer learning approach using efficientnets," in *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications*, Singapore, 2020, pp. 315–324.
- [21] A. Lumini and L. Nanni, "Deep learning and transfer learning features for plankton classification," *Ecological Informatics*, vol. 51, pp. 33–43, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2019.02.007.
- [22] H. Kumar, A. Virmani, S. Tripathi, R. Agrawal and S. Kumar, "Transfer learning and supervised machine learning approach for detection of skin cancer: performance analysis and comparison," *Transfer*, vol. 10, no. 1, 2021. DOI: 10.1007/s11203-021-00207-3.
- [23] M. B. Özküçük, Ö. F. Alçın and M. T. Gençoğlu, (2024). Transfer öğrenme yaklaşımı kullanılarak izolator kusurlarının tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 15(2), 323-330. DOI: 10.24012/dumf.1415322.
- [24] Z. Guo, Q. Chen, G. Wu, Y. Xu, R. Shibasaki, and X. Shao, "Village building identification based on ensemble convolutional neural networks," *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2487, 2017. DOI: 10.3390/s17112487.
- [25] Y. Zou, L. Wu, C. Zuo, L. Chen, B. Zhou, and H. Zhang, "White blood cell classification network using MobileNetv2 with multiscale feature extraction module and attention mechanism," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 99, p. 106820, 2025. DOI: 10.1016/j.bspc.2024.106820.
- [26] F. Arnia, K. Saddami, and K. Munadi, "Dcnnet: Noise-robust convolutional neural networks for degradation classification on ancient documents," *Journal of Imaging*, vol. 7, no. 7, p. 114, 2021. DOI: 10.3390/jimaging7070114.
- [27] A. Ciran, and E. Özbay, "Derin Öğrenme ve Özellik Seçimi Yaklaşımları Kullanılarak Göz Hastalıkları Tespiti," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 15, no. 2, pp. 421-433, 2024. DOI: 10.24012/dumf.1465929

- [28] S. Targ, D. Almeida, and K. Lyman, "Resnet in resnet: Generalizing residual architectures," arXiv preprint arXiv:1603.08029, 2016. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1603.08029>.
- [29] S. Keskin, O. Seveli, and E. Okatan, "Comparative analysis of the classification of recyclable wastes," *Journal of Scientific Reports-A*, vol. (055), pp. 70-79, 2023. DOI: 10.59313/jsr-a.1335276
- [30] S. Albahli, and T. Nazir, "AI-CenterNet CXR: An artificial intelligence (AI) enabled system for localization and classification of chest X-ray disease," *Frontiers in Medicine*, vol. 9, p. 955765, 2022. DOI: 10.3389/fmed.2022.955765.
- [31] A. Alan and M. Karabatak, "Veri seti-sınıflandırma ilişkisinde performansa etki eden faktörlerin değerlendirilmesi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 32, no. 2, pp. 531–540, 2020.
- [32] C. Hark, "Sahte haber tespiti için derin bağlamsal kelime gömümleri ve sinirsel ağların performans değerlendirmesi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 34, no. 2, pp. 733–742, 2022. DOI: 10.35234/fumbd.1126688
- [33] S. Çelik and Ö. Kasım, "Detection of tumor slice in brain magnetic resonance images by feature optimized transfer learning," *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 187–198, 2020. DOI: 10.29002/asujse.820599.
- [34] S. Akyol, M. Yıldırım, and B. Alataş, "Multi-feature fusion and improved BO and IGWO metaheuristics-based models for automatically diagnosing the sleep disorders from sleep sounds," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 157, p. 106768, 2023. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2023.106768.
- [35] Ö. B. Bilgen and N. Doğan, "Puanlayıcılar arası güvenilirlik belirleme tekniklerinin karşılaştırılması," *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*, vol. 8, no. 1, pp. 63–78, 2017. DOI: 10.21031/epod.294847.
- [36] N. W. S. Wardhani, M. Y. Rochayani, A. Iriany, A. D. Sulistyono, and P. Lestantyo, "Cross-validation metrics for evaluating classification performance on imbalanced data," 2019 International Conference on Computer, Control, Informatics, 2019.



A Novel Deep Feature Extraction Approach Based on DenseNet201 and ResNet50 for Cotton Leaf Disease Detection

Nursena BAYGIN^{1*}

¹ Erzurum Technical University, Computer Engineering Department, nursena.baygin@erzurum.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4457-5503

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 January 2025
Received in revised form 5 February 2025
Accepted 20 February 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Deep feature extraction, Cotton leaf diseases, Feature selection, Machine learning, Lightweight classification model

Doi: 10.24012/dumf.1614458

* Corresponding author

ABSTRACT

In this study, a new deep feature extraction approach is proposed for automatic detection of diseases observed on cotton plant leaves. In the proposed approach, feature extraction is performed using DenseNet201 and ResNet50 deep learning architectures. and the obtained feature vectors are combined. Then, the most informative features are selected with the Iterative Chi2 algorithm, and disease detection is performed using the Support Vector Machine (SVM) classifier. The developed model is tested on an open access dataset consisting of 2,137 cotton leaf images and 7 different classes (1 healthy, 6 diseased). 10-fold cross-validation and 80:20 hold-out cross-validation strategies are applied in the testing phase. As a result of the tests performed without using any data augmentation technique, 97.29% and 96.96% classification accuracies are obtained, respectively. The proposed approach makes significant contributions to the literature in terms of showing high success on the imbalanced dataset and providing a computationally lightweight architecture.

Introduction

Sustainable agriculture is among the areas where researchers are working intensively today. The efficient execution of the life cycle of agricultural products is of critical importance in terms of meeting the needs of the increasing population. The economic gains of countries are directly proportional to the quality and quantity of the products. In this context, the cotton plant is one of the products used in natural fiber production worldwide and provides significant contribution to the economy. Cotton, which is produced in approximately 100 countries, covers about 2.5% of the world's arable land [1].

Diseases in cotton leaves can reduce product productivity and cause economic losses. Traditionally, lesions in cotton leaves are evaluated by experts with the naked eye [2]. However, this method is time-consuming, costly and sometimes misleading. In terms of product productivity, monitoring large agricultural areas and detecting diseases quickly and accurately at low cost are of great importance [3-5]. Various approaches have been developed in the literature for the detection of these diseases, and methods such as image processing, machine learning and deep learning are frequently used among these approaches. When the diseases seen in cotton leaves are examined,

approximately 80-90% of these diseases consist of certain species. These are diseases such as Cercospora, Bacterial Blight, Red Spot, Ascochyta Blight, Target Spot, etc. [6-7]. Cotton plants are vulnerable to pathogens such as bacteria, viruses, and fungi. In a study conducted by Parashar et al., diseases occurring on cotton leaves were detected and labeled and divided into two classes as healthy and diseased. In this study, a Convolutional Neural Network (CNN) model was developed to improve cotton leaf diseases and the MobileNetV2 model was used to optimize it. With the 99.91% accuracy rate obtained, the proposed model has the potential to be compatible with mobile devices and is shown to be usable by farmers [8]. Artificial intelligence-based applications can help increase cotton production efficiency by detecting cotton leaf diseases early. In a study conducted by Islam et al., the performances of deep network architectures such as Xception, VGG-16, VGG-19, and Inception-V3 were examined using the transfer learning approach. As a result of the study, an accuracy rate of 98.70% was achieved, and this accuracy value was obtained with the Xception deep network architecture [9].

As a result, meeting the needs of sustainable agriculture and increasing population and maintaining environmental balance are of critical importance today. Studies carried out

on plants such as cotton and developed technological solutions have an important role in achieving these goals. The widespread use of artificial intelligence techniques in the agricultural sector will contribute to the creation of efficient, sustainable systems in the future. In this study, a new approach was proposed for the automatic detection of diseases occurring on the cotton plant, which is of critical importance today. With the proposed approach, a classification performance of over 96% was achieved on a six-class, unbalanced data.

Literature Survey

The use of machine learning for detecting cotton leaf diseases is an important factor in improving agricultural productivity. As seen in Table 1, when the studies in the literature are examined, it is seen that different machine learning techniques, especially deep learning models, have been developed to increase the diagnosis and accuracy rates of the disease.

Table 1. Recent studies on cotton leaf disease detection methods in the literature

Author (s) and Year	Dataset (s)	Disease	Method (s)	Result (s) (%)	Key Points
Azath M. et al. 2021 [10]	2400 image	4 class -Bacterial blight -Healthy -Leaf miner -Spider mite	CNN	Acc. = 96.4	-Detection of cotton leaf disease and pests -Feature extraction process -K-fold cross-validation -Unbalanced dataset
Chitranjan K. et al. 2023 [11]	2293 image	4 class -Diseased cotton leaf -Diseased cotton plant -Fresh cotton leaf -Fresh cotton plant	DCNN	Acc. = 97.98	-Identify and predict cotton plant disease -Data augmentation
Kaur A. et al. 2024 [12]	1711 image	4 class -Bacterial blight -Curl virus -Fusarium wilt -Healthy	VGG16	Acc. = 95.5	-Disease management of cotton crops -Small sample size -Data augmentation
Kukadiya H. et al. 2024 [13]		4 class -Bacterial blight -Curl virus -Fusarium wilt -Healthy	VGG16 InceptionV3 DCNN	Acc. = 98	-Early detection of diseases affecting cotton leaves -Small size dataset
Kavinandhan B. et al. 2024 [14]	1786 image	4 class -Bacterial blight, -Curl virus, -Fusarium wilt -Healthy	DCGAN InceptionV3 VGG16 ResNet 50 MobileNet V2	Acc. = 99	-Automated computer vision detection for cotton leaf diseases -Unbalanced dataset -Data augmentation

CNN					
Rai K. C. et al. 2024 [15]	1700 image	2 class -Diseased cotton plant -Fresh cotton plants	InceptionV3, InceptionResNetV2 VGG16 MobileNet	Acc. = 99.48	-Detection and classification of diseased cotton leaves and plants -Data augmentation
		4 class -Blight -Curl -Healthy -Wilt	Xception		
Saleh A. et al. 2024 [16]	2293 image	4 class -Cotton leaf, diseased -Cotton plant, -Fresh cotton leaf, -Fresh cotton plant	SVM-VGG16 MobileNet	Acc. = 91 Acc. = 99	-Detection cotton diseases before they spread to crops -Data augmentation

When the studies given in Table 1 are examined, it is seen that these studies generally focus on 4 classes [10,13]. In addition, the majority of the studies use data augmentation methods [11,14-16]. The most important reason for this situation is that data sets are generally small in size [12], have an unbalanced distribution [10,14] and artificial intelligence methods require a large amount of data. The aim of this study is to eliminate all these deficiencies. In this context, it is aimed to classify an unbalanced data set without using any data augmentation technique. A multi-class, unbalanced data set was classified with the developed model and a classification result of over 96% was obtained.

Literature Gap

Some literature gaps observed as a result of the literature studies given in Table 1 are listed below:

- Methods performed in the literature on image classification generally use deep learning approaches. However, these studies generally prefer the end-to-end training solution.
- Deep learning approaches require a lot of data and a balanced data set due to their structure. For this reason, researchers generally need methods such as data augmentation and balance the data set with this approach.
- Since researchers generally use the end-to-end training approach, the computational complexity of these architectures is quite high.

This study aimed to fill the literature gaps listed above. In this context, an open access data set was used and the classification process was performed directly on the data set without any preprocessing.

Motivation and Proposed Model

In this study, a new machine learning approach has been developed for automatic detection of diseases occurring in cotton plants. The developed architecture was tested on an open access cotton leaf disease dataset and a classification accuracy of over 96% was achieved. The dataset used in the study has 7 classes and is basically unbalanced. The researchers who shared the dataset applied data augmentation techniques to balance the dataset. However, in this study, the classification process was performed using only raw leaf images.

Deep feature extraction was achieved in the study using the transfer learning approach. For this process, some pre-trained deep network architectures were tested and the two deep network architectures with the highest performance were preferred. Later, the feature vector was obtained using the fully connected and pooling layers of these networks. The feature selection algorithm was applied to reduce the size of the obtained feature vector and to reduce the computational complexity of the architecture. In this step where the Iterative Chi2 method was preferred, the optimum number of features was selected and thus the selected feature vector was obtained. In the last stage of the system, the SVM method [17], a well-known classification algorithm in the literature, was preferred. An accuracy value of over 96%

was achieved with the SVM algorithm, which is basically a lightweight classification approach.

Although DenseNet201 and ResNet50 are deep learning architectures with high computational complexity, our approach does not perform end-to-end training. Instead, we use these networks in a transfer learning manner, extracting feature vectors from pre-trained models. This significantly reduces the computational burden compared to full model training. Additionally, by employing feature selection using the Iterative Chi2 algorithm, we minimize the number of features processed in the classification phase, making our model more efficient. The feature selection step reduces the final input size to the classifier, thereby improving both inference speed and memory efficiency.

Dataset

In this study, two open-access datasets for cotton leaf disease detection were utilized to enhance the robustness and generalizability of the proposed model. The first dataset was obtained from the National Cotton Research Institute field in Gazipur, Bangladesh, while the second dataset was collected from cotton fields in India. These datasets contain images of cotton leaves affected by various diseases, as well as healthy leaves, captured under different environmental conditions.

The first dataset consists of a total of 2137 original images, which are divided into 7 different classes:

bacterial blight, curl virus, herbicide growth damage, leaf hopper jassids, leaf reddening, leaf variegation, and healthy leaves [18]. The images were systematically collected over the course of approximately one year using a Redmi Note 11s model smartphone under varying lighting conditions. Additionally, the dataset contains 7000 augmented images created through data augmentation techniques. However, in this study, only the original images were used, and the augmented images were excluded to evaluate the classification performance on raw data. The images corresponding to the first dataset are shown in Figure 1.

The second dataset comprises 980 images of cotton leaves affected by various diseases, as well as healthy leaves. The images are meticulously organized into different disease categories and collected under diverse environmental conditions to improve the robustness of machine learning models. Similar to the first dataset, this dataset also exhibits an imbalanced distribution, with certain disease categories having significantly fewer images than others. The dataset includes images of healthy cotton leaves, as well as leaves affected by bacterial blight, fusarium wilt, and curl virus. The images corresponding to the second dataset are shown in Figure 2. By incorporating two datasets from different geographical regions, this study aims to improve the generalization ability of the model and evaluate its robustness against varying environmental factors.

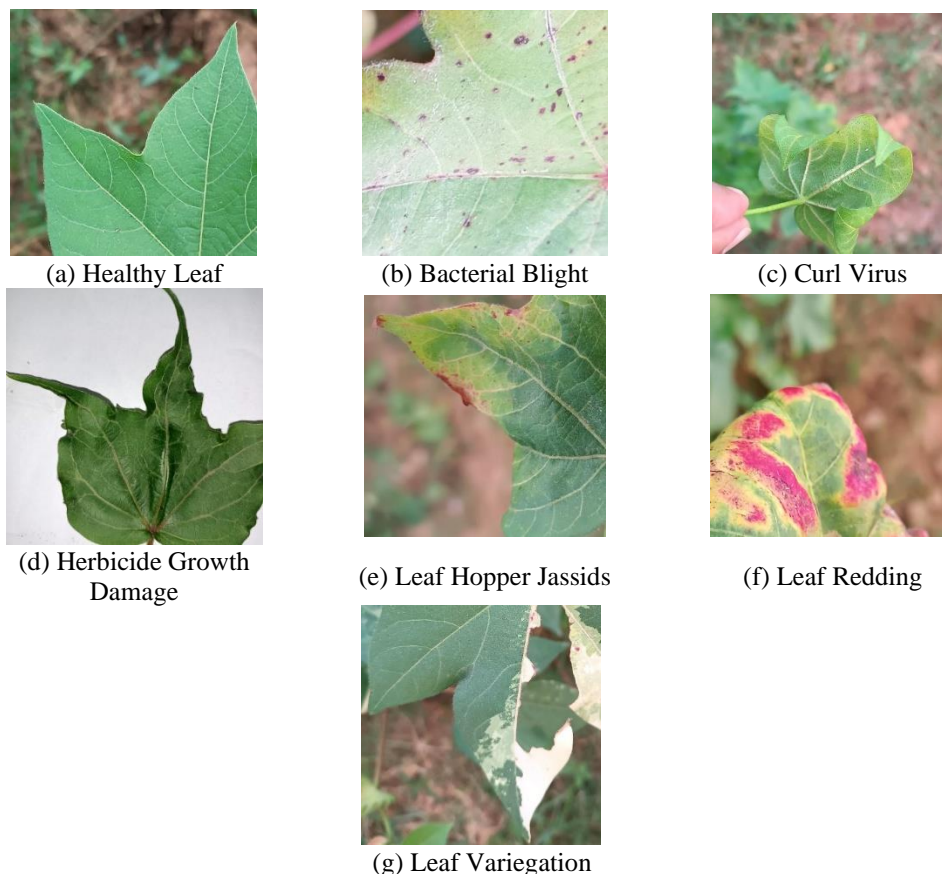
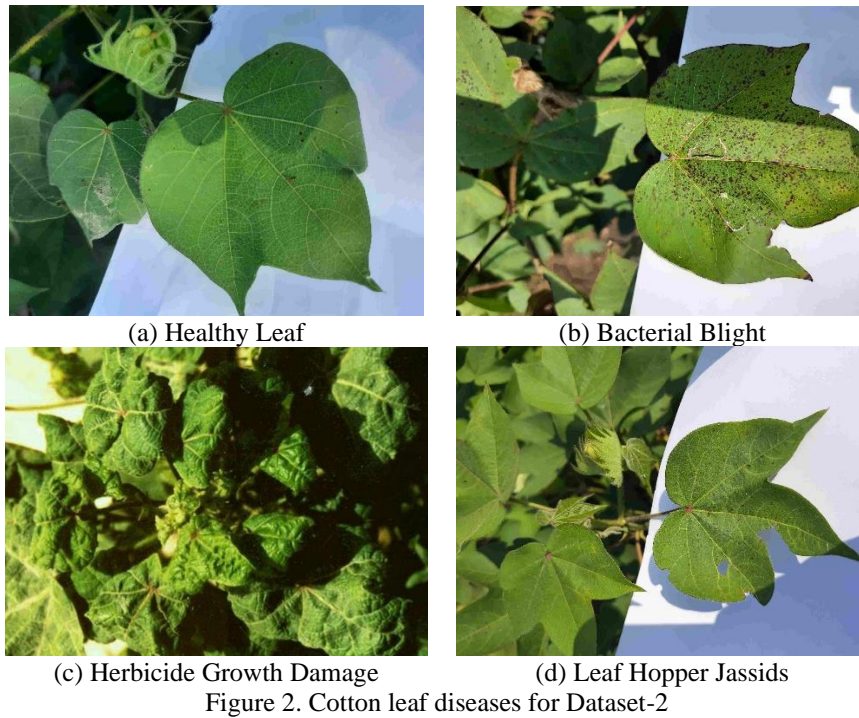


Figure 1. Cotton leaf diseases for Dataset-1



Proposed Method

In this study, a new deep feature extraction approach is proposed for automatic identification and classification of cotton leaf disease. The deep feature extraction-based architecture developed for this unbalanced dataset, where

no data augmentation method is applied, is given in Figure 3.

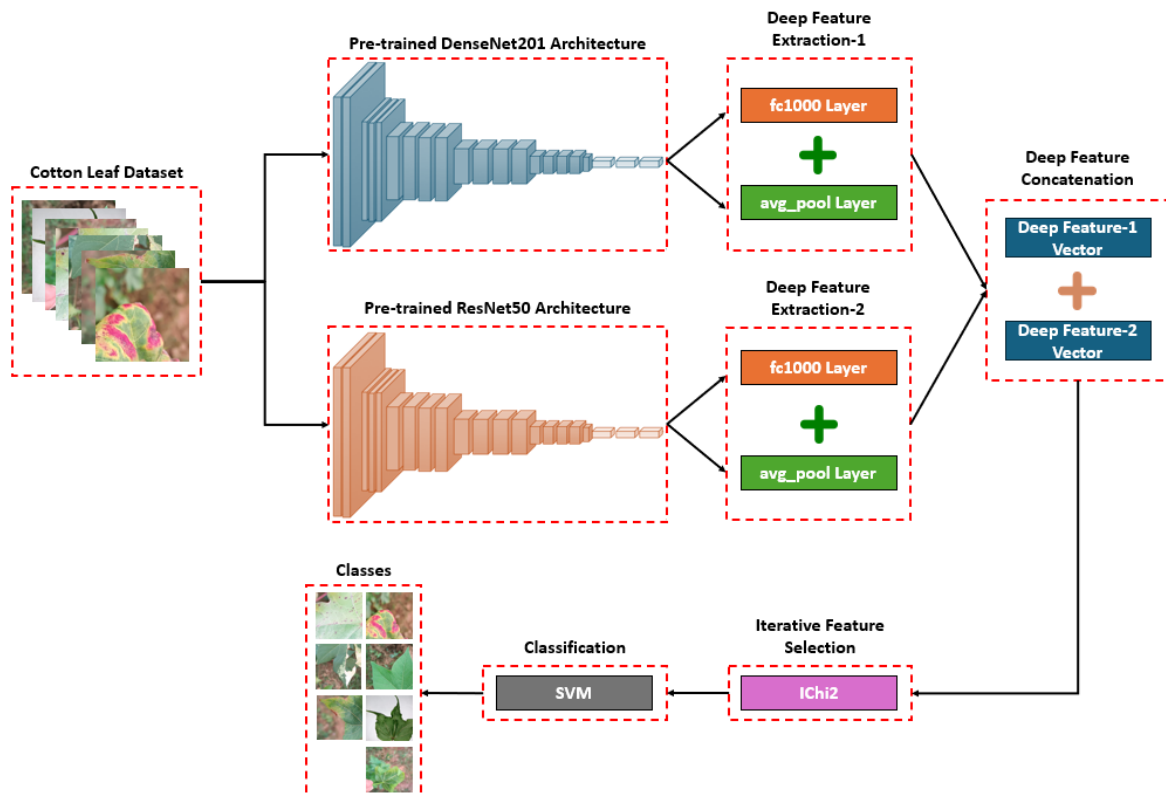


Figure 3. DenseNet201 [19] and ResNet50 [20] based deep feature extraction

As given in Figure 3, the system first takes the cotton leaf dataset as input. Then, it gives these images as input to both deep network architectures. In this phase, pre-trained networks are used and deep feature extraction is performed. In this way, instead of end-to-end training, previously determined weights of the networks are used and an approach with lower computational complexity is obtained. In this phase, features are extracted using the last fully connected layers and the last pooling layers of the networks. After this phase, the feature vectors obtained using both networks are combined and a feature vector representing the performance of both networks is obtained. In the next phase of the system, feature selection is performed using the iterative Chi2 algorithm. The most informative features are selected with this method. The reason for using the iterative approach is to determine the optimum number of feature vectors. The

selected features in this phase are given as input to SVM [17], a shallow classifier. The selected feature vectors are classified with the SVM algorithm and the estimated values are obtained. These steps are explained in detail in the subsections.

Feature Extraction and Concatenation

The most important phase of the developed architecture is features extraction. In this phase, where the deep feature extraction approach is adopted, feature extraction is performed using the final pooling and fully connected layers of DenseNet201[19] and ResNet50 [20] architectures. In this context, the pseudo codes of DenseNet201 and ResNet50 architectures are given in Algorithms 1 and 2, respectively.

Algorithm 1. Pseudocode of DenseNet201 Architecture

No	DenseNet201 Architecture
1:	def DenseNet201():
2:	x = Conv(64, 7x7, stride=2) # Initial Conv
3:	x = MaxPool(3x3, stride=2) # Initial Pool
4:	# Dense Blocks with Transition Layers
5:	for layers, growth_rate in [(6, 32), (12, 32), (48, 32), (32, 32)]:
6:	x = DenseBlock(x, layers, growth_rate)
7:	if layers != 32: # No transition after the last DenseBlock
8:	x = TransitionLayer(x, 0.5)
9:	# Classification
10:	x = GlobalAvgPool(x) # Global Average Pooling
11:	x = FullyConnected(x, num_classes, activation=softmax) # Fully Connected Layer
12:	return x
13:	def DenseBlock(x, layers, growth_rate):
14:	for _ in range(layers):
15:	x = Concatenate([x, Conv(growth_rate, 3x3, padding=same, activation=ReLU, batch_norm=True)])
16:	return x
17:	def TransitionLayer(x, reduction):
18:	return AvgPool(Conv(int(x.filters * reduction), 1x1, activation=ReLU, batch_norm=True), 2x2, stride=2)
19:	def FullyConnected(x, units, activation):
20:	return Dense(x, units, activation=activation)

Algorithm 2. Pseudocode of ResNet50 Architecture

No	ResNet50 Architecture
1:	def ResNet50():
2:	x = Conv(64, 7x7, stride=2, activation=ReLU, batch_norm=True) # Initial Conv
3:	x = MaxPool(3x3, stride=2) # Initial Pool
4:	# Residual Blocks
5:	for filters, blocks, strides in [(64, 3, 1), (128, 4, 2), (256, 6, 2), (512, 3, 2)]:
6:	x = ResidualGroup(x, filters, blocks, strides)
7:	# Classification
8:	x = GlobalAvgPool(x)
9:	return FullyConnected(x, num_classes, activation=softmax)
10:	def ResidualGroup(x, filters, blocks, strides):
11:	x = ResidualBlock(x, filters, strides) # First block with downsampling
12:	for _ in range(1, blocks):
13:	x = ResidualBlock(x, filters) # Remaining blocks
14:	return x
15:	def ResidualBlock(x, filters, strides=1):
16:	shortcut = Conv(filters * 4, 1x1, stride=strides, batch_norm=True) if strides > 1 or x.filters != filters * 4 else x

```

17: x = Conv(filters, 1x1, stride=strides, activation=ReLU, batch_norm=True)
18: x = Conv(filters, 3x3, activation=ReLU, batch_norm=True)
19: x = Conv(filters * 4, 1x1, batch_norm=True)
20: return ReLU(Add(x, shortcut))
21: def FullyConnected(x, units, activation):
22: return Dense(x, units, activation=activation)

```

The developed model performs deep feature extraction using two pre-trained networks. These networks are DenseNet201 and ResNet50 architectures, respectively. In the feature generation phase, features are extracted using the final pooling and fully connected layer. The system uses the “fc1000” and “avg_pool” layers of the DenseNet201 architecture. These layers represent the fully connected and pooling layers, respectively. Again, 1000 and 1920 features are produced from these layers, respectively. In this way, a feature vector of 2920 (=1000+1920) length is obtained per image in total using the DenseNet201 architecture. A similar situation is valid

for the ResNet50 architecture, and features are produced from the “fc1000” and “avg_pool” layers in this architecture. Similar to the DenseNet201 architecture, 1000 and 1920 features are produced from these layers, respectively, and thus a feature vector of 2920 (=1000+1920) length is obtained. In the next stage of the architecture, the feature vectors obtained using both deep networks are combined and a new feature vector of 5840 (=2920 from DenseNet201 + 2920 from ResNet50) length is provided, which uses the power of the two networks. A block diagram summarizing these process steps is given in Figure 4.

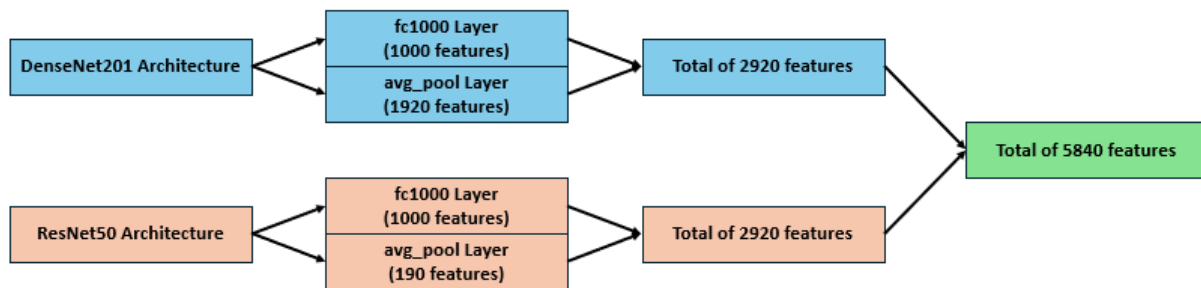


Figure 4. Deep features extraction and features concatenation

As given in Figure 4, the system uses two separate pre-trained deep network architectures to extract features from final pooling (avg_pool) and fully connected layers (fc1000). Then, 2920 features are produced by each network and these produced features are combined to obtain a new feature vector with a total length of 5840.

Feature Selection

Iterative Chi2 (IChi2) [21] algorithm is an advanced version of Chi2 algorithm which is frequently used in literature. With this method, the most informative features are selected iteratively. The algorithm takes the

generated deep features and prediction values as input. Then, the weights of all features are determined using Chi2 algorithm and the features are ranked according to these weight values. After this process, the features are selected and classified iteratively in order. The point where the highest classification accuracy is obtained is determined as the optimum number of features. kNN algorithm is used as classifier in IChi2 algorithm. The selected features are classified with this method in each iteration and the number of features for which the highest classification result is calculated is determined. The pseudo code of IChi2 algorithm used to select the most informative features in the developed architecture is given in Algorithm 3.

Algorithm 3. Iterative Chi2 approach

No	IChi2 procedures
1:	def IterativeChi2(data, target, max_features):
2:	# Step 1: Initialize variables
3:	index = FeatureSelector(data, target) # Qualified feature indices
4:	selected_features = []
5:	# Step 2: Iteratively select features
6:	for i in range(max_features):
7:	losses = []
8:	for j in index:
9:	temp_features = selected_features + [data[:, j]]
10:	loss = ComputeLoss(temp_features, target)

```
11:     losses.append(loss)
12:     # Step 3: Select feature with minimum loss
13:     min_loss_index = ArgMin(losses)
14:     selected_features.append(data[:, index[min_loss_index]])
15:     index.remove(index[min_loss_index])
16:     # Step 4: Return final selected features
17:     return selected_features
18: def FeatureSelector(data, target):
19:     # Implement feature selection logic based on Chi2 criteria
20:     return QualifiedIndices(data, target)
21: def ComputeLoss(features, target):
22:     # Calculate the loss value for the selected feature vector
23:     return LossFunction(features, target)
24: def ArgMin(values):
25:     # Find the index of the minimum value in the list
26:     return values.index(min(values))
```

Classification

The last phase of the developed model is classification. For this process, a shallow classifier, the SVM [17] algorithm, was used. In this algorithm, which works very well on high-dimensional data sets, the 3rd degree polynomial kernel (Cubic SVM) was preferred. Two different strategies were applied to verify the developed model. These are 10-fold CV and hold-out (80:20) CV techniques, respectively.

Experimental Results and Discussion

Experimental Setup

The model developed in this research consists of three main phases. These phases are deep feature extraction, iterative feature selection and classification, respectively. DenseNet201[19] and ResNet50 [20] architectures were used for deep feature extraction. Feature extraction was provided from these pre-trained networks through transfer learning. Feature vectors were obtained using the last fully connected layer and the last pooling layers. In the feature selection phase of the model, the IChi2 [21] algorithm, an advanced version of the Chi2 method, was used. In the last phase of the architecture, the SVM [17] algorithm, a well-known method in the literature, was preferred.

The developed model was coded on the MATLAB 2021b platform. In addition, the MATLAB Classification Learner Toolbox was used for the classification process. The model was developed on a basic server and no GPU card was used. All operations were carried out on the CPU. The computer used in the test process has an Intel Xeon 2.7 GHz processor, 256 GB RAM and 500 GB hard disk, respectively, and there is no GPU card among the hardware. In the testing phase of the model, 10-fold CV and 80:20 hold-out CV strategies were applied. To evaluate the classification performance of the model, accuracy, precision, recall and F1-Score values were calculated. In order to calculate these values, a confusion matrix was created for each validation strategy.

Results

The developed model was tested on a dataset consisting of 7 classes and containing open access images of cotton plant diseases. In the test phase, 10-fold and 80:20 hold-out CV strategies were applied. Confusion matrix was calculated for both strategies and performance metric values were determined using this matrix. Confusion matrices calculated for 10-fold and 80:20 hold-out CV techniques as a result of the test processes are given in Figure 5.

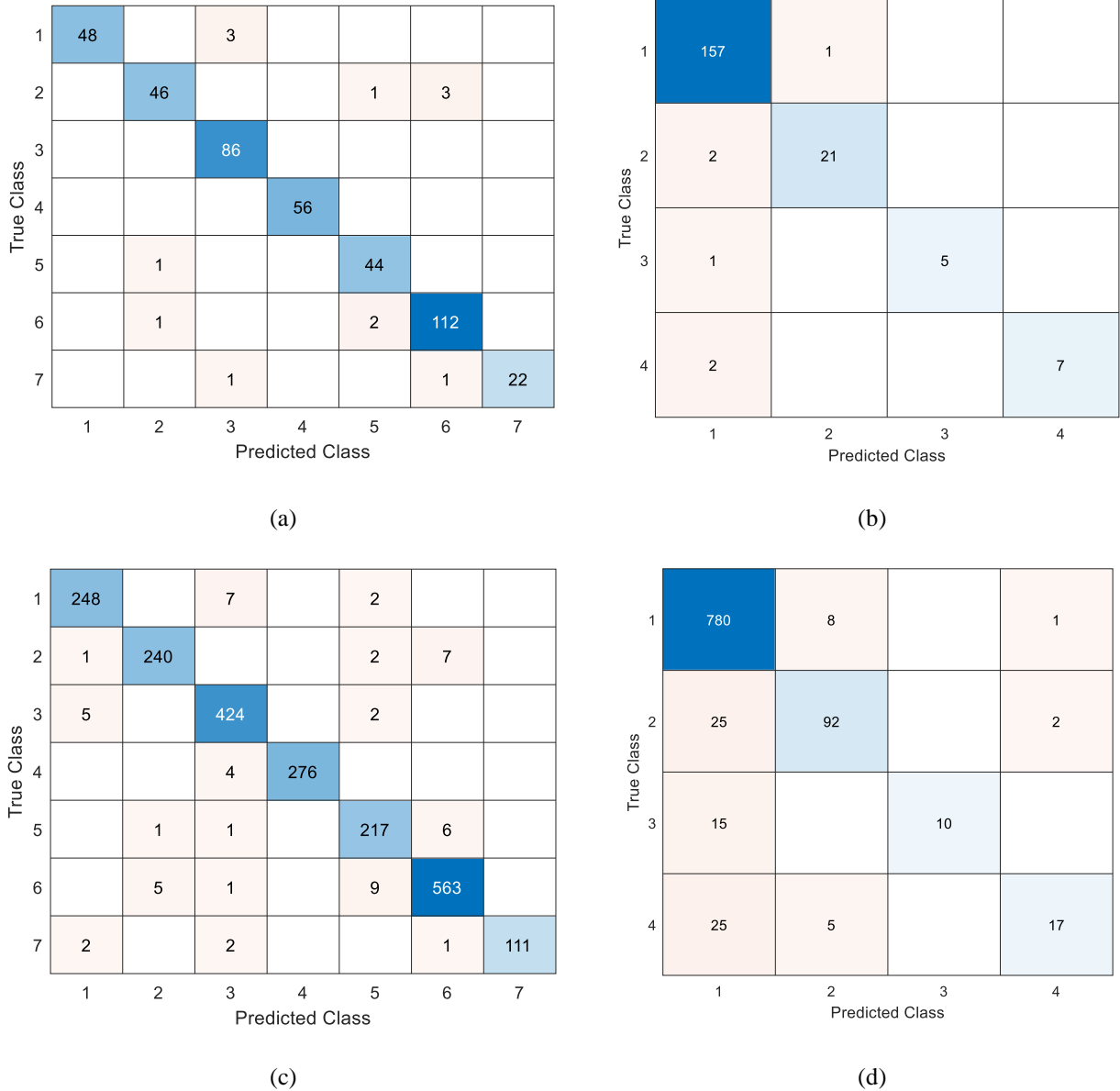


Figure 5. Confusion matrices obtained as a result of the test operations (a) 80:20 hold-out CV for Dataset-1 (b) 80:20 hold-out CV for Dataset-2 (c) 10-fold CV for Dataset-1 (d) 10-fold CV for Dataset-2

Confusion matrices obtained for both verification techniques are given in Figure 5. The classes in these matrices (Figure 4-(a) and (c)) are as follows: 1- Healthy Leaf, 2- Bacterial Blight, 3- Curl Virus, 4- Herbicide Growth Damage, 5- Leaf Hopper Jassids, 6- Leaf Redding and 7- Leaf Variegation (for Dataset-1). In

addition, for Dataset-2, classes are as follows: 1- Healthy Leaf, 2- Bacterial Blight, 3- Curl Virus and 4- Fussyrium Wilt, respectively. In this context, the performance metric values calculated using the matrices given in Figure 4 are given in Table 2.

Table 2. Performance metric values

Metric	80:20 Hold-out CV	10-fold CV	80:20 Hold-out CV	10-fold CV
Accuracy	96.96	97.29	96.94	91.73
Average Precision	97.37	97.45	98.09	91.23
Unweighted Average Recall	96.14	97.00	87.95	63.09
Average F1 Score	96.69	97.21	92.47	71.38
Geometric Mean	96.08	96.99	87.57	57.67

When the results given in Table 2 are examined, it is seen that the developed method reaches an accuracy value higher than 96% on both verification techniques for Dataset-1. In addition, this situation is valid for all metric values. When the similar situation is analyzed for Dataset-2, it is seen that the accuracy values are 96.94% and 91.73% for 80:20 hold-out CV and 10-fold CV, respectively. The obtained results show that the proposed method can classify cotton plant diseases with high accuracy. Both of the open access datasets used in this research have an unbalanced distribution and contains a limited amount of raw images. However, the developed model has managed to overcome all these problems.

Discussion

The dataset used in the study is shared as open access and basically contains 2137 images. This dataset, which contains images of disease types of cotton plants, has 7 classes including healthy class images. These classes are Healthy Leaf, Bacterial Blight, Curl Virus, Herbicide Growth Damage, Leaf Hopper Jassids, Leaf Redding and Leaf Variegation, respectively. In this context, the comparison results with other studies using the same dataset are given in Table 3.

Table 3. Comparison results (for Dataset-1)

Author(s) and Year	Dataset	Method	Validation	Result(s)
Bishshash et al., 2024	7000 augmented images, 7 class	Data augmentation and Inception V3	80:20 hold-out CV	Acc.=96.03
Our Method	2137 raw images, 7 class	DenseNet201, ResNet50, IChi2, SVM	80:20 hold-out CV	Acc.=96.96
				APre.=97.37
			UAR.=96.14	
			AF1.=96.69	
10-fold CV	Gm.=96.08			
	Acc.=97.29			
	APre.=97.45			
10-fold CV	UAR.=97.00			
	AF1.=97.21			
				Gm.=96.99

*Acc.=Accuracy, APre.=Average Precision, UAR.=Unweighted Average Recall, AF1.=Average F1 Score, Gm.=Geometric Mean

The studies given in Table 3 are the studies that used the same dataset as the dataset used in this research. As can be seen from the table, Bishhash et al. [18] applied only the 80:20 hold-out CV strategy as the verification technique. Two different verification techniques were used in our research, and the classification performance in both approaches was higher than the other research. In addition, Bishhash et al. [18] trained the InceptionV3 architecture they used in their research end-to-end. Deep learning architectures need a lot of data to perform well. For this reason, the data augmentation approach was used in their research, and thus both the number of images was increased and a balanced dataset was obtained. In our research, the raw image dataset was used directly without using any data augmentation approach. Despite this situation, high classification success was achieved in all

performance metric values. As stated in other sections, the IChi2 [21] approach was used in this study, and thus the most informative features were selected. An advanced version of the Chi2 algorithm was used in the feature selection procedure. This approach, called Iterative Chi2, aims to determine the optimum number of features to be selected. In the test operations performed, the IChi2 algorithm selected a total of 788 features from the feature vector of length 5840. In the process of selecting the feature vector, the iteration range was determined to be between 100-1000. In other words, the first 100 features with the highest weight were directly selected and then the remaining features were tested iteratively to determine the optimum point. A graph of this test operation is given in Figure 6.

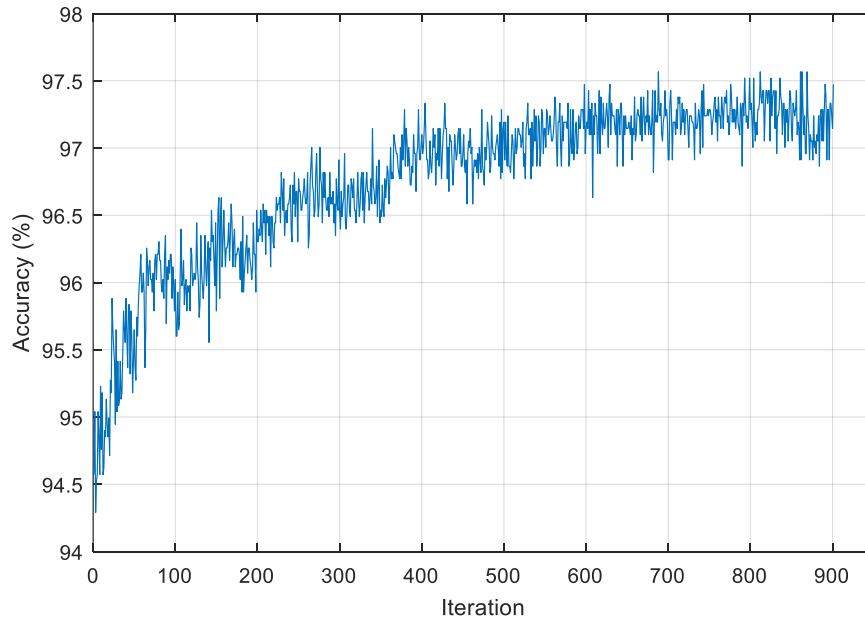


Figure 6. Changes in the classification accuracies obtained with the IChi2 [21] method

As given in Figure 6, the developed model showed an increase from 94% to approximately 97%. In the test process given here, the 10-fold CV method was used as a verification technique and a total of 788 features were selected according to the accuracy values obtained in

Figure 6. In the last test phase of the model, classification algorithms were considered. At this stage, Decision Tree (DT), SVM, kNN and Neural Network (NN) algorithms were tested respectively. The results of this test process are as given in Figure 7.

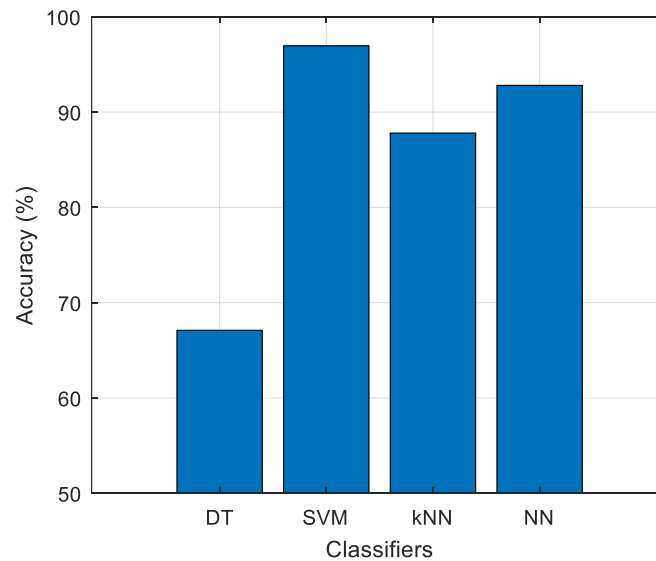


Figure 7. Performance of classification algorithms on the Dataset-1

As given in Figure 7, the highest classification accuracy was obtained with the SVM algorithm, and the results given in this graph were obtained by applying the 10-fold CV strategy. In this test process, where a total of 788 features were classified, the lowest accuracy value of 67.1% was obtained with the DT algorithm.

The proposed model is particularly designed to address computational efficiency concerns by avoiding full model training and instead leveraging pre-trained deep networks for feature extraction. This approach is computationally much lighter compared to fine-tuning or training a deep model from scratch. Additionally, after

feature extraction, the feature selection process further optimizes the model by reducing the number of dimensions fed into the classifier. To evaluate the feasibility of real-time applications, the inference time per image was measured, showing that the feature extraction and classification pipeline can process an image in approximately 2.75 seconds on a standard CPU configuration. This demonstrates that the model can be adapted for real-world applications with further optimizations, such as hardware acceleration via GPUs or edge AI solutions. To further evaluate the effectiveness of the proposed approach, additional

experiments were conducted using DenseNet201 and ResNet50 separately, without deep feature concatenation. In these scenarios, deep features were extracted from each network individually, followed by feature selection with the IChi2 algorithm and classification using the SVM classifier. This experiment

was designed to determine whether the integration of DenseNet201 and ResNet50 significantly contributes to classification performance or if a single network is sufficient for accurate disease detection. The comparative results of these experiments are presented in Figure 8.

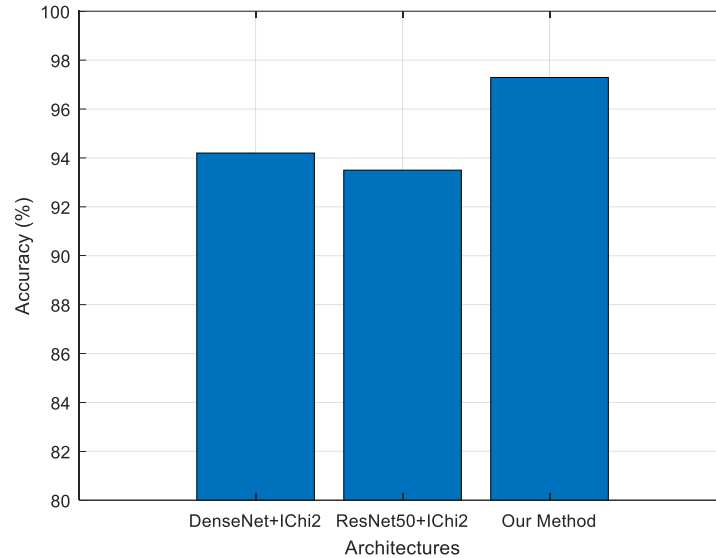


Figure 8. Performance of classification algorithms on the Dataset

As shown in the figure, DenseNet201 alone achieved an accuracy of approximately 94.2%, while ResNet50 alone reached 93.5%. Although both architectures performed well individually, their accuracy was notably lower than the 97.29% achieved when using their combined feature representations. This highlights the complementary nature of the features extracted from both networks, reinforcing that their integration enables a more comprehensive and discriminative feature representation. Furthermore, despite the datasets being imbalanced and no data augmentation being applied, the proposed approach successfully achieved high accuracy across both datasets. These findings confirm that the combination of deep feature extraction and feature selection plays a critical role in maximizing classification performance while maintaining computational efficiency.

One of the key contributions of this study is demonstrating that high classification accuracy can be achieved without the use of data augmentation techniques. Although data augmentation is commonly employed to balance datasets and improve model performance, the proposed approach successfully classified imbalanced datasets from two different regions with high accuracy rates, achieving over 97% classification success. This result is particularly significant as it shows that the method can effectively extract discriminative features without artificially increasing the number of training samples.

The fact that both datasets were imbalanced yet still yielded high classification performance further

emphasizes the strength of the proposed model. Instead of relying on data augmentation, this study focused on feature selection and efficient model design to enhance classification performance. This approach ensures that the model is not overly dependent on synthetic data generation and can generalize well to real-world scenarios. The ability to classify raw images with high accuracy is a valuable outcome, as it demonstrates the potential for real-world applicability without the need for complex preprocessing techniques.

Conclusion

Ensuring continuity in the agricultural sector is a very important issue for today's world. In particular, it is necessary to use scientific approaches to protect the ecological balance, obtain high-yield products and transfer soils efficiently to future generations. Today, artificial intelligence technologies are actively used by many different disciplines and very successful results are obtained. In this study, it was aimed to detect the diseases of the cotton plant, which has a very important place among agricultural plants.

Within the scope of this research, two open-access datasets were tested with the developed model, and multi-class classification was performed. The first dataset consists of 7 classes, including 1 healthy and 6 diseased categories, and contains a total of 2137 images collected using a simple phone camera. Similarly, the second dataset includes 980 images, covering both healthy and diseased cotton leaves with an imbalanced class distribution. The images in both datasets were collected under diverse environmental conditions to

enhance model robustness. With the proposed architecture, deep feature extraction was performed on these datasets, and classification was conducted using the SVM algorithm. The developed model was designed within a lightweight framework, avoiding computationally expensive end-to-end training. As artificial intelligence-based methods typically require large amounts of data for optimal performance, this study aimed to classify raw images without applying any data augmentation techniques. Despite the challenges posed by imbalanced datasets, the proposed approach successfully achieved classification accuracy exceeding 97%. The results obtained in this research demonstrate that the developed method can be effectively utilized for detecting cotton plant diseases across different datasets and environmental conditions.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

Ethics committee approval is not required for this study. The author declares that there is no conflict of interest with any person/institution in the prepared article.

Authors' Contributions

The author designed the model and processes, created the analysis methods, developed the software code to implement the processes, performed the tests, evaluated the results and contributed to manuscript preparation.

References

- [1] R. F. Caldeira, W. E. Santiago, and B. Teruel, "Identification of cotton leaf lesions using deep learning techniques," *Sensors*, vol. 21, no. 9, 2021, doi: 10.3390/s21093169.
- [2] P. R. Rothe and R. V. Kshirsagar, "Cotton leaf disease identification using pattern recognition techniques," *2015 Int. Conf. Pervasive Comput. Adv. Commun. Technol. Appl. Soc. ICPC 2015*, vol. 00, no. c, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1109/PERVASIVE.2015.7086983.
- [3] B.-A. S. Bashish Al Dheeb, Braik Malik, "Detection and Classification of Leaf Diseases using K-means-based Segmentation and Neural-networks-based Classification," vol. 10, 2011.
- [4] T. Rumpf, A. K. Mahlein, U. Steiner, E. C. Oerke, H. W. Dehne, and L. Plümer, "Early detection and classification of plant diseases with Support Vector Machines based on hyperspectral reflectance," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 74, no. 1, pp. 91–99, 2010, doi: 10.1016/j.compag.2010.06.009.
- [5] C. Hillnhütter and A. K. Mahlein, "Neue Ansätze zur frühzeitigen Erkennung und Lokalisierung von Zuckerrübenkrankheiten," *Gesunde Pflanz.*, vol. 60, no. 4, pp. 143–149, 2008, doi: 10.1007/s10343-008-0196-0.
- [6] A. Jenifa, R. Ramalakshmi, and V. Ramachandran, "Cotton Leaf Disease Classification using Deep Convolution Neural Network for Sustainable Cotton Production," *2019 Int. Conf. Clean Energy Energy Effic. Electron. Circuit Sustain. Dev. INCCES 2019*, pp. 19–21, 2019, doi: 10.1109/INCCES47820.2019.9167715.
- [7] B. S. Prajapati, V. K. Dabhi, and H. B. Prajapati, "A survey on detection and classification of cotton leaf diseases," *Int. Conf. Electr. Electron. Optim. Tech. ICEEOT 2016*, pp. 2499–2506, 2016, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755143.
- [8] N. Parashar and P. Johri, "Deep Learning for Cotton Leaf Disease Detection," *Proc. - 2nd IEEE Int. Conf. Device Intell. Comput. Commun. Technol. DICCT 2024*, no. DI, pp. 158–162, 2024, doi: 10.1109/DICCT61038.2024.10533021.
- [9] M. M. Islam *et al.*, "A deep learning model for cotton disease prediction using fine-tuning with smart web application in agriculture," *Intell. Syst. with Appl.*, vol. 20, no. January, p. 200278, 2023, doi: 10.1016/j.iswa.2023.200278.
- [10] M. Azath, M. Zekiwos, and A. Bruck, "Deep Learning-Based Image Processing for Cotton Leaf Disease and Pest Diagnosis," *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9981437.
- [11] C. K. Rai and R. Pahuja, "Classification of Diseased Cotton Leaves and Plants Using Improved Deep Convolutional Neural Network," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 16, pp. 25307–25325, 2023, doi: 10.1007/s11042-023-14933-w.
- [12] A. Kaur, V. Kukreja, M. Kumar, A. Choudhary, and R. Sharma, "A Fine-tuned Deep Learning-based VGG16 Model for Cotton Leaf Disease Classification," *2024 5th Int. Conf. Emerg. Technol. INCET 2024*, pp. 1–6, 2024, doi: 10.1109/INCET61516.2024.10593164.
- [13] H. Kukadiya, N. Arora, D. Meva, and S. Srivastava, "An ensemble deep learning model for automatic classification of cotton leaves diseases," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 33, no. 3, pp. 1942–1949, 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v33.i3.pp1942-1949.
- [14] B. Kavinandhan, R. Pranav, and M. Ganesan, "A Hybrid Approach for Cotton Leaf Disease Detection using DCGAN and Diverse CNN Models," *2024 5th Int. Conf. Innov. Trends Inf. Technol. ICITIIT 2024*, pp. 1–8, 2024, doi: 10.1109/ICITIIT61487.2024.10580758.

- [15] C. K. Rai and R. Pahuja, *An ensemble transfer learning-based deep convolution neural network for the detection and classification of diseased cotton leaves and plants*, no. 0123456789. Springer US, 2024. doi: 10.1007/s11042-024-18963-w.
- [16] A. Saleh *et al.*, “Machine Learning-based classification of cotton diseases using mobilenet and Support Vector Machine,” *2024 Int. Telecommun. Conf. ITC-Egypt 2024*, pp. 165–171, 2024, doi: 10.1109/ITC-Egypt61547.2024.10620532.
- [17] W. S. Noble, “What is a support vector machine?,” *Nat. Biotechnol.*, vol. 24, no. 12, pp. 1565–1567, 2006.
- [18] P. Bishshash, M. A. S. Nirob, M. H. Shikder, M. A. H. Sarower, D. T. Bhuiyan, and S. R. H. Noori, “A Comprehensive Cotton Leaf Disease Dataset for Enhanced Detection and Classification,” *Data Br.*, vol. 57, p. 110913, 2024, doi: 10.1016/j.dib.2024.110913.
- [19] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, “Densely connected convolutional networks,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 4700–4708.
- [20] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770–778.
- [21] M. Erten and T. Tuncer, “Automated differential diagnosis method for iron deficiency anemia and beta thalassemia trait based on iterative Chi2 feature selector,” *Int. J. Lab. Hematol.*, vol. 44, no. 2, pp. 430–436, 2022.



Experimental Investigation of Roughness Transfer Behavior of AA2024-T3 Aluminum Alloys in Cold Rolling

Batuhan ÖZAKIN^{1*}, Kürşat GÜLTEKİN²

¹ Samsun University, Mechanical Engineering Department, batuhan.ozakin@samsun.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1754-949X

² Ondokuz Mayıs University, Mechanical Engineering Department, kursat.gultekin@omu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6790-6822

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 August 2024
Received in revised form 3 February 2025
Accepted 6 February 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Skin-pass (temper) rolling, Texture transfer, Rough surfaces, Sheet rolling, Surface topography

Doi: 10.24012/dumf.1532363

* Corresponding author

ABSTRACT

Sheet materials are manufactured with roughness in order to be ideally painted and shaped. This process is carried out in the final stage of cold rolling using roughened rolls. The sheet material passing between the rough rolls is finally roughened and put into use. Aluminum alloys are used in many industries due to their superior properties such as light weight, high corrosion resistance and high mechanical properties. This study was carried out to determine the surface roughness behavior of aluminum sheet materials in cold rolling roughening. In this context, AA2024-T3 aluminum alloys were subjected to cold rolling process using roughened rolls at different reduction ratios (1%, 5%, 10%, 20%). During the tests, the rolling forces were read from the test equipment and the roughness parameters R_a , R_z , and R_p and roughness profiles of the surfaces roughened by rolling at different reduction ratios were obtained. It was determined that the rolling force and roughness transfer ratio increased as the reduction ratio increased. When the roughness parameters, roughness distribution and surface images were evaluated together in the roughness transfer with cold rolling at 1% reduction ratio, it was concluded that there was a homogeneous roughness distribution on the sheet material surfaces, while the homogeneous roughness distribution gradually deteriorated at 5% and increasing reduction ratios.

Introduction

In the last step of cold rolling, sheet materials with both the desired surface roughness and the desired mechanical properties are manufactured with specially roughened rolls [1]. The last step of cold rolling is known as skin-pass (temper) rolling. One of the most important purposes of this process is to give the surface a roughness texture in order to provide painting and shaping [2, 3]. There are many parameters that affect the roughness transfer to sheet materials in the rolling process. The studies encountered in the literature on these parameters are given below. Mekicha et al. concluded that the most important parameter affecting the topography of the surface in roughness transfer in rolling is the reduction ratio and the rolling speed affects the surface topography to a very small degree [4]. Rodriguez-Vidal et al. stated that the roughness transfer process by rolling strongly depends on the mechanical properties of the materials [5]. Özakın and Kurgan stated in their study that the use of lubricant in the rolling process decreases the rolling force, and a more homogeneous roughness profile is obtained [6]. In a study by Özakın et al., they were stated that in the rolling process applied to materials with different thicknesses at the same reduction ratios, materials with higher thicknesses had more homogeneous roughness

distribution [7]. Wu et al. demonstrated the effects of roll diameter, material thickness and roll roughness on roughness transfer to the surfaces of sheet materials by rolling. They showed that larger roll diameter reduces roughness transfer, with more roughness transferred to the thinner strip [8]. Patel et al. showed the effects of roll diameter, reduction ratio and sheet width on roughness transfer using finite element methods. They evaluated the deviation transfer values with their unique methods [9]. Zhang et al. investigated the effects of grinding, polishing and sandblasting processes applied to roll surfaces on surface topography, mechanical properties, and microstructure in the rolling process. They showed that when sheet materials were rolled with rolls produced by sandblasting at the same reduction ratio, they had the highest peak density, the smallest grain size, and the highest tensile strength [10].

It is determined that roughness transfer in the rolling process is intensively applied to sheet steel materials within the literature information. In this direction, aluminum alloys are widely used in high-tech applications due to their many advantageous properties such as light weight, high mechanical properties, good corrosion resistance and cost effectiveness [11-13]. The surface appearance of aluminum

sheet materials is one of the important factors that reveal their commercial value, as with all sheet materials. The surface appearance of sheet materials is affected by the rolling parameters of the manufacturing line. Surface quality characteristics of aluminum sheets are expressed as tribological elements between surfaces such as rolling force, forward slip, rolling speed, lubrication conditions, reduction ratio, surface properties of the work roll. It is actually the surface topography of the work roll that determines the surface quality of aluminum sheet materials [14]. The studies encountered in the literature on roughness transfer to aluminum-based sheet materials by rolling are given respectively. Lenard cold rolled AA6061-T6 aluminum alloys with different reduction ratios using mineral lubricant. They investigated the effects of roll roughness on roll force, roll torque and forward slip. They found that the increase in roll roughness did not adequately lubricate the interfaces and caused an increase in roll force [15]. Frolish et al. reported that roll roughness is one of the main factors affecting the surface properties of aluminum sheet materials in rolling [16]. Sun et al. investigated the experimental conditions under which the surface roughness of aluminum materials in the rolling process is optimum. They stated that the reduction ratio and the viscosity of the lubricant play a dominant role in achieving the optimum roughness [17]. Jeng et al. investigated the effects of roll speed, reduction ratio and lubricant viscosity on the surface quality of aluminum sheets from cold rolling parameters. From the theoretical results they obtained, they stated that increasing the reduction ratio, decreasing the roll speed and viscosity will cause an increase in the contact area and an increase in the roll pressure [18]. Hussein et al. investigated the effects of reduction ratio, forming temperature, lubricant properties on surface hardness, surface residual stresses and surface roughness in the rolling process of aluminum alloys. They reported that lubricant properties had a strong effect on surface roughness, while reduction ratio had a strong effect on surface hardness and surface residual stresses [19]. Ma et al. investigated the effects of different lubrication

conditions on surface quality after rolling. They showed that water-based nanolubricant exhibited the best properties in terms of surface quality [20]. Warneke et al. produced rough rollers by high-speed laser ablation, characterized the rolls and investigated the transfer of roughness texture to aluminum sheet materials. They stated that the rolls produced by laser ablation technique exhibited more homogeneous roughness distribution compared to those produced by electrolyte etching [21].

When the literature studies are examined, roughness transfer to sheet materials by rolling is generally subject to steel materials and the effects of many parameters in which steel materials are used have been tried to be examined. It has been determined that aluminum-based sheet materials have been subjected to fewer studies on roughness transfer by rolling. It has been observed that AA2024-T3 alloy materials, which are used extensively in the aerospace and automotive fields, have not been subjected to roughness transfer in cold rolling and there is a gap in this subject. In this study, AA2024-T3 aluminum alloys were subjected to cold rolling process using roughened rolls at different reduction ratios. The roughness transfer to the material with different reduction ratios was experimentally investigated.

Materials and Methods

Material

In this study, AA2024-T3 aluminum alloys were preferred. AA2024-T3 aluminum alloys are frequently used in aerospace structural components due to their many advantages such as high strength, corrosion resistance and easy machinability. The chemical composition of AA2024-T3 aluminum alloy is given in Table 1 and its mechanical properties are given in Table 2. 2 mm thick AA2024-T3 aluminum alloys were prepared using a 125 mm long, 25 mm wide laser cutting machine. The surfaces of the cut samples were cleaned with ethyl alcohol and subjected to rolling tests.

Table 1. Chemical composition of AA2024-T3 aluminum alloy sheet material [22].

Chemical composition (wt%)								
Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Ti	Cr
Balance	4.55	1.49	0.45	0.17	0.16	0.10	0.02	<0.01

Table 2. Mechanical properties of AA2024-T3 aluminum alloy material [23, 24].

Young's Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strain (mm/mm)
72.4	345.0	482.0	0.1587

Methods

Rolling tests were carried out in the rolling test equipment by setting four different reduction ratios (1%, 5%, 10%, 20%). The reduction ratios were determined by the ratio of

the difference between the thicknesses of the material before the rolling process and the thicknesses after the rolling process to the thicknesses before the rolling process. Rolling tests were carried out under dry conditions with 75 mm diameter rough rolls at a rolling speed of 10 rpm. Rolling loads were read from the load cell during each test. After the rolling tests, the roughness measurements of the surfaces were performed using a PCE-RT 2000 roughness tester and the surfaces were imaged with a SOIF XJP-6A optical microscope at 10X magnification. Figure 1 shows the rolling test equipment and characterization methods used in the study.

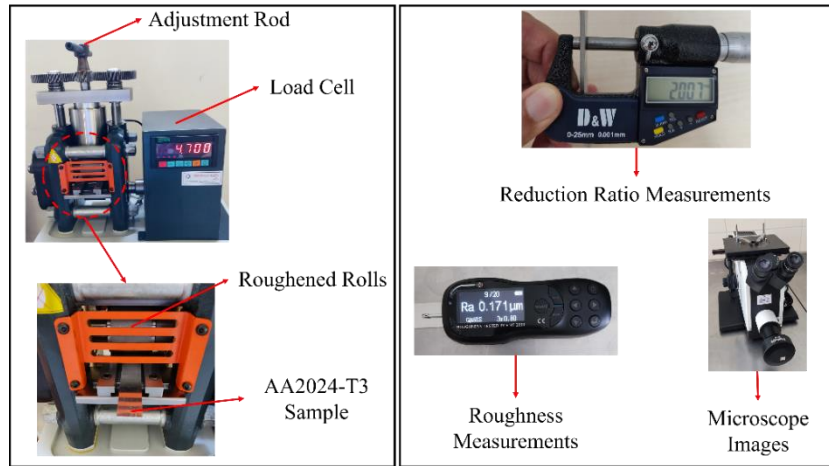


Figure 1. Rolling test equipment and characterization methods.

In order to ensure roughness transfer, the rolls were manufactured by roughening with diamond. The average roughness (R_a) of the top and bottom rolls was calculated as $3.4 \mu\text{m}$. Roughness measurements of the rolls were performed at four different points from the center points of the rolls and averages were taken. In the roughness measurements of the material surfaces, three measurements were taken from different points in the rolling direction and the roughness parameters of the surfaces were determined.

Within the scope of the study, the roughness transfer ratio (RR) transferred from the rolls to the surfaces of AA2024-T3 aluminum alloy materials was determined using the formula given in Equation 1 [25]. In the equation, $R_{a,e}$ is the arithmetic mean surface roughness after rolling, $R_{a,b}$ is the arithmetic mean surface roughness before rolling and $R_{a,r}$ is the arithmetic mean surface roughness of the roll pairs.

$$RR (\%) = \frac{R_{a,e} - R_{a,b}}{R_{a,r} - R_{a,b}} \times 100 \quad (1)$$

Results and Discussion

Roughness transfer was performed on AA2024-T3 aluminum alloys by cold rolling process at different reduction ratios and the thicknesses of the materials were measured with a micrometer. The photos of aluminum samples before and after rolling with several reductions are given in Figure 2. In these images, the load values read from the load meter during roughness transfer in the cold rolling process were also written. The average values of thicknesses measured at three different points after each pass are given in Table 3. Material thicknesses for each pass initial thickness is 2.02 mm.

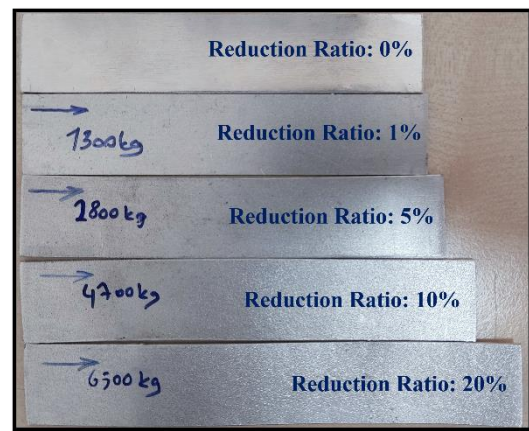


Figure 2. Images obtained from samples roughened by cold rolling.

Table 3. Material thicknesses of AA2024-T3 aluminum alloys before and after roughness transfer by cold rolling

Reduction Ratio (%)	Thickness (Average)
0	2.02
1	2.00
5	1.92
10	1.82
20	1.62

After roughness transfer to AA2024-T3 aluminum alloys by cold rolling, the roughness parameters R_a (arithmetic mean roughness), R_p (maximum profile peak height) and R_v (maximum profile valley depth) of the surfaces were measured and the graph showing the relationship between these parameters and reduction ratios is given in Figure 3. The R_a parameter increases with increasing reduction ratio. When the reduction ratio increased from 1% to 5%, the R_a parameter increased by 52%. When the reduction ratio increased from 5% to 20%, the R_a parameter increased by 42%. It is seen that the increasing trend in the R_a at reduction ratios of 5% and more is less compared to the R_a in the 0%-5% reduction ratio range. It can be said that the onset of work hardening in the material at high reduction ratios, and thus it prevents the roughness transfer from the roll to the material. This is also stated in the literature [26].

It is also possible to see that the increasing trend of R_v and R_p parameters with the increase in the reduction ratio exhibits a similar behavior to the R_a parameter. When the reduction ratio increased from 1% to 5%, the R_v parameter increased by 44%. When the reduction ratio increased from 5% to 20%, the R_v parameter increased by 14%. Likewise, when the reduction ratio increased from 1% to 5%, the R_p parameter increased by 114%. When the reduction ratio increased from 5% to 20%, the R_p parameter increased by 90%. This shows that with increasing reduction ratio, the roll roughness peaks and valleys are transferred to the material to a lesser extent due to the hardening of the material and forward slip during rolling.

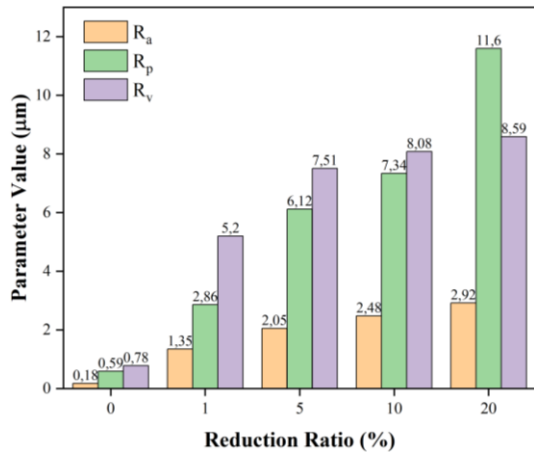


Figure 3. Relationship between reduction ratio and roughness parameters R_a , R_p and R_v .

After roughness measurements were made on the samples, roughness transfer ratios were calculated using Equation 1. The relationship between different reduction ratios and roughness transfer ratios is shown in Figure 4. It is seen that the roughness transfer ratio increases with increasing reduction ratio. When the reduction ratio increased from 1% to 5%, the roughness transfer ratio increased by 61%. When the reduction ratio increased from 5% to 20%, the roughness transfer ratio increased by 47%. The reduction ratio is one of the most effective parameters in the roughening process and it is frequently found in literature that the roughness transfer ratio increases as the reduction ratio increases [27, 28]. With increasing reduction ratio, the peaks and valleys on the roll surface are effectively transferred to aluminum sheet materials. Thus, the material surface gets closer to resembling the roughness profile of the roll. Although this ratio is predicted to be 100% due to the forward shift in rolling behavior, this is impossible in practice. However, it can be said that the work hardening, and forward slip behavior of the material have a great effect on this situation.

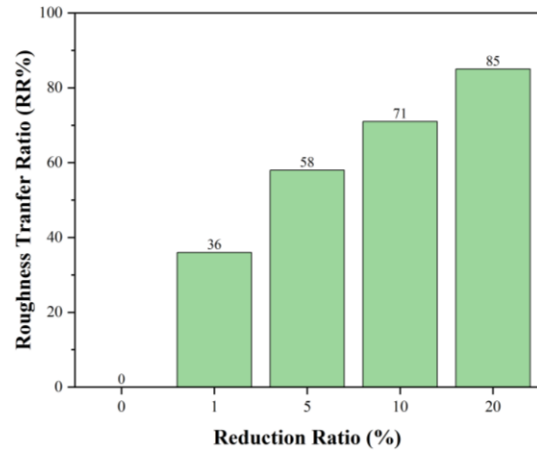


Figure 4. Relationship between different reduction ratios and roughness transfer ratios.

Specific roll force (rolling forces acting on unit length) were calculated from the load values. The graph showing the relationship between different reduction ratios and rolling forces is shown in Figure 5. It is seen that the rolling force increases with increasing reduction ratio. The findings agree with the literature studies [29]. When the reduction ratio increased from 1% to 5%, the rolling force increased by 115%. When the reduction ratio increased from 5% to 20%, the rolling force increased by 132%. At higher reduction ratios, higher rolling forces occur due to the increased volume of material that must be formed in a given time and the onset of work hardening. This means a shorter roll life and higher wear rates. Determining the appropriate parameters that can provide ideal roughness transfer will provide many advantages such as roll life and energy consumption.

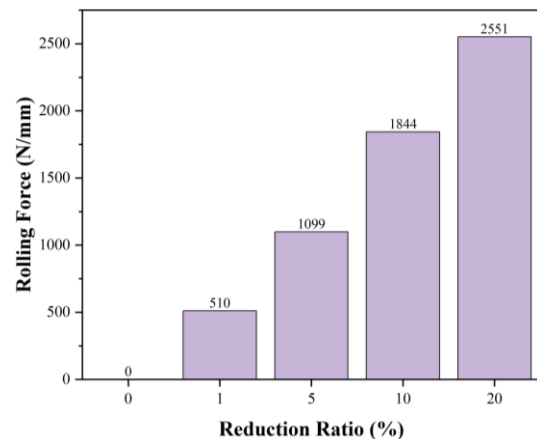


Figure 5. Relationship between different reduction ratios and rolling forces.

The roughness profiles on the sample surfaces that were obtained with different reduction ratios are shown in Figure 6. It is seen that in the roughness transfer process by cold rolling at 1% reduction ratio, the peak and valley distributions of the roughness profile exhibit a homogeneous distribution in the range of approximately $\pm 5 \mu\text{m}$. In the roughness transfer process with cold rolling at 5% and higher reduction ratios, it is seen that the homogeneous distribution of peaks and valleys in the

roughness profile starts to deteriorate. This is indicated by the irregular fluctuation of the intense peaks and valleys. Based on the findings, we can say that high reduction rates (>1%) hurt the homogeneous distribution of the roughness

profile. It should be noted that homogeneous roughness distribution is very effective in terms of dyeing and shaping [30].

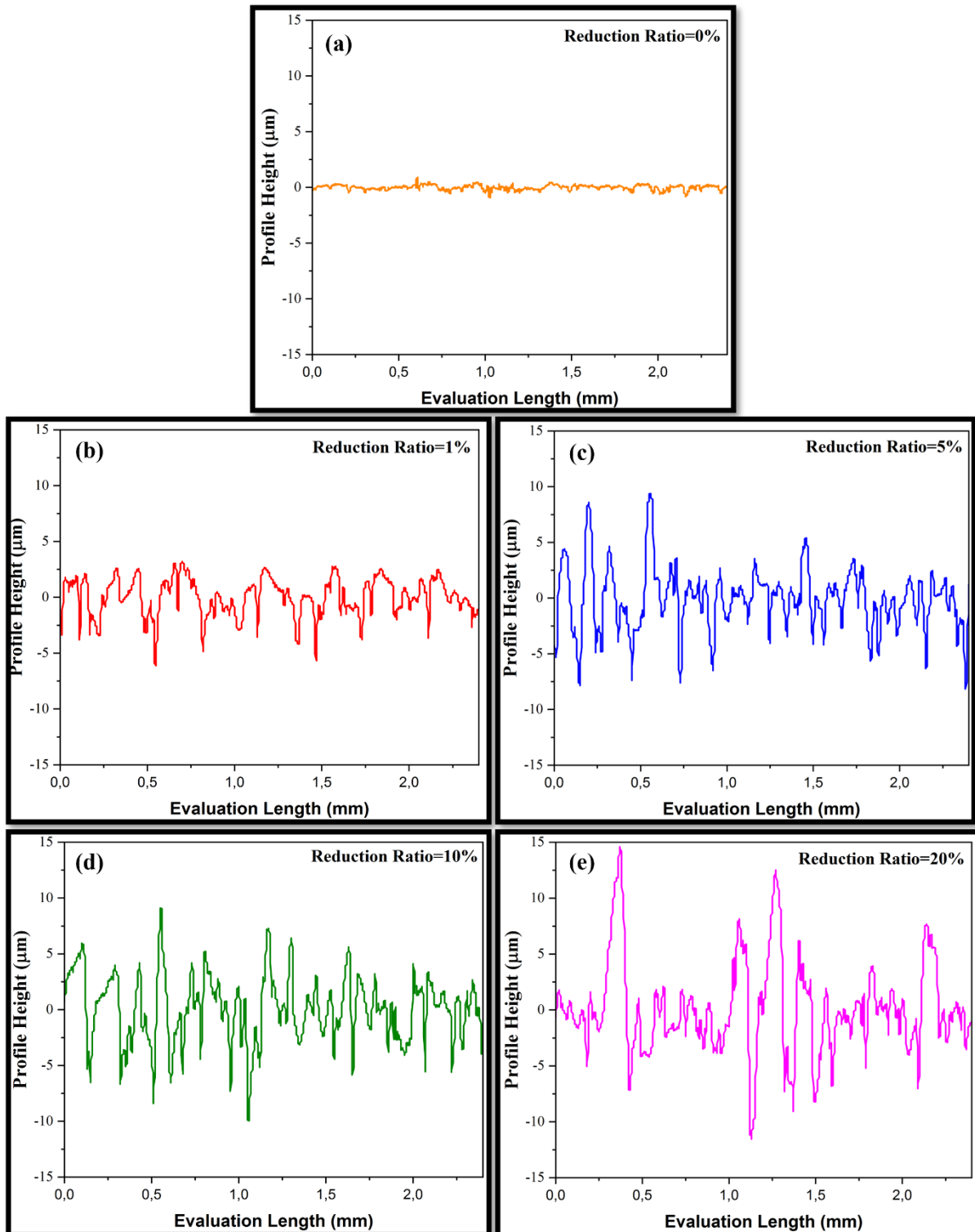


Figure 6. Roughness profiles of materials in the roughness transfer process by cold rolling at different reduction ratios.

Microscope images of the material surfaces of AA2024-T3 aluminum alloys in the roughness transfer process by cold rolling at different reduction ratios are shown in Figure 7.

In the roughness transfer process by cold rolling at 1% reduction rate, the traces formed on the material surface are in a certain order and the dark-colored regions represent the

valleys transferred from the rolls to the sheet material surface. In the roughness transfer process with cold rolling at 5% and higher reduction ratios, the dark colored regions in the traces formed on the surface increase, but it is observed that the density of valleys and peaks

gradually increases compared to 1% reduction ratio. The increase in valleys, peaks, and irregular craters on the surface reveals that the homogeneous distribution of valleys and peaks on the material surface is disrupted.

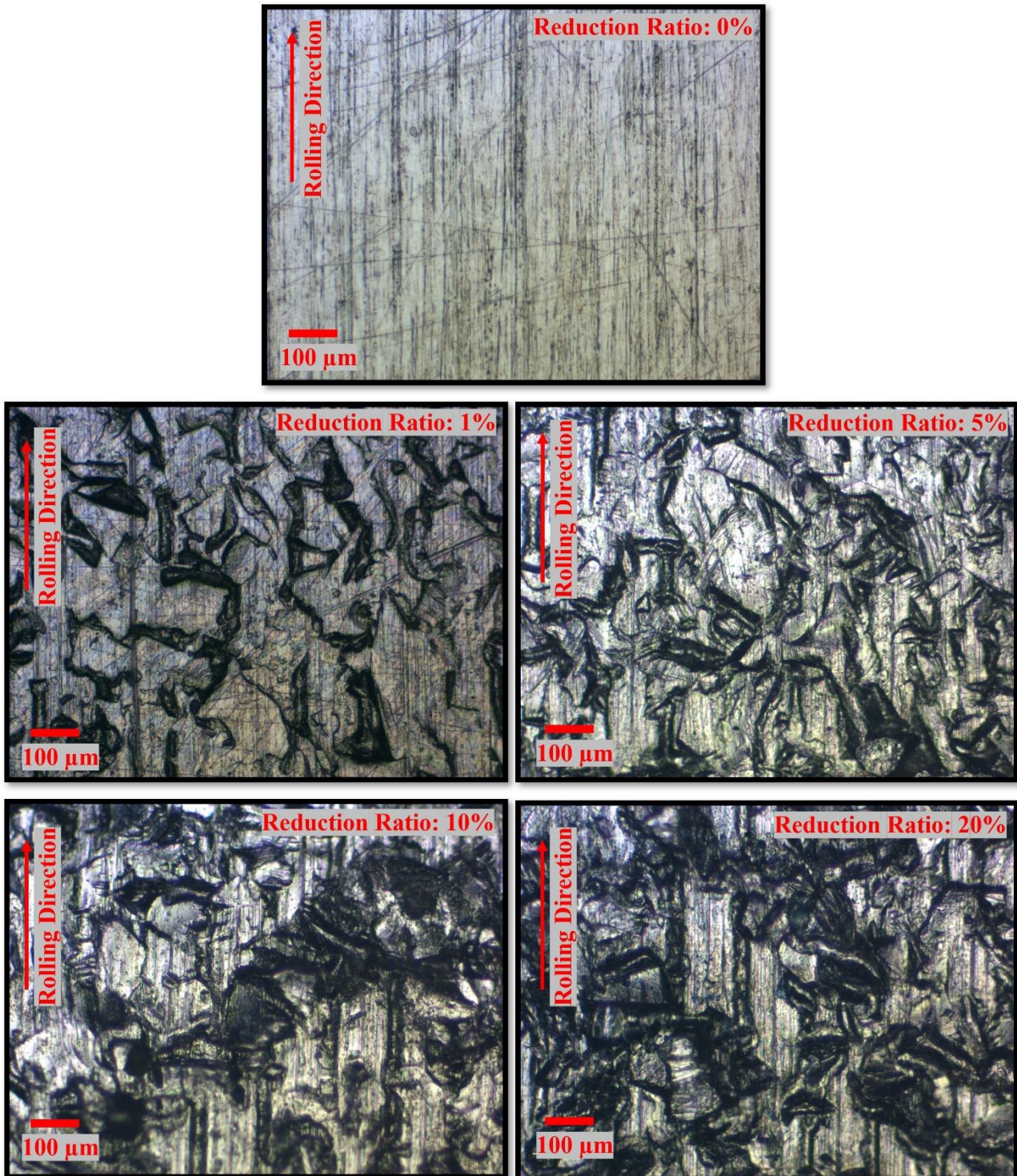


Figure 7. Microscope images of materials in the roughness transfer process by cold rolling at different reduction ratios.

Conclusion

In this study, AA2024-T3 aluminum alloys were subjected to a roughness transfer process with different reduction ratios. In the study, roughness profiles, parameters and images transferred to the surfaces of AA2024-T3 aluminum alloys due to the rolling process were evaluated and roughness transfer behaviors transferred to the material with different reduction ratios were tried to be determined. The results obtained from the study are given below.

- It was determined that the increased tendency in R_a , R_p and R_v roughness parameters at reduction ratios of 5% and above was less compared to R_a , R_p and R_v roughness parameters in the reduction ratio range of 0%-5%.
- As the reduction ratio increased, the roughness transfer ratio increased. This increase was determined to be 61% when the reduction ratio increased from 1% to 5% and 47% when it increased from 5% to 20%.
- The rolling force increased with an increasing reduction ratio. This increase was 115% when the reduction ratio increased from 1% to 5% and 132% when the reduction ratio increased from 5% to 20%.
- It was concluded that the roughness profile exhibited homogeneous distribution in terms of peak, valley distributions, and surface images in the roughness transfer process by cold rolling at a 1% reduction ratio, and the homogeneous distribution deteriorated at reduction ratios of 5% and above.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

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

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

Authors' Contributions

The contribution of the authors is equal.

References

- [1] X. Li, C. Schulte, D. Abel, M. Teller, G. Hirt, and J. Lohmar, J, "Modeling and exploiting the strip tension influence on surface imprinting during temper rolling of cold-rolled steel," *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 3, 100045, 2021.
- [2] B. Çolak, and N. Kurgan, "An experimental investigation into roughness transfer in skin-pass rolling of steel strips," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 3321-3330, 2018.
- [3] B. Özakin, and Kurgan, N, "Experimental investigation of roughness transfer with skin-pass rolling to high strength low alloy (HSLA) material," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(12), 12137-12144, 2021.
- [4] M. A. Mekicha, M. B. De Rooij, L. Jacobs, D. T. A. Matthews, and D. J. Schipper, "Experimental validation of contact models for cold-rolling processes," *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 116371, 2020.
- [5] E. Rodriguez-Vidal, D. T. A. Matthews, V. S. de Viteri, F. Korver, D. J. Wentink, and I. Quintana, "Surface design and texturing of strip steel using nanosecond pulsed lasers for simulated roughness transfer and paint appearance," *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 116365, 2020.
- [6] B. Özakin, and N. Kurgan, "DC04 kalite sac malzemelere temper haddeleme ile pürüzlülük transferinde yağlayıcının etkisinin incelenmesi," *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 2(2), 325-336, 2020.
- [7] B. Özakin, B. Çolak, and N. Kurgan, "Effect of material thickness and reduction ratio on roughness transfer in skin-pass rolling to DC04 grade sheet materials," *Industrial Lubrication and Tribology*, 73(4), 676-682, 2021.
- [8] C. Wu, L. Zhang, P. Qu, S. Li, and Z. Jiang, "Effect of the elastic deformation of rolls on the surface texture transfer in skin-pass rolling," *International Journal of Mechanical Sciences*, 198, 106358, 2021.
- [9] A. Patel, A. Malik, F. Zhang, and R. Mathews, "Influence of work-roll grinding error and high-fidelity corrective grinding in cold sheet rolling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(11), 7389-7413, 2022.
- [10] Z. Zhang, H. Zhang, X. Liu, T. Wang, Q. Huang, and X. Liao, "Effect of roll surface topography on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel ultra-thin strip," *Journal of Manufacturing Processes*, 108, 764-778, 2023.
- [11] R. Matin, Y. Totik, E. E. Sukuroglu, I. Efeoglu, and T. G. Santos, "Effects of voltage on the components of surface integrity of Al₂O₃ ceramic coatings on AA2024 by plasma electrolytic oxidation," *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(18), 1971-1981, 2020.
- [12] H. I. Yurdugulu, R. Sadeler, H. Yilmaz, and B. Koc, "Corrosion fatigue behavior of AA 7020 alloy in seawater," *Materials Testing*, 65(5), 743-752, 2023.
- [13] S. S. Li, X. Yue, Q. Y. Li, H. L. Peng, B. X. Dong, T. S. Liu, H. Y. Yang, J. Fan, S. L. Shu, F. Qiu, and Q. C. Jiang, "Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry," *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 944-983, 2023.
- [14] O. A. Gali, M. Shafiei, J. A. Hunter, and A. R. Riahi, "The influence of work roll roughness on the surface/near-surface microstructure evolution of hot rolled aluminum-magnesium alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, 237, 331-341, 2016.
- [15] J. G. Lenard, "The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum

- alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, 152(2), 144-153, 2004.
- [16] M. F. Frolish, M. Krzyzanowski, W. M. Rainforth, and J. H. Beynon, “Oxide scale behaviour on aluminium and steel under hot working conditions,” *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3), 36-40, 2006.
- [17] J. Sun, H. Ying, and M. Lu, “Optimize aluminum's surface roughness in rolling lubrication process,” *Industrial Lubrication and Tribology*, 65(3), 175-180, 2013.
- [18] Y. R. Jeng, J. T. Lee, Y. J. Hwu, L. C. Liu, and C. Y. Lu, “Effects of operation parameters of cold rolling on surface finish of aluminum,” *Tribology International*, 148, 106321, 2020.
- [19] E. A. Hussein, J. Gattmah, A. N. Jaseem, and S. K. Shibab “Optimization of rolling parameters for enhancing the surface integrity of aluminum alloy,” *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 30(6), 70-82, 2023.
- [20] L. Ma, J. Lian, X. Ma, S. Bai, L. Ma, and J. Zhao, “A study on the tribological behavior of water-based nanolubricant during corrugated rolling of copper plates,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(3), 1513-1526, 2023.
- [21] P. Warneke, A. Bohlen, and T. Seefeld, “Texturing skin-pass rolls by high-speed laser melt injection, laser ablation, and electrolytic etching,” *Journal of Laser Applications*, 36(1), 012011, 2024.
- [22] N.M. André, S. M. Goushegir, J. F. Dos Santos, L. B. Canto, and S. T. Amancio-Filho, “Friction Spot Joining of aluminum alloy 2024-T3 and carbon-fiber-reinforced poly (phenylene sulfide) laminate with additional PPS film interlayer: Microstructure, mechanical strength and failure mechanisms,” *Composites Part B: Engineering*, 94, 197-208, 2016.
- [23] S. Akpınar, M. D. Aydın, and A. Özel, “A study on 3-D stress distributions in the bi-adhesively bonded T-joints,” *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 10220-10230, 2013.
- [24] K. Gültekin, and Y. Korkmaz, “AA2024-T3 alüminyum alaşımlarına uygulanan farklı yüzey hazırlama ve pürüzlülük işlemlerinin yapıştırma bağlantılarına etkisi,” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1269-1281, 2021.
- [25] H. Kijima, “Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip,” *Journal of Materials Processing Technology*, 214(5): 1111-1119, 2014.
- [26] C. Wu, L. Zhang, P. Qu, S. Li, and Z. Jiang, “A new method for predicting the three-dimensional surface texture transfer in the skin pass rolling of metal strips,” *Wear*, 426, 1246-1264, 2019.
- [27] D. Xu, Q. Yang, X. Wang, H. He, Y. Sun, and W. Li, “An experimental investigation of steel surface topography transfer by cold rolling,” *Micromachines*, 11(10), 916, 2020.
- [28] B. Özakin, “Experimental investigation of the effect of skin-pass rolling reduction ratio on corrosion behaviors of AISI 304 stainless steel sheet materials,” *Surface Topography: Metrology and Properties*, 11(2), 025004, 2023.
- [29] B. Çolak, Z. Ahmed, B. Özakin, and N. Kurgan, “An experimental investigation into roughness transfer in asymmetrical rolling of steel strips,” *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1070-1089, 2023.
- [30] B. Özakin, and E. Yılmaz, “Sac malzemelerin boyanabilme kabiliyetlerine temper haddeleme ezme miktarının etkisi,” *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2), 517-530, 2023.



Pseudospektral Chebyshev yöntemi ile fonksiyonel dereceli çubukların deformasyon analizi

Deformation analysis of functionally graded rods by pseudospectral Chebyshev method

Özlem Cerit¹, Durmuş Yarımpaç^{2*}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Matematik Bölümü, ozlemcrt.148@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0570-2063>

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Matematik Bölümü, durmusyarimpac@osmaniye.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8763-1125>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25 Ekim 2024
Revizyon 19 Şubat 2025
Kabul 25 Şubat 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

Deformasyon analizi, fonksiyonel dereceli çubuklar, pseudospektral Chebyshev yöntemi, Laplace dönüşümü, modifiye Durbin yöntemi.

ÖZ

Eksenel yönde değişken kesit alanına sahip fonksiyonel olarak dereceli çubuğun deformasyon analizi ele alınmıştır. Elastik modül ve yoğunluk gibi malzeme özelliklerinin aksel yönde derecelendirildiği varsayılmıştır. Bu koşullar, geleneksel analitik yöntemlerle çözülmesi zor olan değişken katsayılı kısmi diferansiyel denklemle sonuçlanır. Laplace dönüşümü altında, kısmi diferansiyel denklem aksel yönde zamandan bağımsız bir sınır değer problemine dönüştürülmüş ve pseudospektral Chebyshev yöntemi ile çözülmüştür. Modifiye edilmiş ters Durbin yöntemi kullanılarak fiziksel uzaydaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Birleştirilmiş sayısal yöntemle elde edilen sonuçlar literatürle doğrulanmıştır. Rastgele seçilen malzeme karışımının yer değiştirme dağılımları üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 October 2024
Received in revised form 19 February 2025
Accepted 25 February 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Deformation analysis, functionally graded rods, Laplace transforms, modified Durbin method.

ABSTRACT

Deformation analysis of functionally graded rods with variable cross-sectional area in axial direction are considered. Material properties such as elastic modulus and density are assumed to be graded in axial direction. These conditions result in partial differential equation with variable coefficients which are difficult to solve by conventional analytical methods. Under Laplace transform, partial differential equation is transformed into a time-independent boundary value problem in axial direction and solved by pseudospectral Chebyshev method. Displacements in physical space are obtained by using modified inverse Durbin method. The results obtained by combined numerical method are verified with literature. Effects of randomly selected material mixture on displacement distributions are discussed.

Doi: 10.24012/dumf.1573732

* Sorumlu Yazar

Giriş

Günümüz mühendislik tasarımlarında, gerekli yapısal performansı elde etmek için homojen olmayan malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Homojen olmayan yapısal elemanların (çubuklar, kirişler, şaftlar, borular, tüpler, vb.) deformasyon analizi, özellikle mühendislik tasarımında oldukça önemlidir. Bu elemanların mühendislik uygulamalarındaki potansiyel kullanımları arasında havacılık araçları, motor parçaları, füzyon enerjisi cihazları ve diğer mühendislik yapıları yer alır. Homojen olmayan elemanların kullanımı, tasarımcının ağırlık ve gerilme yoğunluğu faktörlerini azaltmasına; kalıntı gerilme dağılımını, yüksek sıcaklığa dayanıklılık yeteneğini ve yapıların mukavemeti ile kararlılığını iyileştirmesine yardımcı olabilir. Malzeme özellikleri, oluşturdukları yapıların davranışını iyileştirecek şekilde tasarlanabilir. Farklı uygulamalardaki bu yapıların miktarı arttıkça, homojen olmayan elemanlardan yapılmış yapısal bileşenleri tasarlamak ve analiz etmek için karakterizasyon açısından farklı teknikler ile metodolojilerin kullanılması gerekir.

Bu çalışmada fonksiyonel dereceli ve değişken kesitli çubukların uzunlamasına deformasyon analizi ele alınmıştır. Çeşitli çubuk türlerinin uzunlamasına deformasyon ve titreşim analizi hakkında literatürde birçok makale yayınlanmıştır. Bunlardan bazıları kronolojik sıralamaya göre verilmeye çalışılmıştır.

Eisenberger [1], değişken kesitli bir çubuğun uzunlamasına titreşim analizi için analitik bir çözüm sunmuştur. Bu analitik yöntemin, kesit alanındaki ve eleman boyunca kütle dağılımındaki herhangi bir polinom varyasyonu için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Abrate [2], değişken kesitli çubuk ve kirişlerin hareket denklemlerini, basit bir dönüşümle düzgün çubuk veya kiriş için hareket denklemine dönüştürmüştür. Keyfi kesit ve sınır koşullarına sahip değişken kesitli kirişlerin serbest titreşimini analiz etmek için tek terimli Rayleigh-Ritz yaklaşımını kullanmıştır. Çeşitli sınır koşullarına sahip değişken kesitli kirişlerin doğal frekansını tahmin etmek için basit formüller sunmuştur. Kumar ve Sujith [3], polinom ve sinüzoidal kesit alanına sahip uzunlamasına çubukların hareket denklemini, uygun dönüşümler altında analitik olarak çözülebilir diferansiyel denkleme indirgeyip analitik çözümü elde etmişlerdir. Çeşitli sınır koşullarına sahip değişken kesitli çubukların doğal frekanslarını elde etmek için Bessel, Neumann ve trigonometrik fonksiyonlardan yararlanmışlardır. Gürgöze [4], bir yay-kütle sisteminin açıklıkta tutturulduğu bir uç kütle taşıyan uzunlamasına titreşen bir çubuğun frekans denklemini ele almıştır. Frekans denklemi oluşturulduktan sonra Dunkerley prosedürüne dayalı olarak temel frekans için yaklaşık bir formül verilmiştir. Li [5], değişken kesitli çubukların uzunlamasına titreşimini modelleyen denklemleri, basit kuvvet ve üstel fonksiyon dönüşümleri ile Bessel denklemlerine dönüştürerek analitik olarak çözmüştür. Bu çubukların doğal frekans ve mod tahmini için basit formüller verilmiştir. Kademeli değişken kesitli serbest çubuklar [6] ile kütle ve yay destekli çubuklar [7] için benzer

araştırmaları yapmıştır. Turhan [8], kesit alanındaki süreksizliğin, uzunlamasına titreşen çubukların özdeğerleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Özdeğerlerin ve özvektörlerin, kesit değişiminin konumu ve büyüklüğüne bağımlılığının belirli genel özellikleri belirlenmiş ve bu işlevsel bağımlılığı yaklaşık olarak tanımlayan kapalı form formüller önerilmiştir. Gürgöze ve Erol [9], farklı fiziksel parametrelere sahip birkaç parçadan oluşan ve dış viskoz sönümlemeye tabi tutulan, uç kütle taşıyan sürekli bir çubuğun özdeğerlerini değişkenlerine ayırma yöntemi ile analitik çözen iki yöntem sunmuşlardır. Raj ve Sujith [10], değişken kesitli çubukların uzunlamasına titreşim analizini analitik olarak çözmüşlerdir. Birleşik hipergeometrik fonksiyon açısından çözümler veren kesit alan değişimleri aranmış ve sistemi idare eden diferansiyel denklem, genel bir dönüşüm kullanılarak birleşik hipergeometrik diferansiyel denkleme uygun şekilde indirgenip çözüm elde edilmiştir. Genel sınır koşullarında belirli kesit alan değişimlerine sahip çubukların özdeğerleri analitik olarak elde edilmiştir. Cortes ve Elejabarrieta [11], özellikleri frekansa bağlı olan ve üstel bir modelle modellenip kompleks bir rijitlikle karakterize edilen bir sönümleyiciye sahip çubuğun mekanik davranışına ilişkin bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmalarında, karmaşık özdeğerler ve mod şekillerini analiz edip çubuğun harmonik bir uyarılmaya maruz kaldığında zorlanmış tepkisini incelemişlerdir. Kesit alan denkleminde türetilen kompleks özdeğer problemi Nelder-Mead optimizasyon yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Al Kaisy vd. [12], serbest ve kenetlenmiş sınır koşulları altında değişken kesitli çubuğun boyutsuz doğal frekansı ve normalize edilmiş mod şekillerini diferansiyel kareleme yöntemi ile elde etmişlerdir. Değişken kesit alanının titreşim üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Promyslova [13], değişken kesitli konik, üstel ve katenoidal tipteki elastik çubukların uzunlamasına titreşimlerini incelemiştir. Farklı sınır koşullarında konsantratörlerin kazanç faktörleri için analitik ifadeler elde etmiştir. Özdeğer sayısı arttıkça kazanç faktör eğrilerinin, limit eğrilerine doğru eğilim gösterdiğini gözlemlenmiştir. Provatidis [14], serbestçe titreşen elastik yapıların özdeğer analizi için yeni bir kollokasyon yöntemi sunmuştur. Kuvvet serisi, Lagrange, Bernstein veya Chebyshev polinomları biçiminde tek boyutlu baz fonksiyonları kullanılarak deplasman yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Farklı sınır koşulları için iyi sonuçlar elde edilmiştir. Calio ve Elishakoff [15], belirli bir malzeme yoğunluk dağılımına sahip uzunlamasına homojen olmayan çubuklar için kapalı form çözüm geliştirmişlerdir. Eksenel rijitlik ve malzeme yoğunluğunun dağılımları, trigonometrik fonksiyonlar cinsinden temsil edilmiştir. Belirli malzeme yoğunluğu için, varsayılan mod şekliyle uyumlu eğilme rijitliğini, doğal frekansların önceden seçilen değere eşit olduğu şekilde yeniden yapılandırmışlardır.

Yarimoğlu [16], Kumar ve Sujith [3]'ün düzgün olmayan uzunlamasına çubuğun analitik çözümünde sinüzoidal kesit alanına sahip doğal frekans değerlerindeki hata için aynı dergide bir düzeltme yayınlamıştır. Bahrami [17], Kumar ve Sujith [3] in düzgün olmayan uzunlamasına çubuğun analitik

çözümünde hem parabolik hem de sinüzoidal kesit alanına sahip doğal frekans değerlerindeki hata ile Yarimoğlu [16]'nu yapmış olduğu düzeltmedeki hata için aynı dergide bir düzeltme yayınlamıştır. Guo ve Yang [18], kararlı durumda değişken kesitli çubukların zorlanmış uzunlamasına titreşim analizini seri çözümü ile elde etmişlerdir. Celebi vd. [19], eksenel yüklenmiş homojen olmayan bir çubuğun elastik davranış problemini analiz etmişlerdir. Problemin çözümü Laplace uzayında elde edilmiş ve zaman uzayına ters dönüşüm Revidü teoremi kullanılarak yapılmıştır. Askari vd. [20], kübik doğrusal olmayan bir terime ve çubuğun eksen boyunca etki eden bir Winkler elastik kuvvetine sahip doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemle tanımlanan çubuğun titreşimini incelemişlerdir. Diferansiyel denklemi çözmek ve sistemin doğal frekansını elde etmek için homotopi analiz, enerji dengesi yöntemleri ile Hamilton yaklaşımını kullanmışlardır. Roody vd. [21], gerinim-yer değiştirme denklemine basitleştirme yapılmadan, sonlu gerinim geçiren farklı sınır koşullarına sahip bir çubuğun titreşimini incelemişlerdir. Sistemin modeli Green-Lagrange gerinimi, yapısal sönümlenme ve Hamilton prensibi kullanılarak oluşturulmuş ve ardından doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklem Galerkin yöntemi ile adi diferansiyel denkleme dönüştürülerek çözüm elde edilmiştir.

Celebi vd. [22], eksenel yönde keyfi olarak değişen malzeme özelliklerine ve kesit alanlarına sahip çubukların uzunlamasına titreşim analizini incelemişlerdir. Sistemi modelleyen değişken katsayılı kısmi diferansiyel denklem, birleştirilmiş Laplace dönüşümü-tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ve modifiye edilmiş ters Durbin yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bu birleşik yaklaşımla, doğal frekanslar ile mod şekillerinin belirlenmesine gerek kalmadan zorlanmış titreşim tepkisinin doğrudan elde edileceği belirtilmiştir. Kulterbaev vd. [23], sabit kesitli homojen çubukların serbest ve zorlanmış uzunlamasına salınımlarını ele almışlardır. Zorlanmış salınımlar için dağıtılmış ve yoğunlaştırılmış yükler dikkate alınmıştır. Aslan vd. [24], farklı sınır koşulları, uzunluk-yükseklik oranları ve malzeme değişim katsayılarının fonksiyon dereceli Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşimleri üzerindeki etkileri de parametrik olarak incelenmiştir. Demir [25], sabit-serbest uzunlamasına titreşen bir çubuk ile enine titreşen bir kirişin frekans denklemleri oluşturup Rayleigh oranı, Dunkerley formülü ve sürekli sistem modeli gibi çeşitli yöntemler kullanılarak doğal frekanslar elde edilmiştir. Babaei [26], yerel olmayan gerinim gradyanlı çubukların zorlanmış uzunlamasına titreşim analizini elde etmiş ve yerel olmayan, gerinim gradyanı ve klasik çubukların tepkisiyle karşılaştırmıştır. Sistemi yöneten denklemler boyuta bağlı kinematik ve genişletilmiş Hamilton ilkesi kullanılarak türetilmiştir. Bu çalışmada ilk defa harmonik dış yüklemeye maruz kalan, klasik ve klasik olmayan uzunlamasına çubukların zorlanmış titreşim davranışı sunulmuştur. Kondakçı vd. [27], değişken kesit alanlarına sahip homojen ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş çubukların serbest

eksenel titreşiminin analizi için analitik tabanlı sayısal bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşım, Adomian ayrıştırma yöntemi, varyasyonel yineleme yöntemi ve homotopik bozulma yöntemi gibi analitik yaklaşım tekniklerine dayanmaktadır.

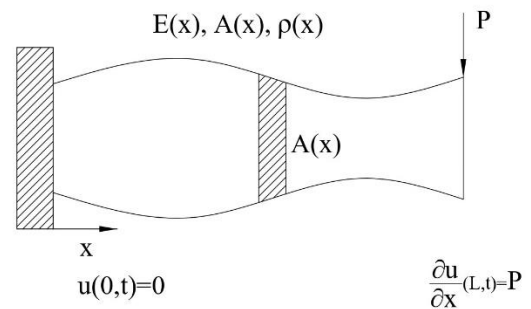
Sabit kesitli çubukların deformasyon analizi için literatürde analitik ve iyi bilinen bir takım çözümler mevcuttur. Ancak, kesit alanı çubuğun uzunluğuna göre değişiyorsa, sistemi modelleyen denklem, analitik çözümleri çok kısıtlı koşullar altında elde edilebilen değişken katsayılı diferansiyel denklem haline gelir. Değişken kesitli çubukların fonksiyonel dereceli bir yapı şeklinde oluşturulması, değişken katsayılı diferansiyel denklemi konvansiyonel yöntemlerle çözmeyi daha da zorlaştırır. Literatürden farklı olarak fonksiyonel dereceli ve değişken kesitli çubukların deformasyon analizi ilk defa bu çalışmada pseudospektral Chebyshev yöntemi ile incelenmiştir. Düşük hesaplama maliyetine, yüksek doğruluğa ve uygulama kolaylığına sahip bu yöntemle, diferansiyel denklem doğrusal bir denklem sistemine dönüştürülerek herhangi bir ayrıştırma yöntemiyle kolayca çözülebilir hale getirilir. Ayrıca farklı kesit alanları görselleştirilerek, deformasyonun kuvvet altındaki etkisi daha anlaşılır hale getirilmiştir. Elastik modülü ve yoğunluk gibi malzeme özelliklerinin yanında değişken kesit alanının çubuğun uzunlamasına yer değiştirmesi üzerine etkileri araştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Dış eksenel yüklerin sadece uç yüklerden oluştuğu değişken kesitli fonksiyonel dereceli titreşen bir çubuğun eksenel dinamik davranışını yöneten kısmi diferansiyel denklem [22],

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[E(x)A(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right] = \rho(x)A(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

şekindedir. Burada $u(x, t)$ yer değiştirmeyi, $A(x)$ değişken kesiti, $E(x)$ elastic modülünü, $\rho(x)$ yoğunluğu, x eksenel yönü, t zamanı ve L çubuğun uzunluğunu göstermektedir. Değişken kesitli çubuğun temsili kesit alanı da Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Değişken kesitli çubuğun temsili kesit alanı.

Genelliği bozmadan,

$$U(\eta, \tau) = \frac{u(x,t)}{L}, \quad \eta = \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{ct}{L} \quad (2)$$

boyutsuz parametreleri kullanılarak değişken katsayılı kısmi diferansiyel denklem (1) boyutsuz ve açık formda,

$$\frac{\partial U^2(\eta, \tau)}{\partial \eta^2} + \frac{1}{E(\eta)} \frac{\partial E(\eta)}{\partial \eta} \frac{\partial U(\eta, \tau)}{\partial \eta} + \frac{1}{A(\eta)} \frac{\partial A(\eta)}{\partial \eta} \frac{\partial U(\eta, \tau)}{\partial \eta} = c^2 \frac{\rho(\eta)}{E(\eta)} \frac{\partial U^2(\eta, \tau)}{\partial \tau^2} \quad (3)$$

şeklinde elde edilir. Burada $c^2 = E_0/\rho_0$ uzunlamasına dalganın yayılımını ifade etmektedir.

Başlangıç anında herhangi bir etkinin olmadığı, sol ucu sabitlenmiş, serbest ucu ise dinamik aksenal kuvvet etkisi altında olduğu düşünülen çubuğun başlangıç

$$U(\eta, 0) = 0, \quad \frac{\partial U(\eta, 0)}{\partial \tau} = 0 \quad (4)$$

ve sınır koşulları [22],

$$U(0, \tau) = 0, \quad \frac{\partial U(1, \tau)}{\partial \eta} = \frac{P(\tau)}{A(1)E(1)}. \quad (5)$$

şeklinde alınmıştır.

Laplace dönüşümü

Zorlanmış çubuğun lineer kısmi diferansiyel denklemindeki zamana bağımlılığı ortadan kaldırmak için Laplace dönüşümü kullanılmıştır. Boyutsuz kısmi diferansiyel denklemin (3) başlangıç koşulları (4) kullanılarak Laplace dönüşümü alınır,

$$\bar{U}'' + \left[\frac{E'}{E} + \frac{A'}{A} \right] \bar{U}' - \frac{s^2 c^2 \rho}{E} \bar{U} = 0 \quad (6)$$

Laplace uzayında aksenal yönde türevli adi diferansiyel denklem elde edilir. Burada $\mathcal{L}[U(\eta, \tau)] = \bar{U}(\eta, s)$ iken, $(\cdot)'$, η yönündeki türevi, s ise Laplace parametresini göstermektedir. Laplace uzayında dönüştürülmüş sınır koşulları ise,

$$\bar{U}(0, s) = 0, \quad \frac{\partial \bar{U}(1, s)}{\partial \eta} = \frac{\mathcal{L}\{P_1(\tau)\}}{A(1)E(1)} \quad (7)$$

şeklinindedir. Analizlerde, çubuğun serbest ucunda dinamik yükleme,

$$P_1(\tau) = P_0[1 - d \cos(\gamma \tau)] \quad (8)$$

biçimi dikkate alınmıştır [22]. Burada P_0 yüklemenin genliğini, d cosinüs fonksiyonunun genliğini, γ ise dairesel frekansı ifade etmektedir. $d = 0$ alındığında yükün sabit olduğu kolayca görülebilir.

Fonksiyonel dereceli malzeme modelleri

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler hem iç mekân hem de çevre koşullarına dayanıklı olacak şekilde üretilebilen ve lamine kompozitlere alternatif olarak ortaya

çıkan yeni nesil malzemelerdir. Bu malzemelerin bileşimi homojen olmayıp tüm özellikleri makroskobik anlamda bir yüzeyden diğerine sürekli olarak değişmektedir. Fonksiyonel dereceli çubukların mühendislik uygulamalarındaki potansiyel kullanımları arasında havacılık araçları, motor parçaları, füzyon enerjisi cihazları ve diğer mühendislik yapıları yer alır. Homojen olmayan elemanların kullanımı, tasarımcının ağırlık ve gerilme yoğunluğu faktörlerini azaltmasına; kalıntı gerilme dağılımını, yüksek sıcaklığa dayanıklılık yeteneğini ve yapıların mukavemeti ile kararlılığını iyileştirmesine yardımcı olabilir. Özel bir kompozit sınıfı malzeme kategorisinde olan ve üretilmesi daha zor olan bu malzemelerin, üretilmeden önce tanımlanması ve analizlerinin yapılması gerekir.

Bu çalışmada, malzeme gradyan parametrelerinin çubuktaki yer değiştirmeler üzerindeki etkilerini tespit etmek için iki farklı durum ele alınmıştır. Ayrıca değişken kesitli çubuğun da yer değiştirme üzerindeki etkileri iki farklı çubuk kesiti için incelenmiştir. Sabit kesit alanı literatür ile karşılaştırma için seçilmiş, sinüzoidal kesit alanı ise, kesitin sağ ve sol ucunu daha rahat kontrol edebilmek için tercih edilmiştir. Bu durumlar aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

Durum-1 Sabit kesitli parabolik malzeme modeli,

$$E(\eta) = E_0(1 + a\eta)^2, \quad \rho(\eta) = \rho_0(1 + a\eta)^2, \quad A = A_0$$

için sistemi modelleyen adi diferansiyel denklem Laplace uzayında

$$\bar{U}'' + \left(\frac{2a}{1+a\eta} \right) \bar{U}' - s^2 \bar{U} = 0 \quad (9)$$

şeklini alır.

Durum-2 Sinüzoidal kesitli parabolik malzeme modeli,

$$E(\eta) = E_0(1 + a_1\eta)^2, \quad \rho(\eta) = \rho_0(1 + a_2\eta)^2,$$

$$A(\eta) = A_0 \sin^2(b_1\eta + b_2)$$

için sistemi modelleyen adi diferansiyel denklem Laplace uzayında

$$\bar{U}'' + \left(\frac{2a}{1+a_1\eta} + 2b_1 \cot[b_1\eta + b_2] \right) \bar{U}' - \left(\frac{1+a_2\eta}{1+a_1\eta} \right)^2 s^2 \bar{U} = 0 \quad (10)$$

şeklini alır. Burada b_1 ve b_2 sırasıyla kesitin sol ve sağ ucundaki genliği kontrol etmek için kullanılan parametreleri göstermektedir.

Pseudospektral Chebyshev yöntemi (PCY)

Pseudospektral yöntemler, sözde yerleşim noktalarında kesin enterpolasyona izin veren ayrık fonksiyon yaklaşımlarına dayanır. Bu yöntemlerin en belirginleri, trigonometrik baz fonksiyonlarına dayanan Fourier yöntemi ile Chebyshev polinomlarına dayanan Chebyshev

yöntemidir. Fourier yöntemi, dolaylı olarak periyodik davranışların modellenmesinde kullanılır. Dolayısı ile serbest yüzey veya emici davranış gibi sınır koşullarının uygulanması zordur. Bir tür trigonometrik pseudospektral yöntem olan pseudospektral Chebyshev yöntemi, birinci tür Chebyshev polinomlarına dayanır. Periyodik olmayan sınır koşullarına sahip problemler için tercih edilmektedir [28-31]. Lagrange interpolasyonunda, Gauss-Lobatto interpolasyon noktaları

$$\eta_j = \cos\left(\frac{j\pi}{N}\right), \quad j = 0, 1, \dots, N \quad (11)$$

bu polinomun sıfırları olarak alınır, hata en aza indirilir. Chebyshev yerleşim noktalarının sınırlarında ızgara yoğunluğu nedeniyle, problemin çözümünde daha az nokta kullanarak yüksek hassasiyette çözümler elde edilir. Lagrange interpolasyonu ile Gauss-Lobatto noktaları kullanılarak elde edilen diferansiyel matris D , sol taraftan bir kere $\bar{U}(\eta, s)$ vektörü ile çarpıldığında bu vektörün birinci türevine $\bar{U}'(\eta, s) = D_N \bar{U}(\eta, s)$, iki kere çarpıldığında bu vektörün ikinci türevine $\bar{U}''(\eta, s) = D_N^2 \bar{U}(\eta, s)$ karşılık gelir. Bu şekilde türevli ifadeleri yüksek hassasiyetli bir yaklaşım sağlarken, adi diferansiyel denklemi lineer denklem sistemine indirger. Pseudospektral Chebyshev yönteminin son zamandaki uygulamaları ve detaylı çözüm açıklamaları için [28-31] çalışmaları incelenebilir.

Sabit kesitli parabolik malzeme modeli için ikinci dereceden sınır değer problem (9) PCY kullanılarak,

$$M\bar{U} = 0 \quad (12)$$

$$M = D^2 + \left(\frac{2a}{1+a\eta}\right)D - s^2$$

doğrusal bir sisteme dönüştürülür. Sinüzoidal kesitli parabolik malzeme modeli için ikinci dereceden sınır değer problem (10) PCY kullanılarak,

$$M\bar{U} = 0 \quad (13)$$

$$M = D^2 + \left(\frac{2a}{1+a\eta} + 2b_1 \cot[b_1\eta + b_2]\right)D - \left(\frac{1+a_2\eta}{1+a_1\eta}\right)^2 s^2$$

doğrusal bir sisteme dönüştürülür. Homojen lineer denklem sistemlerinin (13-14) aşıkâr olmayan çözümü, sınır koşullarının (7), lineer sistemin ilk ve son satırına entegre edilmesi ile bulunur.

Modifiye Edilmiş Durbin Yöntemi

Laplace uzayında elde edilen yer değiştirme değerlerinin fiziksel uzaydaki sayısal değerlerinin ters dönüşüm formülleri ile bulunması zor ve pratik değildir. Bunun yerine sayısal değerlerin fiziksel uzaydaki değerlerini hesaplamak için modifiye edilmiş Durbin yöntemi kullanılmıştır [32]. Fourier cosinüs seri yaklaşımına dayanan ve Dubner ve

Abate'nin geliştirdiği ters dönüşüm yönteminden esinlenen bu yöntemde Fourier cosinüs ve sinüs seri yaklaşımları birlikte kullanılmıştır. Bu yöntemdeki sonuçların iyileştirilmesi için Narayanan [33] tarafından önerilen Lanczos faktörü her bir terimle ayrı ayrı çarpılmıştır. Yöntemin son zamandaki uygulamaları ve detaylı çözüm açıklamaları için [34-38] çalışmaları incelenebilir.

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, zorlanmış fonksiyonel dereceli bir çubuğun yer değiştirme analizi birleştirilmiş Laplace-Pseudospektral Chebyshev ve modifiye edilmiş ters Durbin yöntemi ile ele alınmıştır. Sinüzoidal ve sabit olmak üzere iki farklı eksenele uç kuvveti dikkate alınmıştır.

Birleştirilmiş yöntemin doğruluğunu test etmek için analitik çözümün de mevcut olduğu sabit kesitli birinci durum literatürde mevcut olan analitik çalışma [19] ile farklı parametre değerleri için karşılaştırılmış, sonuçlar Tablo 1-2 de listelenmiştir. Tablo1-2'deki sonuçlar incelendiğinde, uzunluk boyunca sadece 10 noktada yapılan hesaplamalar ile birleştirilmiş Laplace-Chebyshev-Durbin yöntemi ile yaklaşık sonuçların elde edildiği görülmüştür. Tablo 1-2'deki sonuçların sonsuzluk normuna göre hatası 0.002 civarındadır.

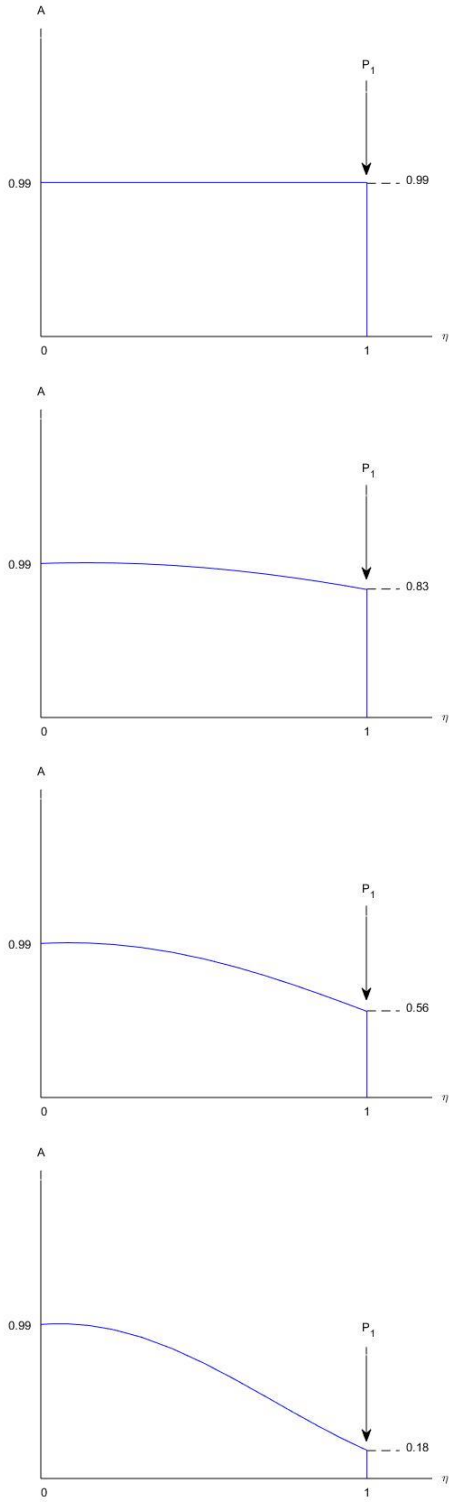
Tablo 1. Çubuğun yüklü ucundaki yer değiştirmenin, birinci durumda PCY ile analitik çözümün $P_1(\tau)$ yükü için karşılaştırılması ($a = 1, \gamma = 0.6$ ve $d = 1$).

τ	$U(1, \tau)$	
	PCY	Celebi vd. [19]
5	1.302633	1.304106
10	-0.037243	-0.037100
20	-0.100100	-0.099140
30	-0.086524	-0.084870
40	0.076120	0.078120
50	0.372020	0.374067

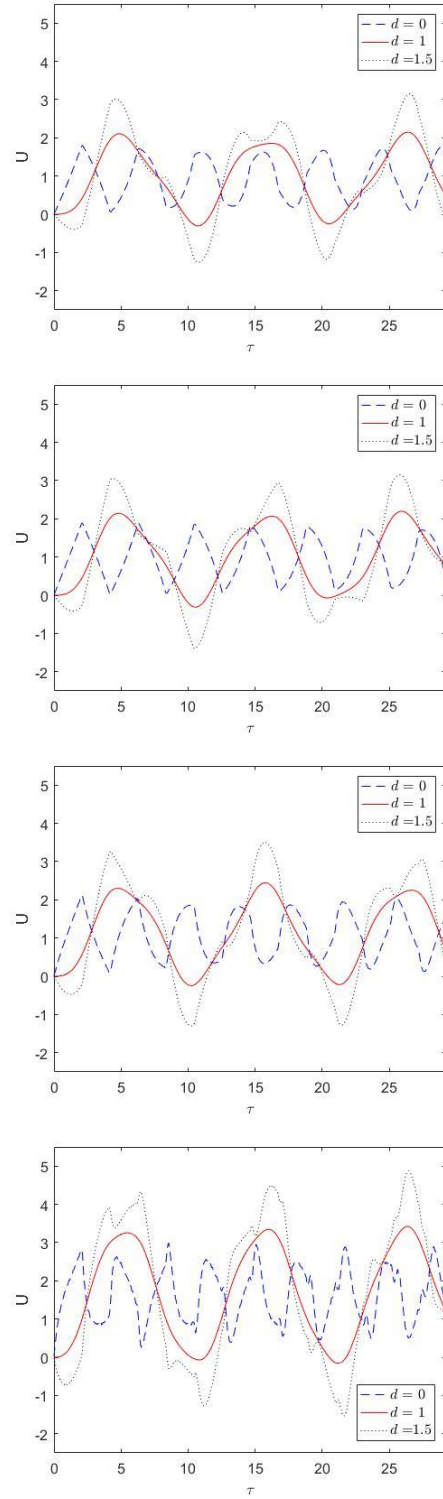
Tablo 2. Çubuğun yüklü ucundaki yer değiştirmenin, birinci durumda PCY ile analitik çözümün $P_1(\tau)$ yükü için karşılaştırılması ($a = 2, \gamma = 0.6$ ve $d = 1$).

τ	$U(1, \tau)$	
	PCY	Celebi vd. [19]
5	0.880537	0.881667
10	-0.362467	-0.362710
20	0.058422	0.059314
30	-0.158132	-0.157670
40	0.215168	0.216752
50	0.189630	0.190822

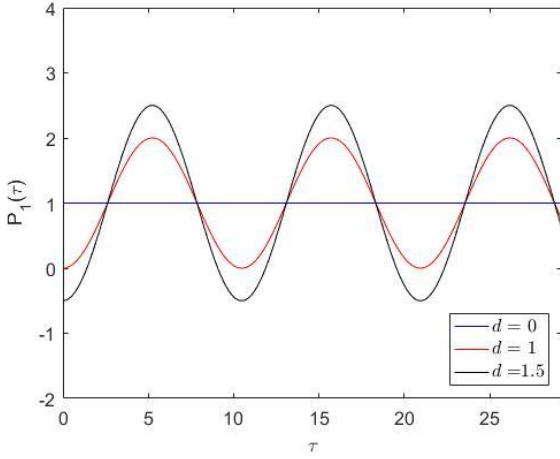
Sinüzoidal kesitli parabolik malzeme modeli için malzemenin sertliğinin ve yoğunluğunun çubuğun uç kısmında doğru arttığı varsayılmış, bunun için $a_1 = 0.1$ ve $a_2 = 0.2$ alınmıştır. Ayrıca sayısal analizde işlem kolaylığı için $P_0 = 1$ ve $A_0 = 1$ alınmıştır. Şekillerin daha düzgün görünmesi için analizde 12 örgü noktası kullanılmıştır.



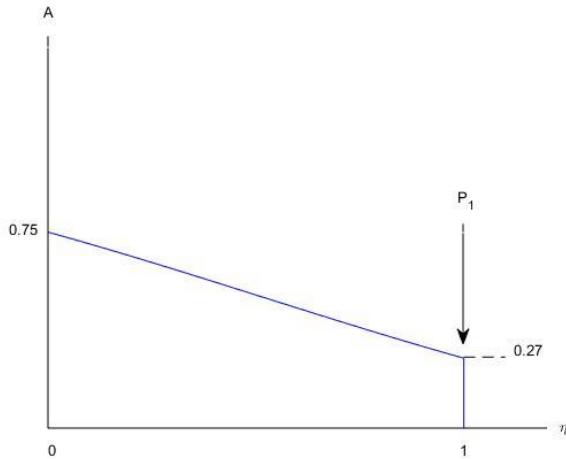
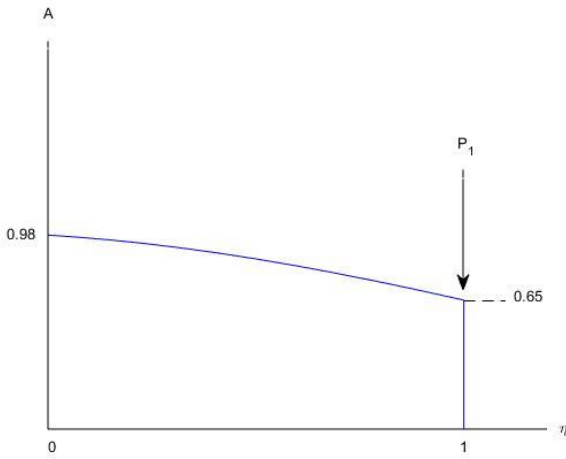
Şekil 2. Dinamik yük altında ($P_1(\tau)$), Durum 2 için farklı kesit alan profilleri. Yukarıdan aşağıya doğru $b_1 = 0, 0.5, 0.8, 1.2$. ($b_2 = 1.5, \gamma = 0.6$).



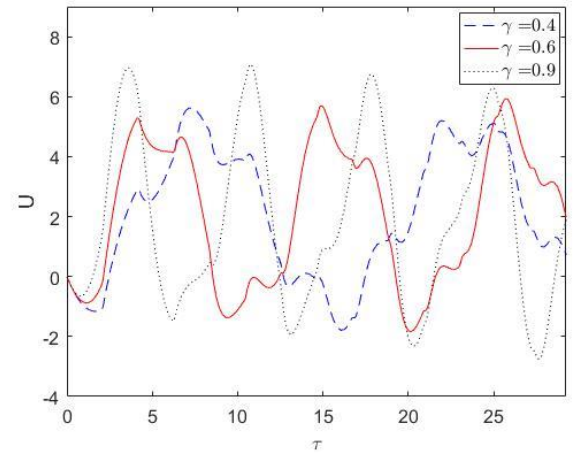
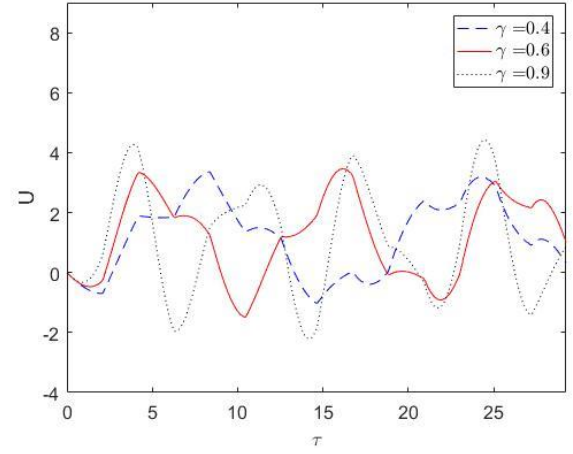
Şekil 3. Dinamik yük altında ($P_1(\tau)$), Durum 2 için boyutsuz uç yer değiştirmenin farklı genliklerde zaman boyunca solda karşılık gelen kesitler (Şekil 2) için davranışı ($b_1 = 0, 0.5, 0.8, 1.2, b_2 = 1.5, \gamma = 0.6$).



Şekil 4. Çubuğun ucuna uygulanan $P_1(\tau)$ yükünün farklı genlikler için davranışı ($\gamma = 0.6$).



Şekil 5. Dinamik yük altında ($P_1(\tau)$), Durum 2 için farklı kesit alan profilleri. Yukarıdan aşağıya doğru $b_2 = 1.7, 2.1$ ($b_1 = 0.5, d = 1.5$).



Şekil 6. Dinamik yük altında ($P_1(\tau)$), Durum 2 için boyutsuz uç yer değiştirmenin farklı dairesel frekanslarda zaman boyunca Şekil 5'e karşılık gelen kesitler için davranışı ($b_1 = 0.5, b_2 = 1.7, 2.1, d = 1.5$).

Farklı kesit alanları (Şekil 2) ve farklı genlikli yükleme tipleri (Şekil 4) için çubuğun serbest ucundaki yer değiştirme grafikleri Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'te $d = 0$ değeri sabit yüklemeye karşılık gelmektedir. Analizlerde $P_1(\tau)$ yükü için dairesel frekans sabit olmasına rağmen ($\gamma = 0.6$), yüklemenin genliği arttıkça ($d = 1, 1.5$) zamana bağlı yüklemenin periyod değeri ile deplasmanın genliği artmaktadır. Sabit yükleme durumunda ($d = 0$), titreşimin periyod değeri ile genliğinin zamana bağlı yüklemelere ($d = 1, 1.5$) göre daha düşük olduğu görülmüştür. Çubuğun uç noktasında kesitin daralmasıyla yer değiştirmenin genliğinde artış görülürken, hareketin de düzensizleştiği görülmüştür.

Şekil 6'te yüklemenin genliği sabit tutulurken ($d = 1.5$), daralan kesit alanlı çubuklar (Şekil 5) için farklı dairesel frekanslarda çubuğun serbest ucundaki yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Dairesel frekans değeri arttıkça, hareketin periyod değeri azalırken, genlikte artış gözlemlenmiştir. Çubuğun uç noktasında kesitin daralmasıyla ($b_1 = 0.5, b_2 = 2.1$), hareketin periyodunda bir değişiklik gözlemlenmezken yer değiştirme genliğinde artış görülmüştür.

Sonuç

Bu çalışmada, fonksiyonel dereceli ve değişken kesitli çubukların deformasyon analizi ele alınmıştır. Elastik modülü ve yoğunluk gibi malzeme özelliklerinin yanında değişken kesit alanı, yer değiştirme için değişken katsayılı diferansiyel denklem oluşturur. Analitik çözümleri çok kısıtlı koşullar altında elde edilebilen değişken katsayılı diferansiyel denklem, pseudospektral Chebyshev yöntemi ile çözülmüştür. Yöntemin doğruluğu için literatür ile karşılaştırma yapılmış, sınırlı örgü noktalarında yöntemin iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Farklı kesit alanları ve yükleme tipleri için çubuğun ucundaki yer değiştirme davranışı incelenmiş, çubuğun serbest ucu daraldığında titreşimin genliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Analizde, dairesel frekans sabit alındığında, yüklemenin genliği arttıkça yüklemenin periyod değerinin de arttığı görülmüştür. Çubuğun kesitinin tamamındaki daralmanın ise daha yüksek genlikli titreşimlere sebep olduğu görülmüştür.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

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

Teşekkür

Bu çalışma Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) destekli OKÜ BAP-2023-PT2-021 numaralı projenin ürünüdür.

Kaynaklar

- [1] M. Eisenberger, "Exact longitudinal vibration frequencies of a variable cross-section rod," *Appl. Acoust.*, vol. 34, pp. 123-130, 1991.
- [2] S. Abrate, "Vibration of non-uniform rods and beams," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 185, pp. 703-716, 1995.
- [3] B. M. Kumar, R. I. Sujith, "Exact solutions for the longitudinal vibration of non-uniform rods," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 207, pp. 721-729, 1997.
- [4] Gürgöze M., "On the eigenfrequencies of longitudinally vibrating rods carrying a tip mass and spring-mass in-span," *Journal of Sound and Vibration.*, vol. 216, no 2, pp. 295-308, 1998.
- [5] Q. S. Li., "Exact solutions for free longitudinal vibrations of non-uniform rods," *Journal of Sound and Vibration.*, vol. 234, pp. 1-19, 2000.
- [6] Q. S. Li., "Exact solutions for free longitudinal vibration of stepped non-uniform rods," *Appl. Acoust.*, vol. 60, pp. 13-28, 2000.
- [7] Li, Q.S, Wu, J. R., and Xu, J., "Longitudinal vibration of multi-step non-uniform structures with lumped masses and spring supports," *Appl. Acoust.*, vol. 63, pp. 333-350, 2002.
- [8] Ö. Turhan, "On the eigencharacteristics of longitudinally vibrating rods with a cross-section discontinuity," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 248, no 1, pp. 167-177, 2001.
- [9] M. Gürgöze, H. Erol, "On the eigencharacteristics of multi-step rods carrying a tip mass subjected to non-homogeneous external viscous damping," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 267, pp. 355-365, 2003.
- [10] A. Raj ve R.I. Sujith, "Closed-form solutions for the free longitudinal vibration of inhomogeneous rods", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 283, pp. 1015-1030, 2005.
- [11] F. Cortes, M.J. Elejabarrieta, "Longitudinal vibration of a damped rod Part I: Complex natural frequencies and mode shapes," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 48, no. 9, pp. 969-75, 2006.
- [12] A.M.A. Al. Kaisy, R.A. Esmaeel; M.M. Nassar, "Application of the differential quadrature method in the longitudinal vibration of non-uniform rods," *Eng. Mech.*, vol. 14, pp. 303-310, 2007.
- [13] A.S. Promyslova, "Longitudinal vibrations of elastic rods of variable cross-section (concentrators)," *Mechanics of Solids*, vol. 43, pp. 939-47, 2008.
- [14] C.G. Provatidis, "Free vibration analysis of elastic rods using global collocation.," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 78, pp. 241-250, 2008.
- [15] I. Calio, ve I. Elishakoff, "Vibration tailoring of inhomogeneous rod that possesses a trigonometric fundamental mode shape," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 309, pp. 838-842, 2008.
- [16] B. Yardimoglu, Discussion on "Exact solutions for the longitudinal vibration of non-uniform rods," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, pp. 4107, 2010.
- [17] Bahrami, A. Comments on "Exact solutions for the longitudinal vibration of non-uniform rods" *Journal of Sound and Vibration*, vol. 442, pp. 843-844, 2019.
- [18] S. Guo, S. Yang, "Longitudinal vibrations of arbitrary non-uniform rods." *Acta Mech. Solida Sin.*, vol. 28, pp. 187-199, 2015.
- [19] K. Çelebi, İ. Keleş, N. Tütüncü, "Exact solutions for forced vibration of non-uniform rods by Laplace transformation," *Gazi University Journal of Science.*, vol. 24, no 2, pp. 343-353, 2011.
- [20] H. Askari, E. Esmailzadeh, ve D. Younesian, "Nonlinear Longitudinal Vibration Solutions of an Elastic Rod," *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 4B: Dynamics, Vibration and Control*. San Diego, California, USA. November pp.15-21, 2013.
- [21] B.S. Roody, A.R. Fotuhi, M.M. Jalili, "Nonlinear longitudinal forced vibration of a rod undergoing finite strain," *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* vol. 232, no. 12, pp. 2229-2243, 2018.
- [22] K. Celebi, D. Yarimpabuç, T. Baran, "Forced vibration analysis of inhomogeneous rods with non-uniform cross-section" *J. Eng. Res.*, vol. 6, pp. 189-202, 2018.
- [23] K. Kulterbaev, L. Baragunova, M. Shogenova, "Free Transverse Oscillations of a Continuum-Discrete Vertical Rod," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 459, p. 062096, 2020.
- [24] T. A. Aslan, A. R. Noori, B. Temel, "Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Sönümlü ve Sönümsüz Zorlanmış Titreşim Analizi", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 35(2), 497-510, 2020.
- [25] A. Demir, "The fundamental frequencies of longitudinally vibrating rods carrying tip mass and transversally vibrating beams carrying tip mass by using several methods," *Cumhuriyet Science Journal*, vol. 42, no. 1, 209-217, 2021.
- [26] A. Babaei, "Forced vibration analysis of non-local strain gradient rod subjected to harmonic excitations," *Microsyst Technol*, vol. 27, pp. 821-831, 2021.
- [27] K. Kondakci ve S.B. Coşkun, "Analysis of the Axial Vibration of Non-Uniform and Functionally Graded Rods via an Analytical-Based Numerical Approach," *Vibration*, vol.6, no.4, pp.876-894, 2023.
- [28] A. Yıldırım, D. Yarimpabuç, K. Çelebi, "Transient thermal stress analysis of functionally graded annular fin with free base", *Journal of Thermal Stresses*, 43(9), 1138-1149, 2020.
- [29] M. Eker, D. Yarimpabuç, K. Çelebi, "Thermal stress analysis of functionally graded solid and hollow thick-walled structures with heat generation", *Engineering Computations*, Vol. 38(1), 371-391, 2021.
- [30] M. Eker, D. Yarimpabuç, "Thermomechanical responses of functionally graded cylinders", *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, vol. 20(4):19-28, 2021.
- [31] A. Yıldırım, D. Yarimpabuç, V. Arikan, M. Eker, K. Celebi, "Nonlinear thermal stress analysis of functionally graded spherical pressure vessels", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 200, 104830, 2022.
- [32] F. Durbin, "Numerical inversion of Laplace transforms: an efficient improvement to Dubner and Abate's method," *The Computer Journal*, vol. 17, pp. 371- 376, 1974.
- [33] G.V. Narayanan, "Numerical operational methods in structural Dynamics," Minneapolis, University of Minnesota, 1979.
- [34] F.F. Calim, "Free and forced vibration of non-uniform composite beams," *Composite Structures*, vol. 88, pp. 413-423, 2009.
- [35] F.F. Calim, "Free and forced vibration of non-uniform composite beams," *Composite Structures*, vol. 88, pp. 413-423, 2009.
- [36] N. Eratlı, H. Argeso, F.F. Calim, B. Temel, M.H. Omurtag, "Dynamic analysis of linear viscoelastic cylindrical and conical helicoidal rods using the mixed FEM," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, no. 16, pp. 3671-3690, 2014.
- [37] A.R. Noori, T.A. Aslan, B. Temel, "Damped transient response of in-plane and out-of-plane loaded stepped curved rods," *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol.40, no.1, 2018.
- [38] T.A. Aslan, A.R. Noori, B. Temel, "Dynamic response of viscoelastic tapered cycloidal rods," *Mechanics Research Communications*, vol. 92, pp. 8-14, 2018.



GO, GNP ve hBN nanoparçacık katkılı sodyum asetat trihidrat faz değişim malzemesinin farklı soğutma koşulları altında T-history yöntemi kullanılarak erime ve supercooling davranışının incelenmesi

Investigation of the melting and supercooling behavior of GO, GNP and hBN nanoparticle-doped sodium acetate trihydrate phase change material using the T-history method under different cooling conditions

Sinem Kılıçkap Işık^{1*}

Bingöl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, sinemisik@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1044-5092>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 2 Kasım 2024
Revizyon 25 Aralık 2024
Kabul 6 Ocak 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

*Enerji,
Faz değişim malzemeleri (FDM),
Enerji depolama,
T-history metodu,
Nanoparçacıklar,
Supercooling.*

ÖZ

Sodyum asetat trihidrat (SAT), gizli ısı depolama kapasitesinin yüksek olması nedeniyle termal enerji depolama uygulamalarında tercih edilen tuz hidrat faz değişim malzemesidir. Fakat, aşırı soğuma (supercooling) davranışı yüzünden depoladığı ısıyı geri verememektedir. Çalışmada, SAT'ın en büyük dezavantajlarından biri olan supercooling dereceleri belirlenmiştir. SAT'ın termal performanslarını iyileştirmek için belirli oranlarda grafen oksit (GO), grafen nanoplatelets (GNP) ve hegzagonal bor nitrid (hBN) nanoparçacıkları ilave edilmiştir. Saf SAT, SAT/01GO, SAT/025GO, SAT/05GO, SAT/1GO, SAT/025GO/025hBN, SAT/025GO/075hBN, SAT/05hBN, SAT/025GO/025GNP, SAT/025GO/075GNP ve SAT/05GNP olmak üzere toplamda 11 farklı numune hazırlanmıştır. Nanoparçacıkların, SAT'ın supercooling derecesine ve erime sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çalışmada T-history metodu kullanılmıştır. T-history yönteminde, FDM'lerin gerçek koşullardaki davranışları belirlendiğinden geniş ölçekli endüstriyel uygulamalar için oldukça faydalı bir yöntemdir. Numunelere, belirli koşullarda ısıtma ve soğutma işlemi uygulanarak sıcaklıkları kaydedilmiştir. Soğutma işlemi, hızlı ve yavaş soğutma şeklinde iki farklı koşulda uygulanmıştır. Isıtma amındaki sıcaklık verilerinden erime sıcaklık aralıkları elde edilmiştir. Hızlı ve yavaş soğutma işlemi sırasında elde edilen sıcaklık değişimlerinden numunelerin supercooling dereceleri belirlenerek karşılaştırılmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 November
Received in revised form 25 December 2024
Accepted 6 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

*Energy,
Phase change materials (PCM),
Energy storage,
T-history method,
Nanoparticles,
Supercooling.*

ABSTRACT

Sodium acetate trihydrate (SAT) is a preferred salt hydrate phase change material in thermal energy storage applications due to its high latent heat storage capacity. However, due to its supercooling behavior, it cannot give back the stored heat. In the study, one of the biggest disadvantages of SAT, the supercooling degrees, was determined. In order to improve the thermal performances of SAT, graphene oxide (GO), graphene nanoplatelets (GNP) and hexagonal boron nitride (hBN) nanoparticles were added at certain ratios. A total of 11 different samples were prepared as pure SAT, SAT/01GO, SAT/025GO, SAT/05GO, SAT/1GO, SAT/025GO/025hBN, SAT/025GO/075hBN, SAT/05hBN, SAT/025GO/025GNP, SAT/025GO/075GNP and SAT/05GNP. The effect of nanoparticles on the supercooling degree and melting temperatures of SAT was investigated. For this purpose, the T-history method was used in the study. In the T-history method, it is a very useful method for large-scale industrial applications since the behavior of PCMs in real conditions is determined. The temperatures of the samples were recorded by heating and cooling under certain conditions. The cooling process was applied under two different conditions as fast and slow cooling. Melting temperature ranges were obtained from the temperature data at the time of heating. The supercooling degrees of the samples were determined and compared from the temperature changes obtained during the fast and slow cooling process.

Doi: 10.24012/dumf.1578017

* Sorumlu Yazar

Giriş

Gizli ısı depolama, FDM'lerin katıdan sıvıya veya tam tersi yönde faz değişimine uğraması sırasında ısı depolaması veya salmasıdır. Katı haldeki FDM'ler erime sıcaklığının çok üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldıklarında eriyerek sıvı hale gelirler ve bu aşamada enerjiyi depolarlar. Sıvı haldeki FDM'nin sıcaklığı erime sıcaklığının altına düştüğünde, katı hale geçerek depoladığı enerjiyi geri verir. FDM'ler küçük miktarda sıcaklık farkıyla bile büyük miktarda enerjinin depolanmasını ve sisteme geri verilmesini sağlayan, termal enerji depolama sistemlerinin en önemli malzemeleridir [1],[2]. Faz değişim malzemesinin depoladığı gizli ısı miktarı aşağıdaki Denklem 1 ve 2 kullanılarak hesaplanmaktadır [3].

$$Q_t = \int_{T_b}^{T_e} m_{FDM} \times c_p \times dT + m_{FDM} \times a_e \times \Delta h_{m,FDM} + \int_{T_e}^{T_s} m_{FDM} \times c_p \times dT \quad (1)$$

$$Q_t = m_{FDM} \times [c_{katı,FDM} \times (T_e - T_b) + a_{e,FDM} \times \Delta h_{m,FDM} + c_{sıvı,FDM} \times (T_s - T_e)] \quad (2)$$

PCM'in depoladığı toplam ısı miktarı; Q_t (J), başlangıç, erime ve son sıcaklık; T_b , T_e ve T_s (°C), kullanılan FDM'nin kütlesi; m_{FDM} (kg), özgül ısı; c_p (J/kgK), gizli füzyon ısı; $\Delta h_{m,FDM}$ (J/kg), eriyik fraksiyonu; a_e , FDM'nin başlangıç ve erime sıcaklığı arasındaki özgül ısı; $c_{katı,FDM}$ (J/kgK), FDM'nin erime ve son sıcaklığı arasındaki özgül ısı; $c_{sıvı,FDM}$ (J/kgK).

Tuz hidrat FDM'ler düşük maliyetleri, yüksek gizli ısı kapasiteleri ve uygun erime sıcaklıkları gibi eşsiz termal özellikleri ile enerji depolama uygulamalarında çok fazla tercih edilmektedir [4]. Fakat, tuz hidratların düşük termal iletkenlik, supercooling (aşırı soğuma) eğilimleri, birçok termal döngüden (erime-katılaşma) sonra faz ayrılmasına uğramaları ve termal kararsızlık gibi sorunları vardır [1]. Supercooling, sıvı haldeki FDM'nin faz değişim sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklara soğutulmasına rağmen katılaşmaması ve sıvı halde kalması durumudur. Bu durum FDM'nin, faz değişim sıcaklığında gerekli enerjiyi depolayamamasına, depoladığı enerjiyi geri verememesine ve bu süreçlerin gecikmesine neden olmaktadır. Bu şekilde FDM, kullanım amacını yitirmektedir. Ayrıca tuz hidratlar, kristalleşme anında faz ayrımına uğradıkları için tamamen faz değiştiremezler. Bu da performanslarının ve termal iletkenliklerinin azalmasına neden olur. Bu dezavantajlar büyük ölçekli uygulamalarda sistemlerin verimliliğini düşürmekte ve tuz hidratların kullanımını kısıtlamaktadır [5].

Tuz hidrat FDM'ler arasında yaygın olarak kullanılanlardan biri de sodyum asetat trihidrat (SAT)'tır. $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ formülü ile ifade edilen ve 3 su molekülü içeren SAT, 58 °C erime sıcaklığı ve 265 kJ/kg gizli ısıya sahiptir [1],[6]. Katı halden sıvı hale faz değiştirirken önemli miktarda ısıyı emerek, daha sonra geri vermek üzere depolamaktadır. SAT, ısı depolama kapasitesi yüksek, çevre dostu, düşük maliyetli ve uygun erime sıcaklığına sahip bir malzemedir. Fakat, SAT'ın supercooling etkisi çok yüksektir ve kristalleşme sırasında faz ayrılması sorunu yaşamaktadır [1]. SAT, supercooling'e uğradığı için depoladığı enerjiyi tamamen

geri veremez ve enerji depolama uygulamalarında kullanımları sınırlı hale gelir. Bu sorunları gidermek için nanoparçacık katkıları yapılmaktadır. Nanoparçacıklar, FDM içerisinde çekirdeklemeye yardımcı olarak kristalleşmeyi hızlandırır ve böylece supercooling ve faz ayrımı sorunlarını azaltırlar. Özellikle grafen bazlı grafen oksit (GO) ve grafen nanoplatelets (GNP) ile hegzagonal bor nitrür (hBN) gibi nanoparçacıklar faz geçişi anında FDM'nin homojen kalmasını sağlayarak faz ayrımını önler ve supercooling derecesini azaltırlar. Böylece enerji depolama sistemlerinin verimlerinin artmasına yardımcı olurlar.

T-history yöntemi (Temperature History Method) ilk olarak 1999 yılında Yinping ve Yi tarafından önerilmiştir [7]. T-history yöntemi, gizli ısı depolama uygulamalarında kullanılan FDM'lerin erime sıcaklığı, katılaşma sıcaklığı ve supercooling dereceleri gibi termodinamik özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır [8]. Bu özellikleri belirlemek için günümüzde en çok tercih edilen ve oldukça gelişmiş olan DTA (diferansiyel termal analiz) ve DSC (diferansiyel taramalı kalorimetri) yöntemleridir. Fakat, bu yöntemlerde numuneler 1-20 mg arasında çok küçük miktarlarda kullanılmaktadır. Bu cihazlarla belirlenen termodinamik özellikler pratik uygulamalarla uyumlanmaktadır [7],[9],[10]. T-history yöntemi'nde ise DSC'de kullanılan numunelerin yaklaşık 1000 katı kadar numune kullanılarak ölçüm yapılmaktadır [9]. Özellikle FDM'lerin en büyük sorunlarından biri olan supercooling derecesini belirlemede T-history yöntemi ile daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Bu da endüstriyel uygulamalarda çok daha önemli bir konudur. T-history yöntemi'nde daha basit cihazlarla numunelerin zamanla sıcaklık değişimleri kaydedilerek faz değişiminin gerçekleştiği anlar gözlemlenmektedir [11],[12].

Rao ve ark., çalışmalarında DSC analizi ile elde edilen katılaşma sıcaklıklarının soğutma testi yöntemi ile elde edilenden farklı olabileceğini belirtmişlerdir. DSC analizinde kullanılan küçük miktarlardaki (miligram seviyesinde) malzeme ile aşırı soğuma derecesinin çok yüksek değerlerde olabileceğine değinmişlerdir [13]. Nagano ve ark., çalışmada aşırı soğuma derecelerinin belirlenebilmesi için en az birkaç on gramlık malzemenin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir [14]. Liu ve ark., SAT'a, termal performansını iyileştirmek amacıyla silisyum karbür (SC) ve bentonit ilave etmişlerdir. Elde ettikleri kompozit FDM'lerin termal kararlılıklarını ve termal enerji depolama performanslarını incelemişlerdir. Ayrıca ısıtılan numuneleri 20 °C sıcaklığındaki soğuk su banyosunda soğutarak ısı salma işlemi sırasındaki sıcaklıklarını kaydetmişlerdir. Sıcaklık verilerinden numunelerin aşırı soğutma derecelerini hesaplamışlardır. Saf SAT'ın aşırı soğuma derecesini 33.18 °C olarak, diğer kompozit FDM'lerin ise saf SAT'tan daha düşük olduğunu bulmuşlardır [15]. Rolka ve ark., üç farklı orta derecedeki erime sıcaklığına sahip faz değişim malzemelerinin termodinamik özelliklerini belirlemek için T-history yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada FDM olarak OM65 (65-68 °C), OM55 (54-57 °C) ve RT55 (54-57 °C) kullanılmıştır. Ayrıca FDM'lerin termal iletkenliklerini Poensgen boru aparatını kullanarak belirlemişlerdir. T-history yönteminde kullanılan örnekler yaklaşık olarak 1-2 gram arasındadır. Örneklerin erime ve katılaşma

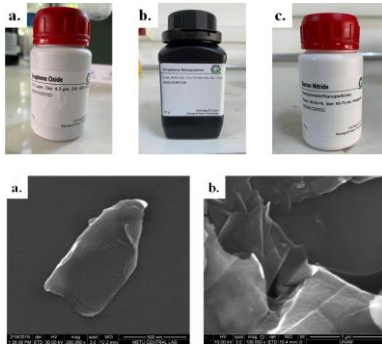
sıcaklıklarının, üretici firmanın verdiği değer ve analiz laboratuvarında elde edilen analiz sertifikasında belirtilen değerlerden daha farklı olduğunu bulmuşlardır [9]. Xu ve ark., SAT'ın termal özelliklerini T-history yöntemi ile gizli ısı depolama sistemi olmak üzere iki farklı yöntemle araştırmışlardır. Büyük ölçekli uygulamalarda performansı garantilemek için bu tür yöntemlerin FDM'lere uygulanması gerektiğinin önemini belirtmişlerdir [10]. Wang ve ark., SAT' ağırlıkça %1.5 disodyum hidrojen fosfat dodekahidrat ekleyerek aşırı soğuma derecesini 2.3 °C'ye kadar düşürmüşlerdir [16].

Daha önce yapmış olduğum çalışmada, SAT ve kompozitlerinin (Saf SAT, SAT/01GO, SAT/025GO, SAT/05GO, SAT/1GO, SAT/025GO/025hBN, SAT/025GO/075hBN, SAT/05hBN, SAT/025GO/025GNP, SAT/025GO/075GNP ve SAT/05GNP) termal özelliklerini inceleyerek sıcak içecekleri daha uzun süre sıcak tutabilecek yeni bir termos tasarımı yaparak bu numunelerin uygulaması yapılmıştır [17]. Önceki çalışmada SAT ve kompozitlerinin termofiziksel özellikleri DSC yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada ise, aynı kütle oranlarındaki numunelerden 10'ar gramlık numuneler hazırlanarak T-history yöntemi uygulanmıştır. T-history yönteminde, daha büyük numuneler kullanıldığı için geniş ölçekli ve pratik uygulamalarda bu malzemelerin gerçek davranışları daha ayrıntılı bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu yöntemle, her bir numunenin erime sıcaklık aralıkları ve supercooling dereceleri belirlenmiştir. Bu özelliklerin doğru bir şekilde tespit edilmesi enerji depolama sistemlerinin performansı açısından kritik öneme sahiptir.

Materyal ve Metot

Malzemeler

Nanoparçacık olarak kullanılan grafen oksit (GO, %99.8 saflıkta, 2-5 katmanlı, 4.5 µm çapında, 420 m²/g yüzey alanında), grafen nanoplatelet (GNP, %99.9 saflıkta, 3 nm kalınlığında, 1.5 µm çapında, 800 m²/g yüzey alanında) ve hekzagonal bor nitrür (hBN, ≥%99.85 saflıkta, 65-75 nm çapında, 2.3 g/cm³ yoğunluğunda) Nanografi Nano Teknoloji firmasından satın alınmıştır (Şekil 1). Faz değişim malzemesi olarak kullanılan sodyum asetat trihidrat (SAT, CH₃COONa·3H₂O, erime sıcaklığı 58 °C, ≥%99.5 saflıkta) Sigma Aldrich firmasından satın alınmıştır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan nanoparçacıklar ve SEM resimleri; **a.** Grafen Oksit (GO), **b.** Grafen Nanoplatelet (GNP) ve **c.** Hexagonal Bor Nitrür (hBN) [18],[19].

T-history metodu

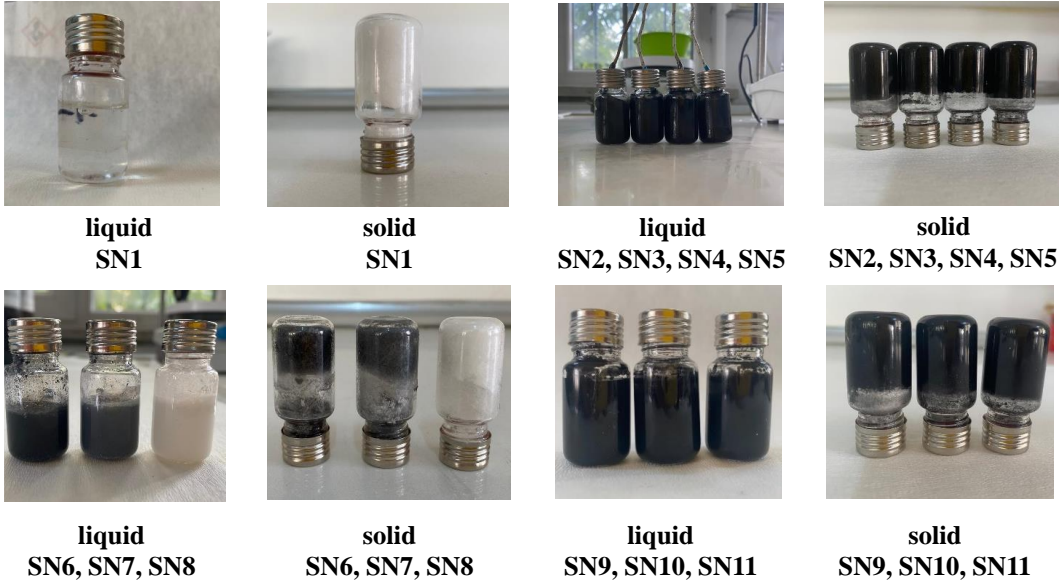
FDM'nin supercooling (aşırı soğuma) derecesi erime sıcaklığı ile katılma sıcaklığı arasındaki farka eşittir [20]. T-history yönteminde malzemelerin zamanla sıcaklık değişimleri kaydedilir. Öncelikle malzemeler, erime sıcaklığının üzerindeki sıcaklığa ısıtılır, daha sonra kontrollü şekilde soğutulur [2],[9],[21]. Malzemeler ısınma aşamasında dışarıdan ısı olarak sıcaklıklarını artırır, erime sıcaklığına geldiği anda sıcaklıkları sabit kalır ve erime işlemi tamamlandığında tekrardan sıcaklıkları yükselir. Sıcaklığın sabit kaldığı zaman aralığı malzemenin erime sıcaklık aralığını verir. Soğutma aşamasında da malzemenin sıcaklığı hızla azalır, faz değişim sıcaklığına geldiği anda sıcaklığı sabit kalır ve depoladığı ısıyı geri verir, daha sonra sıcaklığı tekrardan azalmaya başlar. Soğutma grafiğinde sıcaklığın sabit kaldığı aralık malzemenin katılma sıcaklığını verir.

Nanoparçacık katkılı kompozit faz değişim malzemelerinin hazırlanması

Deneylerde kullanılmak üzere her numuneden 10 gram hazırlanmıştır. Saf SAT ve farklı nanoparçacıklar ile geliştirilmiş SAT numunelerinin içerikleri Tablo 1'de verilmiştir. Numunelerin tartımı ±0.1 mg hassasiyete sahip Denver TP Serisi TP-214 marka elektronik hassas terazi kullanılarak yapılmıştır. Tablo 1'deki içeriklere göre hazırlanan SAT ve nanoparçacık numuneleri cam test tüplerine bırakılmış ve numaralandırılmıştır. Cam test tüplerinin içerisine manyetik balıklar atılarak ağızları sıkıca kapatılmış ve cam beher içindeki yağ banyosuna yerleştirilmiştir. Nanoparçacıkların SAT içerisinde homojen dağılımını sağlamak için Heidolph MR Hei-Tec Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı kullanılmıştır. Isıtıcılı manyetik karıştırıcı 20-300 °C sıcaklık aralığına, 100-1400 rpm hız ayarına ve ±%2 hassasiyete sahiptir. Cam beher içerisindeki numuneler öncelikle 90 °C sıcaklık ve 900 rpm hıza ayarlanmış ısıtıcılı manyetik karıştırıcıya yerleştirilmiştir. Numuneler tamamen eriyince karıştırıcı 1400 rpm hıza ayarlanarak 60 dakika boyunca hızlıca karıştırma işlemi uygulanmış ve homojen karışımlar elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin tümü Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 3'te ise numunelerin sıvı ve katı halleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Nanoparçacık katkılı sodyum asetat trihidrat (SAT) faz değişim malzemesinin kütle oranları

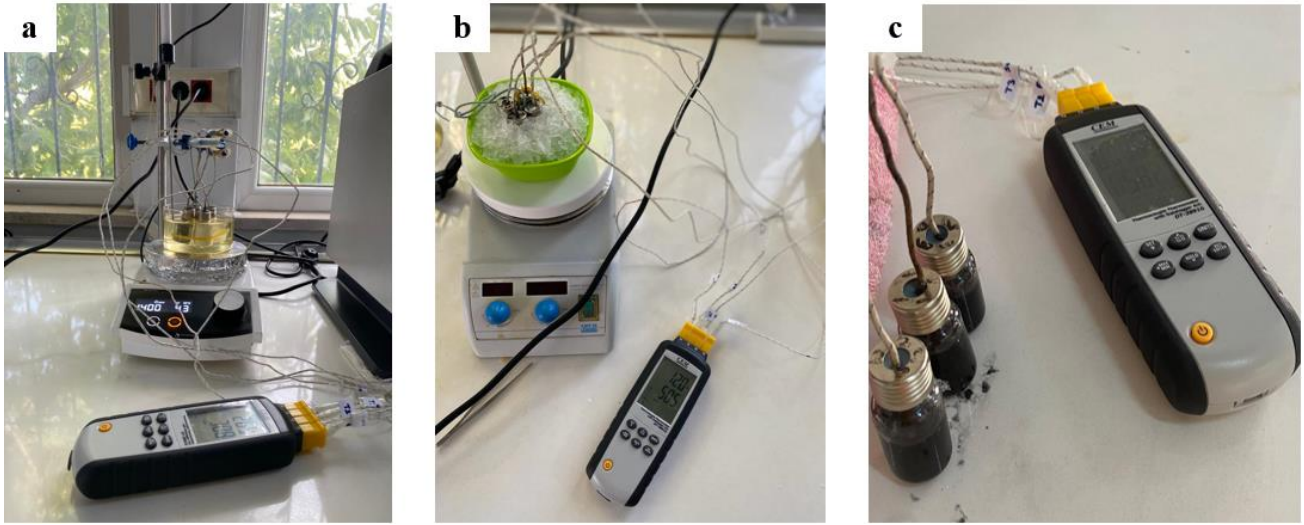
Numune No	Numune İsmi	İçeriği
SN1	Saf SAT	%100 SAT
SN2	SAT/01GO	%99.90 SAT + %0.1 GO
SN3	SAT/025GO	%99.75 SAT + %0.25 GO
SN4	SAT/05GO	%99.50 SAT + %0.50 GO
SN5	SAT/1GO	%99.00 SAT + %1 GO
SN6	SAT/025GO/025hBN	%99.50 SAT + %0.25 GO + %0.25 hBN
SN7	SAT/025GO/075hBN	%99.00 SAT + %0.25 GO + %0.75 hBN
SN8	SAT/05hBN	%99.50 SAT + %0.50 hBN
SN9	SAT/025GO/025GNP	%99.50 SAT + %0.25 GO + %0.25 GNP
SN10	SAT/025GO/075GNP	%99.00 SAT + %0.25 GO + %0.75 GNP
SN11	SAT/05GNP	%99.50 SAT + %0.50 GNP

**Şekil 2.** Supercooling deneyleri için hazırlanan numuneler**Şekil 3.** Saf SAT ve nanoparçacık ile geliştirilmiş SAT numunelerinin sıvı ve katı halleri. *SN1: Saf SAT, SN2: SAT/01GO, SN3: SAT/025GO, SN4: SAT/05GO, SN5: SAT/1GO, SN6: SAT/025GO/025hBN, SN7: SAT/025GO/075hBN, SN8: SAT/05hBN, SN9: SAT/025GO/025GNP, SN10: SAT/025GO/075GNP, SN11: SAT/05GNP.*

Deneysel yöntem

Deneysel çalışma için her bir FDM numunesinden (SN1–SN11) 10 gram hazırlanmıştır. Cam test tüplerine bırakılan FDM numunelerinin tam ortasına K tipi termokupl yerleştirilmiş ve hava alması engellenerek izole edilmiştir. Deneylerde kullanılan K-Tipi Termokupl 0-200 °C sıcaklık ölçümüne ve ± 0.5 °C hassasiyete sahiptir. Daha sonra termokupllar, -200 ile 1372 °C sıcaklık ölçüm aralığına ve ± 1 °C hassasiyete sahip CEM DT-3891G marka 4 kanallı Datalogger cihazına bağlanmıştır. Çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 6'da verilmiştir. Cam test tüplerindeki numuneler gruplara ayrılarak (GO'lu, GNP'li, hBN'li ve saf SAT) silindirik cam beher içindeki yağ banyosuna

birakılmıştır. Cam beher, 90 °C sıcaklığa ayarlanan ısıtıcı manyetik karıştırıcıya yerleştirilmiştir (Şekil 4-a). Isıtma işlemi ve sıcaklık kayıt işlemi eş zamanlı başlatılmıştır. Numunelerin sıcaklıkları 90 °C'yi gösterdiğinde ısıtma işlemi durdurulmuştur. Daha sonra ısınan numunelere ilk yöntem olan hızlı soğutma yöntemi uygulanmıştır [21]. Bunun için, 90 °C sıcaklığındaki numuneler yaklaşık 0 °C civarındaki buz dolu bir kaba aniden bırakılarak sıcaklıkları kaydedilmiştir (Şekil 4-b). Daha sonra tekrardan 90 °C sıcaklığa ısıtılan numunelere ikinci yöntem olan yavaş soğutma yöntemi uygulanmıştır. Yavaş soğutma yönteminde ise 90 °C sıcaklığındaki numuneler 20 °C civarındaki oda sıcaklığına bırakılmıştır (Şekil 4-c). Numunelerin yavaşça soğuma sırasındaki sıcaklıkları kaydedilmiştir.



Şekil 4. Isıtma (a), hızlı soğutma (b) ve yavaş soğutma (c) deney aparatı

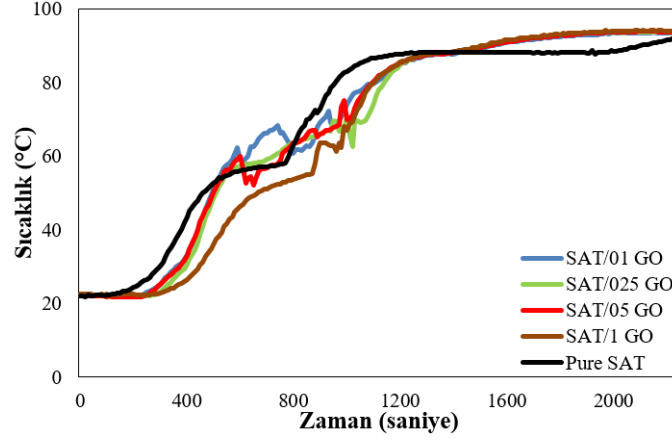
Bulgular ve Tartışma

Tuz hidrat FDM'lerin çoğunluğunda aşırı soğuma davranışı görülmektedir. Aşırı soğuma davranışı gösteren FDM'ler, faz değişim sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta katılaşmaktadır. Bu durum, FDM içerisinde depolanan enerjinin istenen sıcaklıkta dışarı salınmasını engellemektedir. Bunu engellemek için saf SAT'a katkı maddesi olarak nanoparçacıklar eklenmiştir. Çalışmada, farklı oranlardaki katkı maddelerini içeren sodyum asetat trihidrat (SAT) bazlı faz değişim malzemelerinin ısınma, yavaş soğutma ve hızlı soğutma davranışları T-history yöntemi ile incelenmiştir. Nanoparçacıklar hem ayrı ayrı (GO, GNP, hBN) hem de hibrit şekilde (GO-hBN, GO-GNP) sodyum asetat trihidrat FDM'sine katkı maddesi olarak ilave edilmiştir. T-history yöntemi ile elde edilen zamana göre sıcaklık değişimleri, numunelerin termal özelliklerini ve soğutma hızına (yavaş ve hızlı) verdikleri tepkileri ortaya koymaktadır. Isıtma, yavaş soğutma ve hızlı soğutma süreçleri karşılaştırılarak nanoparçacıkların ve soğutma hızının SAT'ın supercooling davranışı ve termal stabilitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. GO'lu, GNP'li ve hBN'li numunelerin sıcaklık değişimleri her grup için aynı anda ölçülmüştür. Numunelerin erime ve katılaşma döngüleri için 3 tekrar yapılmıştır. Isıtma ve hızlı soğutma deneyinde 10 saniye aralıklarla, yavaş soğutma deneyinde ise 1 dakika aralıklarla sıcaklıklar kaydedilmiştir.

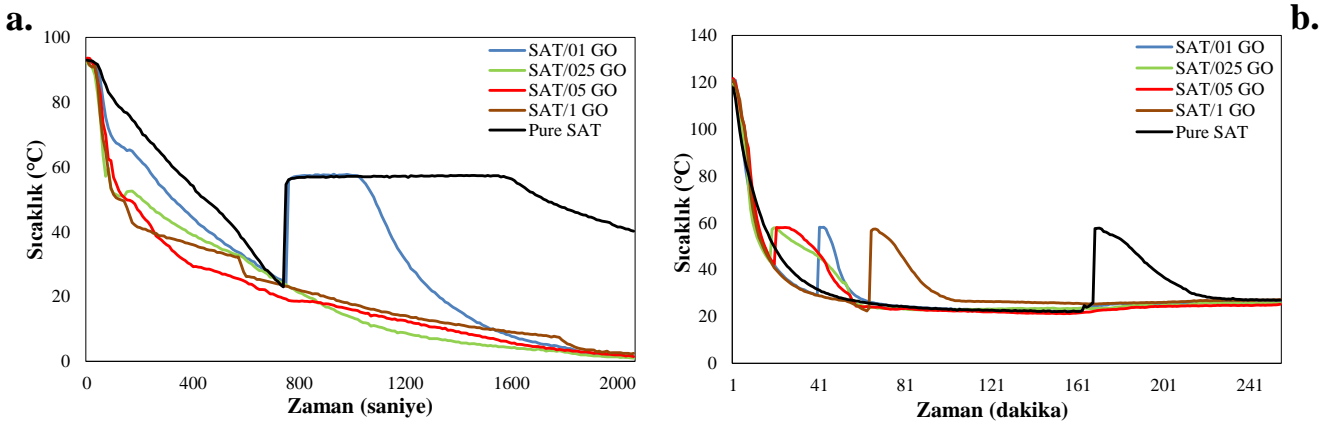
Saf SAT ve farklı oranlarda GO ile zenginleştirilmiş numunelerin ısınma ve soğuma davranışları sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekillerde farklı GO oranlarının SAT'ın termal davranışı üzerindeki etkileri gözlemlenmektedir. Yaklaşık 20 °C civarındaki oda sıcaklığında bulunan numunelerin sıcaklıklarının artırılmasıyla Şekil 5'te görülen ısıtma eğrileri ortaya çıkmıştır. GO oranlarının artması, ısıtma eğrilerinde farklılıklara neden olmuştur. Saf SAT'ın erime sıcaklık aralığının 57.1-58 °C civarında olduğu belirlenmiştir. GO katkısı numunelerin erime sıcaklığında değişikliklere neden olmuştur. Düşük GO katkıları ile SAT'ın erime sıcaklık aralığı korunurken, %1 gibi yüksek GO içeren SAT numunesi daha geniş sıcaklık aralığında erime davranışı göstermiştir. Isınma grafiğinde görüldüğü gibi GO, SAT'ın termal iletkenliğini artırarak ısının daha hızlı iletilmesini sağlamıştır. GO oranının artmasıyla ısı transfer hızının arttığı ve dolayısıyla numune sıcaklığının da hızla arttığı görülmektedir. %0.1, 0.25 ve 0.5 gibi düşük GO içeren numunelerde faz geçişi sırasında sıcaklık eğrisi saf SAT'a benzer ve daha kontrollü iken, %1 GO katkısının olduğu numunenin faz geçişinde sapmalar olduğu açıktır. Bu da, yüksek GO oranının malzemenin yapısını etkilediğini ve homojen dağılımı engellediğini göstermektedir. Bu nedenle de sıcaklık değişiminde dalgalanmaların oluşmasına ve sıcaklık kontrolünün zorlaşmasına yol açmıştır. Ayrıca, Şekil 5'te görüldüğü gibi %1 GO içeren numune 55.1 °C gibi

düşük sıcaklıklarda erimeye başlamış ve 58.2 °C'de erimeyi tamamlamıştır. Bu da, yüksek GO miktarının faz geçişinde kararsızlık oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Farklı oranlarda GO'nun kullanıldığı numunelerin hızlı ve yavaş soğutma işlemlerindeki zamana göre sıcaklık değişimi sırasıyla Şekil 6-a ve Şekil 6-b'de verilmiştir. Grafikler hızlı ve yavaş soğutmanın FDM'nin deşarjı üzerindeki etkisini göstermektedir. Soğuma grafiklerinde görüldüğü gibi, FDM katılaşmaya başladığı anda sıcaklığını aniden yükseltir. Bir noktaya kadar artan sıcaklık daha sonra tekrar düşmeye başlar ve katı faz elde edilir [11]. Hızlı soğuma grafiğinde, GO katılı numunelerin sıcaklıklarının aniden düştüğü, saf SAT'ın ise daha yavaş düştüğü görülmektedir. SAT/01 GO, SAT/025 GO, SAT/05 GO, SAT/1 GO ve saf SAT numunelerinin sıcaklıklarının yaklaşık olarak 58 °C sıcaklığa düşme süreleri sırasıyla 240 sn, 70 sn, 100 sn, 80 sn ve 340 sn'dir. Saf SAT hızlı soğuma sırasında 740. sn'de sıcaklığını 23 °C'ye kadar düşürmüştür ve aşırı soğumaya uğrayarak faz değişimi gerçekleşmemiştir. Daha sonra katılaşma işlemi başlamış ve sıcaklığını aniden 57.4 °C'ye kadar arttırmıştır. Yaklaşık olarak 1600 saniyeye kadar bu sıcaklıklarda kalmış ve tamamen katılaşmıştır. Tamamen

katılaştıktan sonra sıcaklığı düşmeye devam etmiştir. Şekil 6-a'da görüldüğü gibi %0.5 ve 1 GO katkıların olduğu numunelerde katılaşma gözlemlenmemiştir. SAT/01 GO, 750. sn'de sıcaklığını 24.1 °C'ye kadar düşürmüştür ve daha sonra katılaşmaya başlayarak sıcaklığını 57.8 °C'ye kadar arttırmıştır. SAT/025 GO ise 70. sn'de 57.1 °C'ye düşmüş ve aniden katılaşma işlemi başlayarak 59.7 °C'ye sıcaklığını arttırmıştır. Şekil 6-b'de verilen yavaş soğutma grafiğinde, bütün numunelerin supercooling etkisinin olduğu açıktır. Yavaş soğutma işleminde saf SAT'ın aşırı soğumaya uğrayarak sıcaklığını 22 °C'ye kadar düşürdüğü, daha sonra katılaşma işleminin başlamasıyla 57.7 °C'ye kadar sıcaklığını arttırdığı gözlemlenmektedir. Yavaş soğutma sırasında en düşük supercooling derecesi %0.25 GO katkısı ile SAT/025 GO numunesinde elde edilmiştir. Düşük GO oranları malzemenin kristalleşmesini teşvik ederek, supercooling etkisini saf SAT'a göre azaltmıştır. Fakat %1 GO malzemenin kristalleşmesini olumsuz etkileyerek supercoolingini arttırmıştır. Yavaş soğutma işlemi malzemelerin supercooling etkisini azaltırken, hızlı soğuma arttırmış hatta bazı malzemelerin kristalleşmeye başlamasını da önlemiştir.



Şekil 5. SAT ve GO kompozitlerinin ısıtma eğrileri



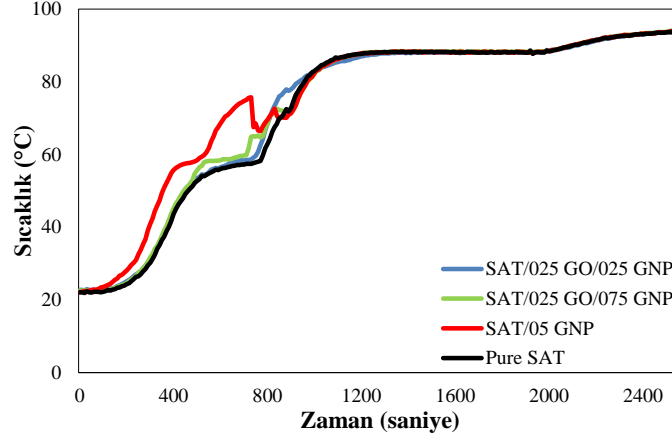
Şekil 6. SAT ve GO kompozitlerinin hızlı soğutma (a) ve yavaş soğutma (b) eğrileri

GO ve GNP katılı SAT kompozitlerinin ısınma, hızlı soğutma ve yavaş soğutma işlemlerindeki zamana göre sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, yalnız %0.5 GNP katkısı SAT'ın erime sıcaklık aralığını genişletmiştir. Ayrıca faz geçişini kararsızlaştırmıştır. GO ve GNP kombinasyonu

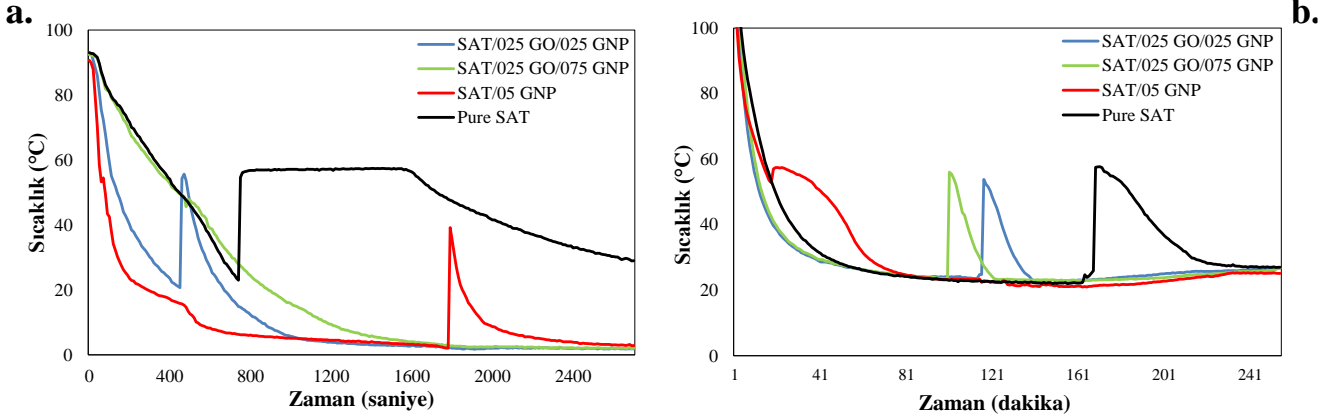
ise SAT'ın, daha düzgün bir faz geçiş davranışı sergilemesini sağlamıştır. Fakat GNP miktarının artmasıyla SAT'ın termal stabilitesinin azaldığı açıktır. Şekil 8-a'da kompozit FDM'lerin hızlı soğuma işlemi sırasındaki sıcaklık değişimleri verilmiştir. SAT/025 GO/025 GNP, SAT/025 GO/075 GNP, SAT/05 GNP ve saf SAT'ın hızlı soğuma

işlemi sırasında 58 °C sıcaklığa düşme süreleri sırasıyla 100 sn, 320 sn, 50 sn ve 340 sn'dir. Hızlı soğutma işleminde supercooling etkisi en düşük SAT/025 GO/075 GNP, en yüksek SAT/05 GNP numunesinde görülmüştür. Yavaş soğutma eğrisinde ise en düşük supercooling etkisi SAT/05

GNP'de, en yüksek SAT/025 GO/075 GNP'de görülmüştür (Şekil 8-b). Hızlı ve yavaş soğutma eğrilerinden de anlaşıldığı üzere soğutma işleminin uygulama şekli, supercooling derecesi ve FDM'nin kristalleşmesi üzerinde çok fazla etkiye sahiptir.



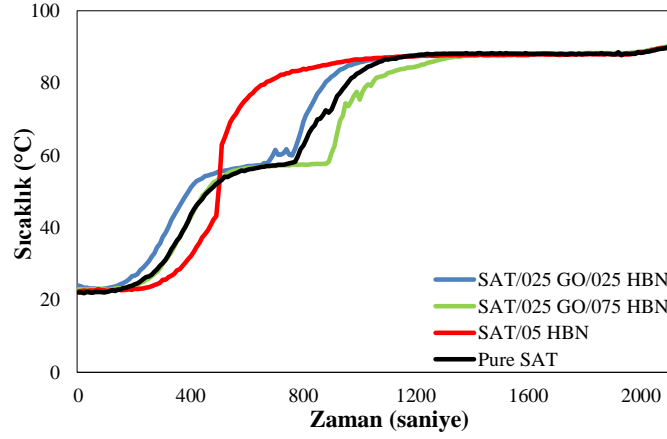
Şekil 7. SAT, GO ve GNP kompozitlerinin ısıtma eğrileri



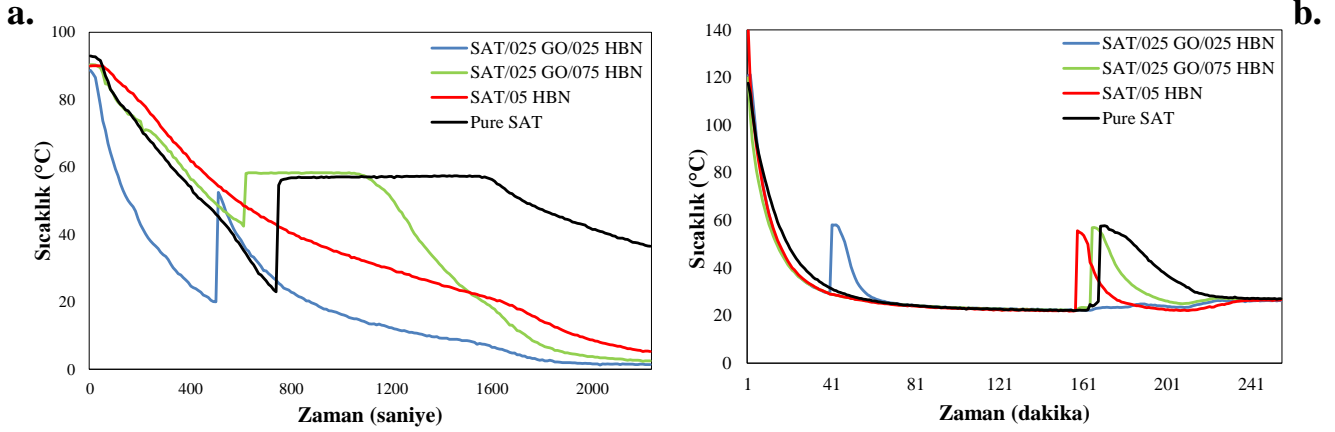
Şekil 8. SAT, GO ve GNP kompozitlerinin hızlı soğutma (a) ve yavaş soğutma (b) eğrileri

Şekil 9 ve Şekil 10'da SAT, GO ve hBN kompozit FDM'lerinin ısınma, hızlı ve yavaş soğutma anındaki sıcaklık değişimleri verilmiştir. Yalnız %0.5 hBN katkısı (SAT/05 hBN) SAT'ın erime sıcaklığını çok fazla etkilemiş ve 42 °C'lere kadar düşürmüştür. Fakat GO ve hBN'nin birlikte kombine edilmesi SAT'ın erime sıcaklığını değiştirmemiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi SAT/05 hBN numunesinin erime davranışında kararsızlık meydana gelmiştir. GO ve hBN kombinasyonu SAT'ın daha düzgün bir faz geçiş davranışı sergilemesini sağlamıştır. SAT/025

GO/025 hBN, SAT/025 GO/075 hBN, SAT/05 hBN ve saf SAT'ın hızlı soğutma işlemi sırasında 58 °C sıcaklığa düşme süreleri sırasıyla 110 sn, 380 sn, 550 sn ve 340 sn'dir (Şekil 10-a). Hızlı soğutma işleminde, yalnız %0.5 hBN katkısının olduğu SAT numunesinde katılaşma olmamış ve supercooling'e uğramıştır. Şekil 10-a'da, saf SAT'a göre en düşük supercooling etkisi SAT/025 GO/075 hBN'de görülmüştür. Şekil 10-b'deki yavaş soğutma eğrisinde, bütün numunelerin supercooling etkisi gösterdiği anlaşılmaktadır. En erken supercooling'e uğrayan ve en düşük etkiyi gösteren SAT/025 GO/025 hBN numunesi olmuştur.



Şekil 9. SAT, GO ve hBN kompozitlerinin ısıtma eğrileri



Şekil 10. SAT, GO ve hBN kompozitlerinin hızlı soğutma (a) ve yavaş soğutma (b) eğrileri

Isınma ve soğuma grafikleri verilen kompozit FDM'lerin, erime sıcaklık aralıkları Tablo 2'de verilmiştir. Nanoparçacığın türü ve oranına göre erime sıcaklık aralığının değiştiği görülmektedir. %0.1 ve %0.25 gibi düşük GO katkısı saf SAT'ın erime sıcaklık aralığını çok fazla değiştirmezken, yüksek GO katkısı SAT'ın kristalleşmesini etkileyerek erime sıcaklığını 55-56 °C'lere kadar düşürmüştür. SAT/025GO/025hBN ve SAT/025GO/075hBN numunelerinde görüldüğü gibi GO ve hBN kombinasyonu ile saf SAT'ın erimeye başladığı sıcaklık, 57.1 °C'de sabit tutulmuştur. Ayrıca GO ve hBN kombinasyonu ile erime sıcaklık aralığı daraltılmış ve termal stabilite sağlanmıştır. Fakat, yalnız ve %0.5 gibi yüksek oranlı hBN katkısı ile erime sıcaklığında çok fazla düşüş meydana gelmiştir. Bu da SAT'ın kimyasal yapısının bozulduğunu ve erimenin çok erken başladığını göstermektedir. GO ve GNP kombinasyonu ile en yüksek erime sıcaklığı elde edildiği görülmektedir. %0.5 GNP katkısının bulunduğu SAT/05GNP numunesinin erime sıcaklık aralığı saf SAT'a benzerdir. Bu durum, düşük oranlı GO ile GNP kombinasyonunun erime sıcaklığını daha kararlı bir aralıkta tutabildiğini göstermektedir.

Tablo 2. Saf SAT ve kompozitlerinin erime sıcaklık aralıkları

Numune No	Numune İsmi	Erime Sıcaklık Aralığı
SN1	Saf SAT	57.1 – 58.2 °C
SN2	SAT/01GO	57.6 – 58.7 °C
SN3	SAT/025GO	57.4 – 58.6 °C
SN4	SAT/05GO	56.6 – 57.8 °C
SN5	SAT/1GO	55.1 – 58.2 °C
SN6	SAT/025GO/025hBN	57.1 – 57.3 °C
SN7	SAT/025GO/075hBN	57.1 – 57.7 °C
SN8	SAT/05hBN	42.2 – 43.2 °C
SN9	SAT/025GO/025GNP	58.3 – 58.6 °C
SN10	SAT/025GO/075GNP	58.2 – 58.7 °C
SN11	SAT/05GNP	57.1 – 58.4 °C

FDM'lerin farklı koşullardaki soğuma deneylerinden elde edilen supercooling derecelerinin karşılaştırılması Tablo 3'te verilmiştir. Soğuma koşullarının farklılaşmasıyla supercooling derecelerinin değiştiği açıktır. Saf SAT'ın supercooling derecesi hızlı soğutma koşulunda 34.4 °C iken, yavaş soğutmada 35.7 °C olarak elde edilmiştir. Hızlı soğutma koşulunda, GO katkı oranının artmasıyla FDM'de kristalleşme başlamamış, aşırı soğumaya uğramış ve katılaşma görülmemiştir. Her iki soğutma koşulunda da en düşük supercooling derecesi %0.25 katkı oranıyla SAT/025GO'da elde edilmiştir. %0.5 hBN katkı oranına sahip SAT/05hBN'de katılaşma oluşmamıştır. Fakat GO ve hBN kombinasyonu ile her iki koşulda da saf SAT'a göre

daha düşük supercooling dereceleri elde edilmiştir. En düşük supercooling derecesi, hızlı soğutma koşulunda 2.3 °C ile SAT/025GO/075GNP numunesine, yavaş soğutma koşulunda ise 4.6 °C ile SAT/05GNP numune aittir. En

yüksek supercooling derecesi, hızlı soğutma koşulunda 37.1 °C ile SAT/05GNP, yavaş soğutma koşulunda 34.9 °C ile SAT/025GO/075hBN numunesine aittir.

Tablo 3. Saf SAT ve kompozitlerinin hızlı ve yavaş soğutma tekniği ile elde edilen aşırı soğuma dereceleri

Numune No	Numune İsmi	Supercooling Derecesi (hızlı soğutma)	Supercooling Derecesi (yavaş soğutma)
SN1	Saf SAT	34.4 °C	35.7 °C
SN2	SAT/01GO	33.7 °C	28.9 °C
SN3	SAT/025GO	2.6 °C	14.3 °C
SN4	SAT/05GO	Katılma gözlemlenmedi	15.7 °C
SN5	SAT/1GO	Katılma gözlemlenmedi	35.1 °C
SN6	SAT/025GO/025hBN	32.5 °C	28.9 °C
SN7	SAT/025GO/075hBN	15.9 °C	34.9 °C
SN8	SAT/05hBN	Katılma gözlemlenmedi	33.8 °C
SN9	SAT/025GO/025GNP	34.9 °C	30.3 °C
SN10	SAT/025GO/075GNP	2.3 °C	32.5 °C
SN11	SAT/05GNP	37.1 °C	4.6 °C

Sonuç

FDM'lerin enerji depolama uygulamalarında kullanılabilmesi için termal özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. DSC ve T-history yöntemi, termal özelliklerin belirlenmesinde en çok tercih edilen yöntemlerdir. DSC ölçümlerinde 1-20 mg gibi çok az miktarlarda numuneler kullanıldığı için elde edilen bilgiler pratik uygulamalarda kullanımı sınırlamaktadır. T-history yönteminde ise DSC ile aynı termofiziksel özellikler belirlenmekte olup gram seviyelerinde çok daha büyük numuneler kullanılmaktadır. Bu nedenle, pratik uygulamalar için T-history yöntemi daha doğru ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Ayrıca bu yöntemde, DSC'deki gibi maliyetin yüksek olması, kullanılan malzeme miktarının sonuçları etkilemesi gibi kısıtlamalar da bulunmamaktadır. T-history yönteminde daha basit ve pratik laboratuvar cihazları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, saf SAT ve farklı nanoparçacıklar ile geliştirilmiş SAT'ın pratik uygulamalarda kullanımı sırasında gerçek erime sıcaklık aralıkları ve supercooling dereceleri belirlenmiştir. Bu değerler *T-history metodu* kullanılarak elde edilmiştir. Numunelere hızlı ve yavaş olmak üzere iki farklı soğutma yöntemi uygulanmıştır. FDM'lerin soğutma koşullarının supercooling derecelerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen aşağıda sıralanmıştır.

- GO'nun düşük miktarda kullanılması malzemenin termal stabilitesini korurken, yüksek miktarları erime davranışında düzensizliklere ve erimenin daha erken başlamasına neden olmuştur. Bu durum, enerji depolama uygulamalarında malzemenin termal kararlılığının sağlanması ve daha homojen bir faz geçişinin oluşabilmesi için GO miktarının düşük oranlarda kullanılması gerektiğini göstermektedir.

- GO ve GNP kombinasyonu SAT'ın faz değişim sıcaklık aralığını daha dar tutarak termal kararlılık sağlamıştır. Fakat, yalnız GNP ilavesiyle bu aralık genişlemiş ve kararsızlık oluşmuştur.
- Supercooling derecesi ve termal stabilite üzerinde GNP tek başına çok fazla etkili olmazken, GO ve GNP nanoparçacıklarının birlikte kombine edilmesi SAT üzerinde çok olumlu etkiler oluşturmuştur.
- Yalnız yüksek oranda hBN ilavesi erime sıcaklığını, saf SAT'a göre çok fazla azaltmıştır. Fakat GO ve hBN kombinasyonu ile faz değişim sıcaklık aralığı daha dar tutulmuş ve saf SAT'a daha yakın erime sıcaklığı elde edilmiştir.
- Soğutma koşuluna göre supercooling dereceleri farklılaşmıştır.
- GO katkı oranının artmasıyla FDM'lerin kristal yapısı bozularak supercooling dereceleri olumsuz yönde etkilenmiştir.
- GO katkı oranları arasında, supercooling derecelerinde en fazla düşüş %0.25 katkı oranıyla SAT/025GO numunesinde elde edilmiştir.
- Yalnız %0.5 hBN katkısıyla supercooling derecesi olumsuz yönde etkilenmiştir. Hızlı soğutma koşulunda malzemenin katılmasını önlerken, yavaş soğutma koşulunda 33.8 °C ile yüksek supercooling derecesine neden olmuştur.
- En yüksek supercooling derecesi, hızlı soğutma koşulunda 37.1 °C ile SAT/05GNP, yavaş soğutma koşulunda 34.9 °C ile SAT/025GO/075hBN numunesine aittir.
- En düşük supercooling derecesi, hızlı soğutma koşulunda 2.3 °C ile SAT/025GO/075GNP numunesine, yavaş soğutma koşulunda ise 4.6 °C ile SAT/05GNP numune aittir.

Kaynaklar

- [1] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, 2009.
- [2] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, "Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 336-342, 2012.
- [3] B. Stutz, N. Le Pierres, F. Kuznik, K. Johannes, E. P. Del Barrio, J.P. Bedecarrats, S. Gibout, P. Marty, L. Zalewski, J. Soto, N. Mazet, R. Olives, J.J. Beziau, D.P. Minh, "Storage of thermal solar energy," *Comptes Rendus Physique*, vol. 18, no. 7-8, pp. 401-414, 2017.
- [4] W. Hua, X. Zhang, M. J. Muthoka, X. Han, "Preparation and performance analysis of modified sodium acetate trihydrate," *Materials*, vol. 11, no. 6, pp. 1016, 2018.
- [5] D. Zhou, C. Zhao, Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 593-605, 2012.
- [6] G. Zhou, Y. Xiang, "Experimental investigations on stable supercooling performance of sodium acetate trihydrate PCM for thermal storage," *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1261-1272, 2017.
- [7] Z. Yinping, J. Yi, "A simple method, the-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials," *Measurement Science and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 201, 1999.
- [8] J. M. Marín, B. Zalba, L. F. Cabeza, H. Mehling, "Determination of enthalpy-temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties," *Measurement science and technology*, vol. 14, no. 2, pp. 184, 2003.
- [9] P. Rolka, R. Kwidzinski, T. Przybylinski, A. Tomaszewski, "Thermal Characterization of Medium-Temperature Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage Using the T-History Method," *Materials*, vol. 14, no. 23, pp. 7371, 2020.
- [10] T. Xu, S. N. Gunasekara, J. N. Chiu, B. Palm, S. Sawalha, "Thermal behavior of a sodium acetate trihydrate-based PCM: T-history and full-scale tests," *Applied Energy*, vol. 261, pp. 114432, 2020.
- [11] H. Hong, S. K. Kim, Y. Kim, "Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials," *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, no. 4, pp. 360-366, 2004.
- [12] J. H. Peck, J. J. Kim, C. Kang, H. Hong, "A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method," *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 7, pp. 1225-1232, 2006.
- [13] P. K. V. Rao, B. Raghu Kumar, A. Saiteja, N. S. V. Srikar, V. Sreenivasulu, D. Adithya Prakash, "Experimental investigation of thermal stability of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix using TGA-DSC analysis," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 8, no. 3, pp. 161-168, 2018.
- [14] K. Nagano, K. Ogawa, T. Mochida, K. Hayashi, H. Ogoshi, "Thermal characteristics of magnesium nitrate hexahydrate and magnesium chloride hexahydrate mixture as a phase change material for effective utilization of urban waste heat," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 2-3, pp. 221-232, 2004.
- [15] C. Liu, P. Hu, Z. Xu, X. Ma, Z. Rao, "Experimental investigation on thermal properties of sodium acetate trihydrate based phase change materials for thermal energy storage," *Thermochimica Acta*, vol. 674, pp. 28-35, 2019.
- [16] C. Wang, S. Wang, P. Liu, X. Cheng, Z. Wang, "Improvement of the Subcooling Problem of Sodium Acetate Trihydrate by a Combination of Stirring or Internal Electric Field and Nucleating Agent," *Journal of Thermal Science*, vol. 33, no. 6, pp. 2235-2244, 2024.
- [17] S. Kılıçkap Işık, "Optimizing thermal performance of sodium acetate trihydrate phase-change-materials through synergistic effects of binary graphene nanoadditives for prolonged hot beverage maintenance," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 105187, 2024.
- [18] Grafen oksit, Nanografi, Türkiye, 2024. Available: <https://nanografi.com/popular-products/graphene-oxide-2-5-layer-dia-4-5-m-sa-420-m2-gr?value=1>
- [19] Grafen nanoplatelets, Nanografi, Türkiye, 2024. Available: <https://nanografi.com/graphene/graphene-nanoplatelet-purity-99-9-size-3-nm-s-a-800-m2-g-dia-1-5-m?value=1>
- [20] L. Wu, J. Li, H. Wang, Y. Zhang, S. Feng, Y. Guo, J. Zhao, X. Wang, L. Guo, "Experimental investigation on mechanism of latent heat reduction of sodium acetate trihydrate phase change materials," *Materials*, vol. 13, no. 3, 584, 2020.
- [21] S. Kılıçkap Işık, E. El, "Experimental investigation of distilled water production performance of conventional solar stills using $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ phase change material reinforced with $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and graphene-based nanoparticles," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 105184, 2024.



Kafes yapılı femur plakların stres kalkanı üzerindeki etkisinin sonlu elemanlar ile incelenmesi

Investigation of the effect of lattice-structured femoral plates on stress shielding using finite elements

Ömer Faruk Uzunyol¹, Erkan Bahçe²

¹İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 44200, Malatya/Türkiye,

omerfaruk.uzunyol@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8313-8747>

²İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 44200, Malatya/Türkiye, erkan.bahce@inonu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5389-5571>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25 Kasım 2024
Revizyon 6 Ocak 2025
Kabul 10 Ocak 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

Plak, Stres Kalkanı, Kafes Yapı,
Sonlu Eleman Analizi.

ÖZ

İmplant tasarımında uzun vadeli performansın sağlanabilmesi için son yıllarda kafes yapılara olan rağbet artmaktadır. Kafes yapılar sahip olduğu yüksek gözeneklilik özelliği sayesinde implantın elastisite modülünü düşürerek kemik ile implant arasında oluşan stres kalkanının azalmasını sağlar. Gözenekli yapı kontrollü mekanik özellikleri sayesinde, yük dağılımını optimize eder ve kemiğin fizyolojik yüklenme kapasitesini korur. Bu durum hem hasta sonuçlarını iyileştirme hem de sağlık hizmetleri maliyetlerini düşürme açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada da femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plaklardaki stres kalkanını azaltmak için plağın yarı kalınlığı gözenekli olarak üretildi. Kemiğin kafes yapıya kaynaşmasını önlemek ve tedavi sonrası plağın rahatlıkla çıkarılması için alt katmanı katı olarak oluşturuldu, plağın üst katmanı ise Gövde Merkezli Kübik (BCC), Elmas ve Octet Truss (OT) kafes yapıları ile ayrı ayrı tasarlandı. Daha sonra elde edilen plakların geleneksel olarak kullanılan Katı Plak (KP) ile karşılaştırılması için sonlu eleman analizi uygulandı. Deformasyon ve gerilme değerlerinin incelendiği analizlerde KP modelinin 1.9996 mm deformasyon değerine karşılık BCC-Elmas, BCC-OT ve Elmas-OT kafes yapıları plak modellerinde sırasıyla 1.3331 mm, 1.153 mm ve 1.0542 mm deformasyon hesaplanmıştır. Maksimum gerilme değerlerinde ise KP modelinde 500,81 MPa gerilme değeri ölçülürken BCC-Elmas kafes yapıları plak modelinde 309.78 MPa ile % 61.66 oranında, BCC-OT kafes yapıları plak modelinde 298.88 MPa ile %72.76 oranında ve Elmas-OT kafes yapıları plak modelinde 253.64 MPa ile %97.44 oranında KP'a göre daha az gerilme saptanmıştır. Bu sonuçlar kafes yapıları plakların KP'a nispeten daha gelişmiş yük taşıma kapasitesine sahip olduğuna işaret etmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 November 2024
Received in revised form 6 January 2025
Accepted 10 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Plate, Stress Shield, Lattice
Structure, Finite Element Analysis

Doi: 10.24012/dumf.1588755

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In recent years, the demand for lattice structures has risen to assure the long-term efficacy of implant design. Due to their high porosity, lattice structures diminish the elastic modulus of the implant and alleviate the stress shielding between the bone and the implant. The controlled mechanical features of the porous structure enhance load distribution and maintain the physiological loading capacity of the bone. This possesses significant potential for enhancing patient outcomes and decreasing medical costs. This work involved the production of a half-thickness porous plate to decrease the stress shielding in plates utilized for femur fracture therapy. The lower layer was built as solid to inhibit bone fusion with the lattice structure and facilitate the removal of the plate post-treatment, whilst the top layer of the plate was developed independently using Body Centered Cubic (BCC), Diamond, and Octet Truss (OT) cage structures. Subsequently, finite element analysis was employed to compare the acquired plates with the customarily utilized Solid Plate (KP). In the analyses of deformation and stress values, the KP model exhibited a deformation of 1.9996 mm, while the BCC-Diamond, BCC-OT, and Diamond-OT lattice structured plate models demonstrated deformations of 1.3331 mm, 1.153 mm, and 1.0542 mm, respectively. In terms of maximum stress values, the KP model exhibited a stress value of 500.81 MPa. In contrast, the BCC-Diamond lattice structured plate model demonstrated a 61.66% reduction in stress at 309.78 MPa, the BCC-OT lattice structured plate model showed a 72.76% decrease with 298.88 MPa, and the Diamond-OT lattice structured plate model revealed a 97.44% reduction at 253.64 MPa compared to the KP model. The results demonstrate that lattice-structured plates possess a comparatively enhanced load-bearing performance relative to KP.

Giriş

Plaklar femur kırıklarının tedavisinde stabilitenin sağlaması ve iyileşmeyi desteklemesi itibarıyla oldukça tercih edilmektedir [1]. Komplikasyon sıklığını azaltarak tedavi sürecini kısaltan plaklar kemik bütünlüğünün yeniden oluşmasına imkân tanır [2]. Ancak kemik ile plak arasında elastik modül farkından dolayı meydana gelen stres kalkanı plakların etkinliğini olumsuz yönde etkilemektedir [3]. Bu sebepten ötürü stres kalkanını azaltmak için çeşitli plak tasarımları geliştirilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise stres kalkanını azaltmanın yanı sıra plağın yoğunluğunu ve ağırlığını minimum düzeyde tutmak için kafes yapılar tercih edilmektedir.

Femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plakların sertliği arttıkça yükün önemli bir kısmının plak üzerinde yoğunlaştığı bilinmektedir. Stres kalkanı olarak adlandırılan bu durum mekanik uyumsuzluklara sebebiyet vererek plağın gevşemesine ve periprostetik kırıkların oluşumuna neden olur [4]. Stres kalkanı kortikal kemiğin mukavemetini azaltarak plağın aseptik hareketlerine neden olabilir [5]. Plak malzemesi ve kemik özelliklerine bağlı olarak değişen stres kalkanının azaltılması kemik-plak arasındaki mekanik uyuma önemli ölçüde bağlıdır [6,7]. Özellikle son yıllarda trend haline gelen Eklemeli İmalat teknolojilerinin kafes yapıların üretimini mümkün kılması ile plaklar kafes yapılı olarak üretilmeye başlanmıştır [8]. Kafes yapılar sahip olduğu yüksek gözeneklilik özelliği sayesinde yükün plak üzerinde daha homojen bir şekilde yayılmasına izin vererek stres kalkanının önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır [9]. Cortis vd. [10] kafes yapıları ile elde edilen implantların gözenekli yapılarından dolayı daha biyo-uyumlu özellikler sergileyerek stres kalkanını minimize edeceğini belirtmişlerdir. Ayrıca kafes yapılı plaklarda artan gözeneklilik miktarı ile yükün plak üzerinde daha homojen hale gelmektedir [11]. Bu konuda Alkhatip vd., [12] ise femur plağını %20, %50 ve %80 yoğunluklu kafes yapılar ile oluşturdukları çalışmada %80 yoğunluklu kafes yapılı plağın stres kalkanını daha minimize ettiğini ispatlamışlardır.

Femur plakların klinik öncesi etkinliğini test etmek için başvurulan yöntemlerden biri de sonlu eleman analizleridir [13]. Sonlu eleman analizleri ile elde edilen deneysel veriler sayesinde plağın kuvvet karşısında göstereceği fiziksel tepki hesaplanarak en kapsamlı veriler oluşturulmaktadır [14]. Özellikle kemik ile plak arasında meydana gelen stres

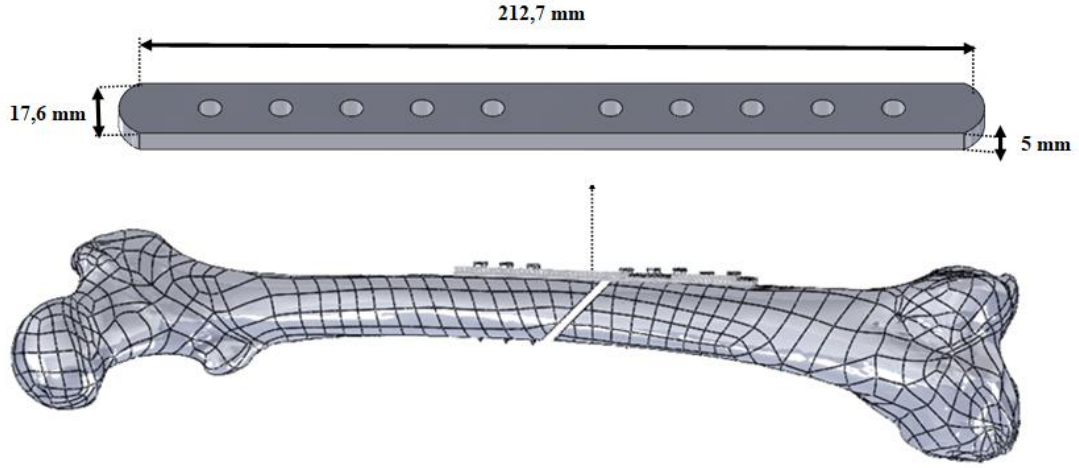
kalkanının incelenmesini mümkün kılan bu yöntem kırığa en uygun plağın tasarımını daha kolay hale getirmektedir [15]. Jia vd., [16] dolu plağa nispeten %40 daha hafif olarak ürettikleri kafes yapılı plakları sonlu eleman analizine tabii tutmuşlardır. Analiz sonucunda kafes yapının plak sertliğini önemli ölçüde azaltarak stres kalkanını daha minimum düzeye indirdiği anlaşılmıştır. Benzer bir çalışmada Alkentar vd., [17] yapmış oldukları sonlu eleman analizleri sonucunda kafes yapılı implantların young modülünü %92'ye kadar azaltabileceğini vurgulamışlardır. Bu azalma plak sertliğini kortikal kemik sertliğine yakınlaştırarak stres kalkanını azaltmada önemli bir etkiye sahiptir [18].

Bu çalışmada, femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plaklar, kafes yapılar ile tasarlanarak stres kalkanı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, kemiğin kafes yapıya entegrasyonunu engelleyerek tedavi sonrası plağın kolayca çıkarılmasını sağlamak amacıyla, plakanın alt katmanı katı bir biçimde, üst katmanı ise iki farklı kafes yapısında tasarlanmıştır. Sonrasında, Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) kullanılarak kemik ile montajlanan plakların ayakta durma esnasındaki deformasyon ve gerilme değerleri sonlu elemanlar analizi ile incelendi.

Materyal ve Metot

BDT Modelleme

Femur kemiğinde meydana gelen kırığın tedavisi hakkında ön izlenim sağlamak ve hata oranları hakkında bilgi sahibi olabilmek için BDT (SolidWorks 2022) kullanılmıştır. Bu bağlamda femur kemiği elde edilirken standartlar dikkate alınarak kemiğin korteks kalınlığı 4 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca süngerimsi kemik, yumuşak dokusu nedeniyle stres kalkanına önemli bir etkisi olmayacağı düşünülerek ihmal edilmiştir. Daha sonra BDT ortamında yaklaşık 45° açıyla kırılan femur kemiğinin boyu 212.7 mm, eni 17.6 mm, yüksekliği 5 mm ve vida deliklerinin çapı 4.5 mm olan KP ve kafes yapılı plaklar ile montajı gerçekleştirilmiştir. Montaj esnasında kemik ve plağı rijit bir şekilde sabitlemek amacıyla 8 adet olan 4.5 mm'lik DCP vidaları tercih edilmiştir. Ayrıca kemik kaynamasını olumsuz yönde etkilememesi için plak üzerinde kırık bölgesine denk gelen iki deliğe vida atılmamıştır (Şekil 1). Femur kemiği ve plak ile vidaların ana malzemesi olan CoCrMo alaşımının mekanik özellikleri Tablo-1'de sunulmuştur.



Şekil 1. BDT ortamında elde edilen femur plağının montaj modeli ve ölçülendirilmesi

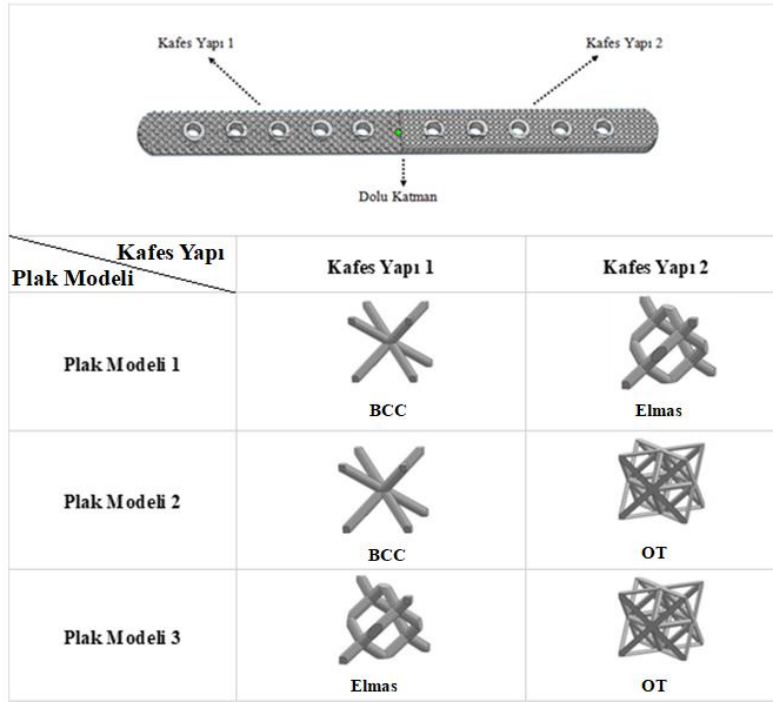
Tablo 1. Femur kemiği ve CoCrMo alaşımının mekanik özellikleri

Parametre	Femur Kemiği	CoCrMo Alaşımı	Referans
Yoğunluk (kg/m ³)	2000	8300	[19], [20]
Elastikiyet Modülü (Gpa)	3-20	248	[20], [21]
Akma Dayanımı (Mpa)	137	827	[22], [23]
Çekme Dayanımı (Mpa)	130-180	1172	[21], [24]
Poisson Oranı	0.35	0.3	[19], [20]

Plak Tasarımı

Bu çalışmada femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plaklar stres kalkanını azaltmak için kafes yapıları ile oluşturulmuştur. Şekil 2'de plak tasarımları gösterilmiştir. Üst katmanı iki farklı kafes yapısı ile oluşturulan plağın kemik ile temas eden yüzeyi kas dokularına zarar vermesini önlemek ve tedavi sonrası plağın kemikten rahat bir şekilde

ayrılmasını sağlamak için katı olarak tasarlanmıştır. Plakların üst katmanı için ise çeşitli alanlarda stres azaltma üzerine literatürde vurgulanan BCC, Elmas ve OT kafes yapıları tercih edilmiştir [25]. Bu bağlamda, birinci plak BCC ve Elmas kafes yapıları, ikinci plak BCC ve OT kafes yapıları, üçüncü plak ise Elmas ve OT kafes yapıları ile oluşturulmuştur.

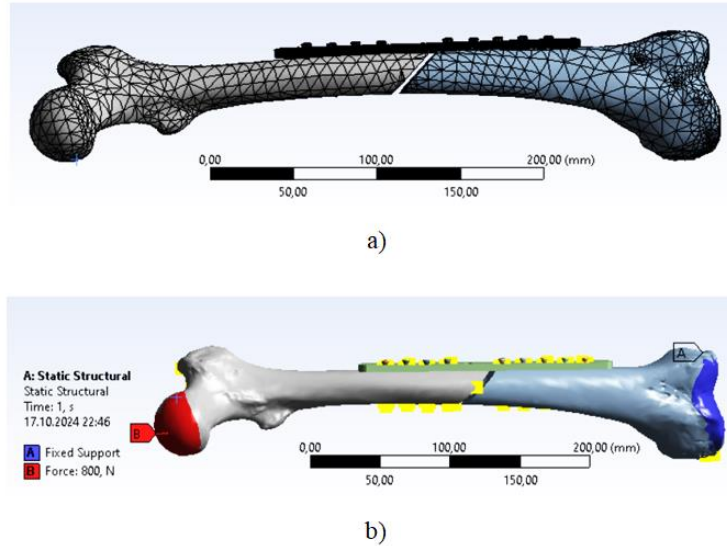


Şekil 2. Femur plağının kafes yapıları ile tasarımı

Sonlu Eleman Model Ağı ve Sınır Koşulları

BDT ile oluşturulan modellerin yük karşısında gösterdiği deformasyon ve stres değerlerini hesaplamak için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler Ansys 2021 R2 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Buna binaen çözüm hassasiyetini arttırmak amacıyla öncelikle ağ iyileştirmesine (meshleme) tabii tutulan modeller statik

analizlerin yapılabilmesi için distal ucundan sabitlenmiştir. Daha sonra ortalama 80 kg ağırlığa sahip bir insanın ayakta durma anını temsilen modellerin proksimal ucundan +X yönünde 800 N statik kuvvet uygulanmıştır. Şekil 3.a'da modellere uygulanan ağ iyileştirmesi görüntüsü verilirken Şekil 3.b'de modellerin sabitleme ve yükleme bölgeleri belirtilmiştir.



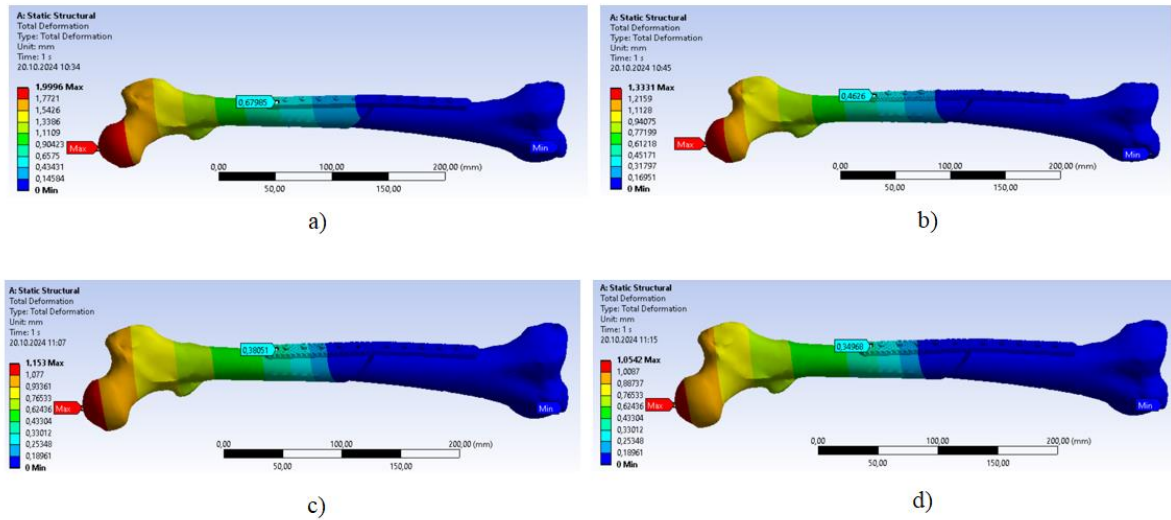
Şekil 3. Modeller üzerine uygulanan a) Mesh yapısı ve b) Yükleme ve sabitleme bölgeleri

Sonuçlar ve Tartışma

Toplam Deformasyon ve Maksimum Asal Gerilme Davranışı

Bu çalışmada KP ve kafes yapıları ile oluşturulan modellerin yük karşısında göstereceği şekil değişimleri hakkında ön izlenim sağlamak amacıyla toplam deformasyon analizleri yapıldı. Şekil 4'te modellerde ve plaklarda hesaplanan deformasyon miktarlarına ait görseller verildi. Bu kapsamda KP modelinin 1.9996 mm deformasyon değerine karşılık BCC- Elmas, BCC-OT ve Elmas -OT plakları ile elde edilen modellerde sırasıyla

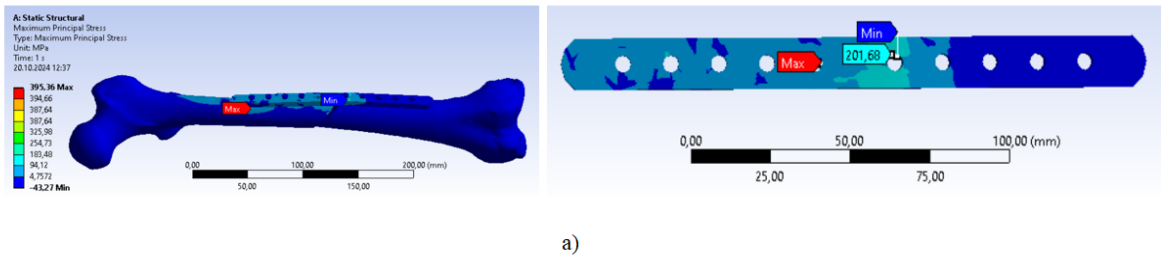
1.3331 mm, 1.153 mm ve 1.0542 mm deformasyon değeri hesaplandı. Plaklar üzerindeki deformasyon değeri incelendiğinde ise en iyi sonuç 0.34968 mm değeri ile Elmas-OT plağında olduğu görülmektedir. Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda kafes yapıları ile elde edilen plakların KP'ya nispeten daha az deforme olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, kafes yapıların sahip olduğu gözenekler sayesinde yükün daha homojen bir şekilde dağıtılmasıdır [26].

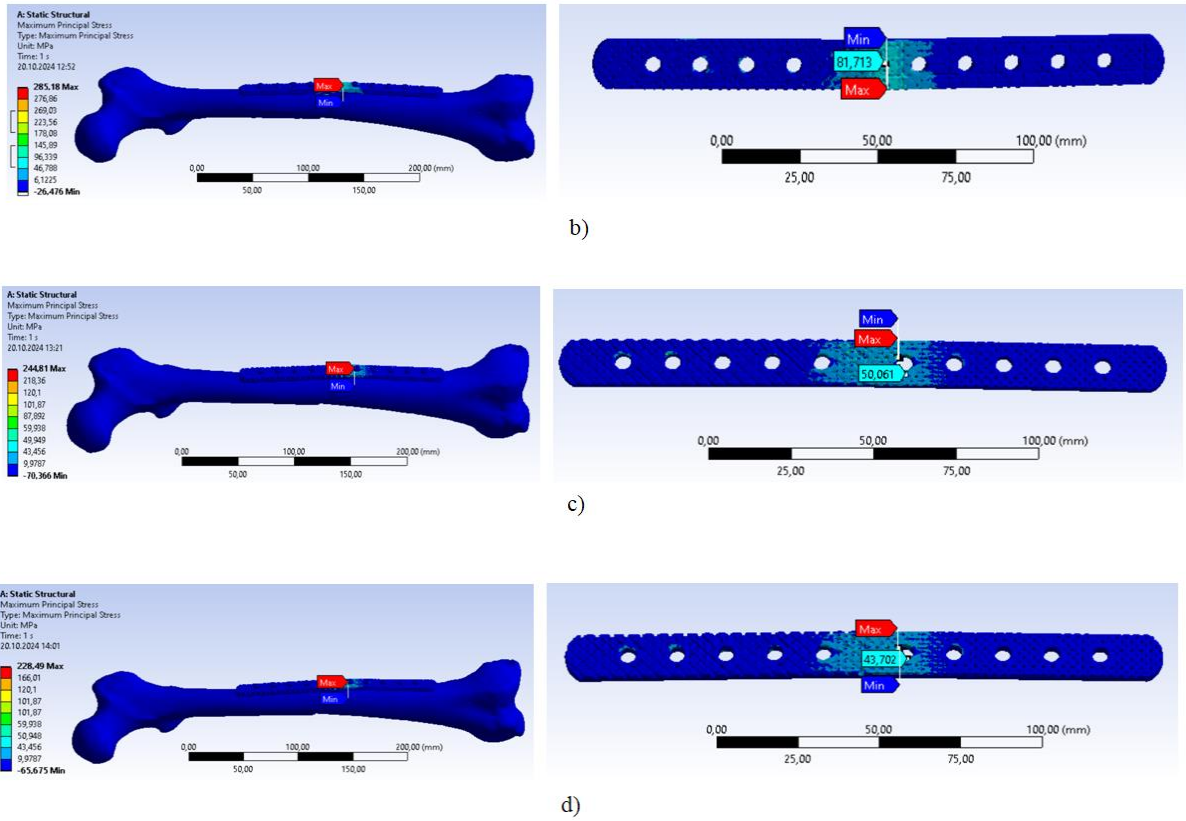


Şekil 4. Modellerin ve plakların toplam deformasyon miktarları a) KP, b) BCC-Elmas, c) BCC-Elmas ve d) Elmas-OT kafes yapıları

Modeller ve plaklar üzerinde 800 N yük altında deformasyonun başlangıcına karşılık gelen maksimum asal gerilme değerleri Şekil 5'te verildi. Şekil incelendiğinde KP modelinde 395.36 MPa olarak hesaplanan gerilme değerinin, kafes yapıları ile elde edilen plaklar kullanılmasıyla minimize edildiği görülmektedir. Buna göre 228.49 MPa gerilme değerine sahip Elmas -OT kafes yapıları model en iyi

sonucu verirken BCC-OT kafes yapıları model 244.81 MPa, BCC- Elmas kafes yapıları model ise 285.18 MPa gerilme sergiledi. Ayrıca plaklar üzerinde hesaplanan maksimum asal gerilme değerleri incelendiğinde ise Elmas-OT kafes yapıları plağın 43.702 MPa gerilme değeri ile diğer plaklara nispeten daha iyi sonuç verdiği belirlendi.





Şekil 5. Modeller ve plakların maksimum asal gerilme değerleri a) KP, b) BCC-Elmas, c) BCC-Elmas ve d) Elmas-OT kafes yapıları

Deformasyon ve maksimum asal gerilme sonuçları beraber değerlendirildiğinde kafes yapıları ile elde edilen plaklar KP'a göre daha iyi sonuçlar verdiği görüldü. Bu durum kafes yapıların sahip olduğu artan gözeneklilik özelliği sayesinde yükün plak yüzeyine daha homojen bir şekilde dağılmasından kaynaklanır [27]. Bu dağılımın kafes yapılar ile oluşturulan plaklarda gösterdiği değişimi açıklamak amacıyla Şekil 6'da BCC, Elmas ve OT birim kafes yapılarının kuvvet dağılım yönleri ve birim hücre geometrileri verildi. Birim kafes yapıların kuvvet dağılım yönleri göz önüne alındığında plağa aktarılan kuvveti paylaşmak için BCC, Elmas ve OT birim kafes yapılarında sırasıyla 4, 6 ve 8 adet dikme yapı bulunduğu dikkat çekmektedir. Birim hücrede dikme yapıların artmasıyla birlikte kuvvetin plak üzerindeki şiddeti azalarak deformasyon ve gerilme değerleri iyileşmektedir [28]. Bu bulgu dikkate alındığında Elmas-OT kafes yapılı plağın daha fazla dikmeye sahip olduğu şekilde görülmektedir. Böylelikle analizler sonucunda elde edilen Elmas-OT kafes

yapılı plak modelinin daha az deforme olacağı ve daha düşük gerilme değerlerine sahip olacağı doğrulanmaktadır.

Kafes yapılı plaklarda kuvvet dağılımının yanı sıra, deformasyon ve gerilme miktarını etkileyen en kritik hususlardan biri de kafes yapıların birim hücre geometrileridir. Şekil 6'da her bir plakta kullanılan kafes yapıların birim hücre geometrileri belirtildi. Birim hücre geometrileri analiz edildiğinde, daha fazla sayıda dikme içeren OT birim hücre geometrisinin daha büyük bir hacim yoğunluğuna sahip olduğu ve bu hücre geometrisini sırasıyla Elmas ve BCC hücre geometrilerinin izlediği dikkat çekmektedir. Bu kuramdan yola çıkıldığında Elmas-OT kafes yapısıyla oluşturulan plağın daha büyük hacim yoğunluğu nedeniyle gelen yüklere karşı daha dirençli olacağı görülmektedir. Öyle ki edinilen bu sonuç birim hücre geometrisinde artan hacim yoğunluğunun deformasyon ve gerilme değerlerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir [29].

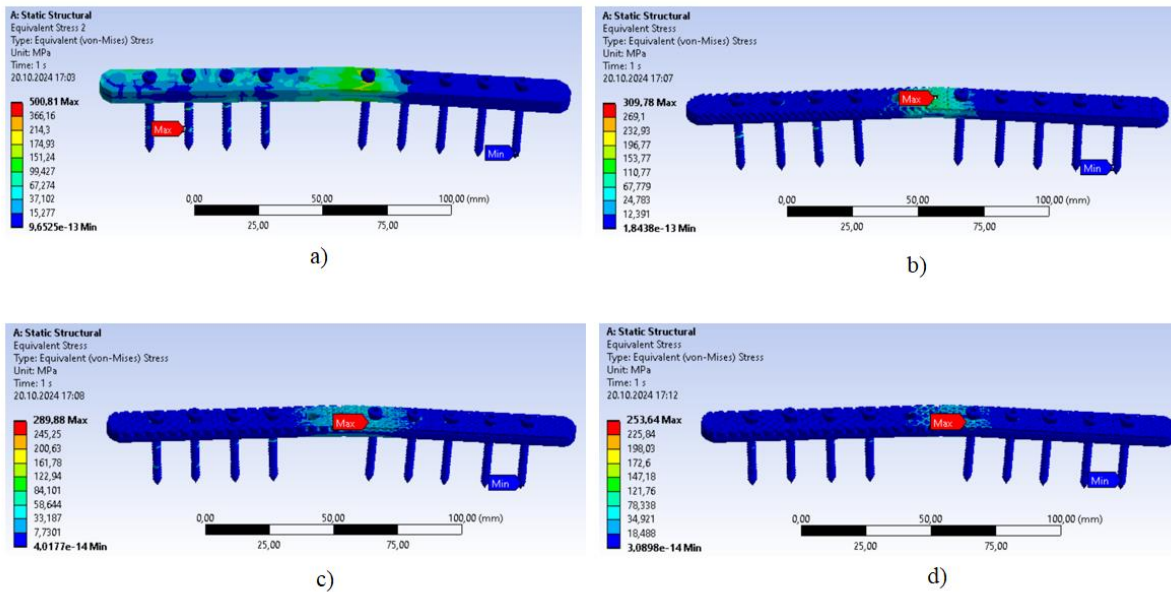
		Kafes Yapı 1		Kafes Yapı 2	
Plak	Kafes Yapı Özellikleri	Kuvvet Dağılım Yönleri	Birim Hücre Geometrisi	Kuvvet Dağılım Yönleri	Birim Hücre Geometrisi
	BCC-Elmas Plak				
BCC-OT Plak					
Elmas-OT Plak					

Şekil 6. BCC, Elmas ve OT birim kafes yapılarının kuvvet dağılım yönleri ve birim hücre geometrileri

Maksimum von-Mises Gerilmesi Analizi

Deformasyon davranışlarının kalıcı hasara neden olup olmayacağını belirlemek için plakların maksimum von-Mises gerilme değerleri incelendi. Şekil 7'de KP ve kafes yapı plakların maksimum von-Mises gerilme değerleri verildi. Bu kapsamda kafes yapı plaklar 500.81 MPa gerilmeye sahip olan KP modeline nispeten daha düşük von-

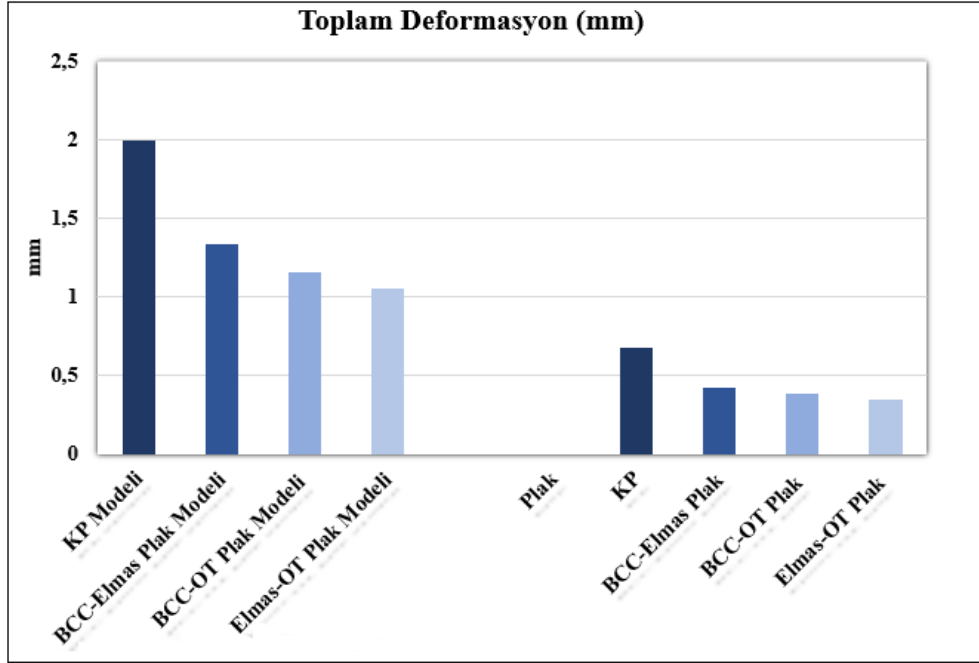
Mises gerilme değerine sahip oldu. Kafes yapı plaklar KP ile karşılaştırıldığında ise BCC-Elmas kafes yapı plak 309.78 MPa ile % 61.66 oranında, BCC-OT kafes yapı plak 298.88 MPa ile % 72.76 oranında ve Elmas-OT kafes yapı plak 253.64 MPa ile % 97.44 oranında daha az gerilme davranışı sergiledi. Bu bulgular daha gözenekli yapıya sahip kafes yapı plakların KP'a nispeten hasara karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir [30]



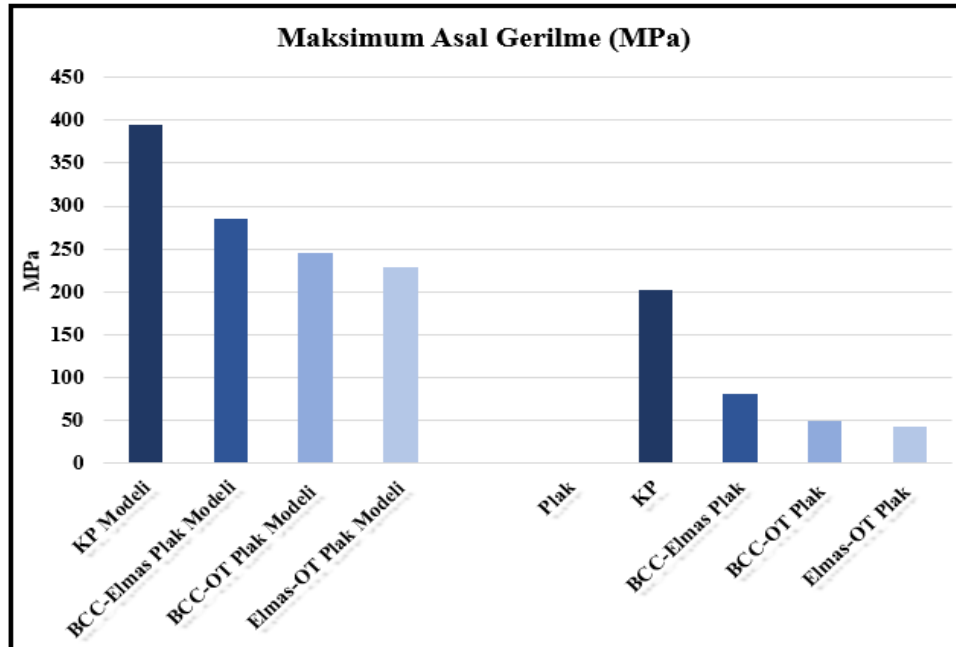
Şekil 7. Plakların maksimum von-Mises gerilme değerleri a) KP, b) BCC-Elmas, c) BCC-OT ve d) Elmas-OT kafes yapıları

Analiz sonuçları genel olarak değerlendirmek için Şekil 8'de deformasyon ve gerilme sonuçlarına ait grafikleri içeren görsel verildi. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere kafes yapı plakalar KP'ya göre daha az deforme olarak daha düşük gerilme değerlerine sahip oldu. Bu bulgu, plaklarda önemli

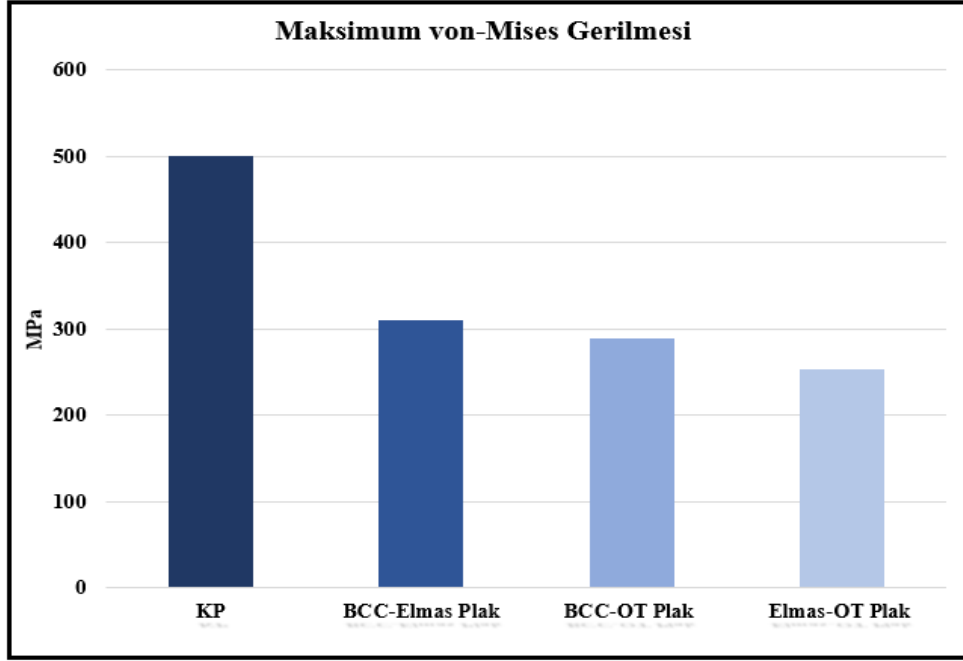
bir sorun olan stres kalkınının azalmasına büyük bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca edinilen sonuçların klinik olarak da iyileşme sürecine önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.



a)



b)



c)

Şekil 8. Deformasyon ve gerilme değerlerine ait grafikler a) Toplam Deformasyon, b) Maksimum Asal Gerilme ve c) Maksimum Von-Mises Gerilmesi

Sonuçlar

- Bu çalışmada, femur kırıklarının tedavisinde kullanılan KP'lara alternatif olarak BCC, Elmas ve OT kafes yapıları ile üretilen plaklar tasarlanmıştır. Plakların yük altındaki deformasyon ve gerilme davranışlarını incelemek amacıyla Sonlu Eleman Analizleri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.
- KP modelinin 1.9996 mm deformasyon değerine karşılık BCC-Elmas, BCC-OT ve Elmas-OT kafes yapıları plak modellerinde sırasıyla 1.3331 mm, 1.153 mm ve 1.0542 mm deformasyon hesaplanmıştır. Maksimum gerilme değerlerinde ise KP modelinde 500,81 MPa gerilme değeri ölçülürken BCC-Elmas kafes yapıları plak modelinde 309,78 MPa ile % 61,66 oranında, BCC-OT kafes yapıları plak modelinde 298,88 MPa ile %72,76 oranında ve Elmas-OT kafes yapıları plak modelinde 253,64 MPa ile %97,44 oranında KP'a göre daha az gerilme saptanmıştır.
- Kafes yapıları plaklar KP'a nispeten daha düşük deformasyon ve gerilme değerlerine sahip olması gelişmiş yük taşıma kabiliyetine işaret etmiştir.
- Kafes yapıları plakalarda gözeneklilik miktarının artmasıyla birlikte deformasyon ve gerilme değerleri olumlu yönde etkilenmiştir.
- Birim kafes geometrisinde dikme sayısı arttıkça yükün plak üzerindeki dağılımı daha düzenli bir hal almıştır. Bu durum gerilme dağılımını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca birim kafes yapılarında hacim yoğunluğunun artmasıyla plağın gelen yüklere karşı daha dirençli bir tutum sergileyeceği anlaşılmıştır.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

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

Kaynakça

- [1] Babhulkar, S., Trikha, V., Babhulkar, S., & Gavaskar, A. S., Current concepts in management of distal femur fractures. *Injury*, 55, 111357, (2024).
- [2] Abdelmonem, A. H., Saber, A. Y., El Sagheir, M., & El-Malky, A., Evaluation of the results of minimally invasive plate osteosynthesis using a locking plate in the treatment of distal femur fractures. *Cureus*, 14(3), (2022).
- [3] Chmielewska, A., & Dean, D., The role of stiffness-matching in avoiding stress shielding-induced bone loss and stress concentration-induced skeletal reconstruction device failure. *Acta Biomaterialia*, 173, 51-65, (2024).
- [4] Safavi, S., Yu, Y., Robinson, D. L., Gray, H. A., Ackland, D. C., & Lee, P. V., Additively manufactured controlled porous orthopedic joint replacement designs to reduce bone stress shielding: a systematic review. *Journal of orthopaedic surgery and research*, 18(1), 42., (2023).
- [5] Jafari Chashmi, M., Fathi, A., Shirzad, M., Jafari-Talookolaei, R. A., Bodaghi, M., & Rabiee, S. M., Design and analysis of porous functionally graded femoral prostheses with improved stress shielding. *Designs*, 4(2), 12., (2020).
- [6] Savio, D., & Bagno, A., When the total hip replacement fails: A review on the stress-shielding effect. *Processes*, 10(3), 612., (2022).
- [7] Ahirwar, H., Gupta, V. K., & Nanda, H. S., Finite element analysis of fixed bone plates over fractured femur model. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 24(15), 1742-1751., (2021).
- [8] Pan, C., Han, Y., & Lu, J., Design and optimization of

- lattice structures: A review. *Applied Sciences*, 10(18), 6374., (2020).
- [9] Wang, H., Wan, Y., Li, Q., Xia, Y., Liu, X., Liu, Z., & Li, X., Porous fusion cage design via integrated global-local topology optimization and biomechanical analysis of performance. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 112, 103982., (2020).
- [10] Cortis, G., Mileti, I., Nalli, F., Palermo, E., & Cortese, L., Additive manufacturing structural redesign of hip prostheses for stress-shielding reduction and improved functionality and safety. *Mechanics of Materials*, 165, 104173., (2022).
- [11] Wang, X., Zhang, L., Song, B., Zhang, J., Fan, J., Zhang, Z., ... & Shi, Y., Anisotropic mechanical and mass-transport performance of Ti6Al4V plate-lattice scaffolds prepared by laser powder bed fusion. *Acta Biomaterialia*, 148, 374-388., (2022).
- [12] Alkhatib, S. E., Tarlochan, F., Mehboob, H., Singh, R., Kadirgama, K., & Harun, W. S. B. W., Finite element study of functionally graded porous femoral stems incorporating body-centered cubic structure. *Artificial organs*, 43(7), E152-E164., (2019).
- [13] Cheng, C. K., Wang, X. H., Luan, Y. C., Zhang, N. Z., Liu, B. L., Ma, X. Y., & Nie, M. D., Challenges of pre-clinical testing in orthopedic implant development. *Medical Engineering & Physics*, 72, 49-54., (2019).
- [14] Yan, L., Lim, J. L., Lee, J. W., Tia, C. S. H., O'Neill, G. K., & Chong, D. Y., Finite element analysis of bone and implant stresses for customized 3D-printed orthopaedic implants in fracture fixation. *Medical & biological engineering & computing*, 58, 921-931., (2020).
- [15] Naidubabu, Y., Mohana Rao, G., Rajasekhar, K., & Ratna Sunil, B., Design and simulation of polymethyl methacrylate-titanium composite bone fixing plates using finite element analysis: optimizing the composition to minimize the stress shielding effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(23), 4402-4412., (2017).
- [16] Jia, D., Li, F., Zhang, C., Liu, K., & Zhang, Y., Design and simulation analysis of Lattice bone plate based on finite element method. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(13), 1311-1321., (2021).
- [17] Alkentar, R., & Mankovits, T., Investigation of the performance of Ti6Al4V lattice structures designed for biomedical implants using the finite element method. *Materials*, 15(18), 6335., (2022).
- [18] Chmielewska, A., & Dean, D., The role of stiffness-matching in avoiding stress shielding-induced bone loss and stress concentration-induced skeletal reconstruction device failure. *Acta Biomaterialia*, 173, 51-65., (2024).
- [19] Maharaj, P. S., Maheswaran, R., & Vasanathanan, A., Numerical analysis of fractured femur bone with prosthetic bone plates. *Procedia Engineering*, 64, 1242-1251., (2013).
- [20] Sadiq, K., Sim, M. A., Black, R. A., & Stack, M. M., Mapping the micro-abrasion mechanisms of CoCrMo: some thoughts on varying ceramic counterface diameter on transition boundaries in vitro. *Lubricants*, 8(7), 71., (2020).
- [21] Eldesouky, I., Abdelaal, O., & El-Hofy, H., Femoral hip stem with additively manufactured cellular structures. In *2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)* (pp. 181-186). IEEE., (2014, December).
- [22] Asgharpour, Z., Fressmann, D., Schuller, E., & Peldschus, S., Implementation of a Strain Rate Dependent Human Bone Model. In *8th European LS-DYNA Users Conference*, Strasbourg., (2011).
- [23] Bordin, A., Ghiotti, A., Bruschi, S., Facchini, L., & Bucciotti, F., Machinability characteristics of wrought and EBM CoCrMo alloys. *Procedia Cirp*, 14, 89-94., (2014).
- [24] Fazira, M. F., Mohammad, M., Roslani, N., Saleh, M. H., & Ahmad, M. A. Low strain rate upset forging of preformed CoCrMo powder alloy for load bearing application: A review. *Procedia Engineering*, 68, 405-410., (2013).
- [25] Ali, M., Sajjad, U., Hussain, I., Abbas, N., Ali, H. M., Yan, W. M., & Wang, C. C., On the assessment of the mechanical properties of additively manufactured lattice structures. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 142, 93-116., (2022).
- [26] Bandyopadhyay, A., Mitra, I., Avila, J. D., Upadhyayula, M., & Bose, S., Porous metal implants: processing, properties, and challenges. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(3), 032014., (2023).
- [27] Khiavi, S. G., Sadeghi, B. M., & Divandari, M. Effect of topology on strength and energy absorption of PA12 non-auxetic strut-based lattice structures. *Journal of materials research and technology*, 21, 1595-1613., (2022).
- [28] Ye, J., Sun, Z., Ding, Y., Zheng, Y., & Zhou, F., The deformation mechanism, energy absorption behavior and optimal design of vertical-reinforced lattices. *Thin-Walled Structures*, 190, 110988., (2023).
- [29] Vilardell, A. M., Takezawa, A., Du Plessis, A., Takata, N., Krakhmalev, P., Kobashi, M., ... & Yadroitsev, I. Topology optimization and characterization of Ti6Al4V ELI cellular lattice structures by laser powder bed fusion for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 766, 138330., (2019).
- [30] Alkentar, R., Klavovasilakis, N., Tzetzis, D., & Mankovits, T., Effects of pore size parameters of titanium additively manufactured lattice structures on the osseointegration process in orthopedic applications: a comprehensive review. *Crystals*, 13(1), 113., (2023).



Araştırma Makalesi / Research Article

Karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının basma testi analizi

Compression test analysis of carbon fiber coated TPMS lattice structures

Özgün Ceren Akbay¹, Burak Özdemir², Erkan Bahçe¹, Mehmet Akif Oymak¹

¹ İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ceren.akbay@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7839-2484>

¹ İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, erkan.bahce@inonu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5389-5571>

¹ İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, akif.oymak@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8251-3106>

² Turgut Özal Üniversitesi Hekimhan Mehmet Emin Sungur Meslek Yüksek Okulu, burak.ozdemir@ozal.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5870-0398>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 9 Ocak 2025
Revizyon 25 Şubat 2025
Kabul 3 Mart 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

TPMS, Karbon Fiber
Kaplama, Eklemeli İmalat,
Mekanik Performans

ÖZ

Eklemeli imalat, karmaşık geometrilere sahip hafif ve yüksek performanslı yapılar üretme imkânı sunan yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Bu teknolojinin öne çıkan uygulamalarından biri olan Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) yapılar, düşük yoğunluk, yüksek yüzey alanı, enerji emilimi ve mekanik dayanım gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak eklemeli imalatla üretilen TPMS yapılarının mekanik dayanımı uygulama gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu bağlamda karbon fiber kaplama TPMS yapılarının mekanik dayanımını ve sertliğini artırarak yük taşıma kapasitesini iyileştiren etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının mekanik performansını incelemiş ve farklı geometrik tasarımların enerji emme kapasitesi, yük taşıma dayanımı ve elastik modül üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Octet geometrisi 1250 J enerji emme kapasitesi ve 500 N maksimum yük taşıma dayanımı ile en yüksek performansı sergilerken, elastik modül açısından diğer geometrilere kıyasla daha düşük bir değer göstermiştir. HMK (1100 J, 450 N), YMK (950 J, 400 N) ve Elmas (850 J, 350 N) geometrileri ise dengeli performanslarıyla farklı uygulama alanları için uygun seçenekler sunmaktadır. Elde edilen bulgular karbon fiber kaplamanın TPMS yapılarının mekanik özelliklerini optimize etmede etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda çalışma havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji gibi sektörlerde hafiflik, dayanıklılık ve çok işlevlilik gerektiren uygulamalar için karbon fiber kaplamalı TPMS yapılarının geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 January 2025
Received in revised form 25 February 2025
Accepted 3 March 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

TPMS, Carbon Fiber Coating,
Additive Manufacturing,
Mechanical Performance

Doi: 10.24012/dumf.1616592

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Additive manufacturing is an innovative manufacturing technology that offers the opportunity to produce lightweight and high-performance structures with complex geometries. One of the prominent applications of this technology, Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) structures, provides advantages such as low density, high surface area, energy absorption and mechanical strength. However, the mechanical strength of TPMS structures produced by additive manufacturing may be insufficient to meet the application requirements. In this context, carbon fiber coating stands out as an effective solution that improves the load carrying capacity by increasing the mechanical strength and stiffness of TPMS structures. This study examined the mechanical performance of carbon fiber coated TPMS lattice structures and evaluated the effects of different geometric designs on energy absorption capacity, load carrying strength and elastic modulus. While the Octet geometry exhibited the highest performance with 1250 J energy absorption capacity and 500 N maximum load carrying strength, it showed a lower value compared to other geometries in terms of elastic modulus. HMK (1100 J, 450 N), YMK (950 J, 400 N) and Diamond (850 J, 350 N) geometries offer suitable options for different application areas with their balanced performances. The findings show that carbon fiber coating is an effective method for optimizing the mechanical properties of TPMS structures. In this context, the study reveals that carbon fiber coated TPMS structures have a wide usage potential for applications requiring lightness, durability and multifunctionality in sectors such as aviation, automotive, biomedical and energy.

Giriş

Son yıllarda eklemeli imalat teknolojisi sanayileşme doğrultusunda hızla evrilmekte ve bu alandaki büyüme kayda değer bir ivme kazanmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor olan karmaşık şekillerdeki parçaların üretilmesine olanak tanıyan bu teknoloji ultra hafif çok işlevli yapılardan savunma, havacılık ve otomotiv sektörlerine kadar geniş bir yelpazede önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayisinde hafiflik ve dayanıklılıklarıyla öne çıkan 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar tercih edilmektedir. Bu yapılar hava ve uzay araçlarının gövde, motor bileşenleri, iç yapısal unsurlar ve aerodinamik parçaları gibi kritik bileşenlerin üretiminde kullanılmakta ayrıca uzay keşif ve iletişim sistemlerine katkı sağlayarak bu alandaki gelişmelere destek vermektedir. Otomotiv sektöründe ise 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar araçları hem hafifletme hem de güçlendirme açısından önemli bir rol üstlenmektedir. Şase bileşenleri, direksiyon sistemleri, fren donanımları ve güvenlik unsurlarında kullanılan bu yapılar araç performansını iyileştirirken enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Savunma sanayisinde de yaygın olarak kullanılan bu kafes yapılar askeri araçlar, zırh parçaları, mühimmat konteynerleri, dronlar ve çeşitli askeri donanımların üretiminde tercih edilmektedir. Bu yapıların askeri sistemlerde sağladığı hafiflik ve dayanıklılık operasyonel güvenilirliği artıran önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Spor ve rekreasyon alanında da 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar bisikletler, motosikletler, spor araçları ve ekipmanlarının üretiminde kullanılarak hafiflik ve mukavemet avantajlarıyla spor araçlarının performansını artırmakta ve sporculara üstün bir deneyim sunmaktadır. Tıp ve sağlık teknolojilerinde ise bu yapılar protez ve ortez gibi tıbbi cihazların üretiminde kullanılmakta olup kullanıcıların hareket kabiliyetini artırmada ve sağlık teknolojilerindeki yenilikleri desteklemede etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Enerji sektöründe ise rüzgâr türbinleri, güneş paneli çerçeveleri ve diğer enerji üretim donanımlarında kullanılan 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar enerji verimliliğine katkıda bulunarak çevre dostu enerji üretimini teşvik etmektedir. TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces) yapılar doğal geometrileri sayesinde hafiflik ve dayanıklılık sağlasa da bazı uygulamalarda ek kaplama gereksinimi ortaya çıkar. Özellikle yüksek yüke veya darbelere maruz kalan bu tür yapılarda malzemenin kendi mukavemeti bazen yetersiz kalabilir. Bu durumda yapının dış yüzeyinde oluşabilecek gerilme yoğunlaşmasını azaltmak ve yükün eşit dağılımını sağlamak amacıyla karbon fiber kaplama yapılır. Karbon fiber kaplama TPMS yapılarının yapısal dayanıklılığını artırırken aynı zamanda darbe emme özelliklerini geliştirmekte ve aşınmaya karşı daha dayanıklı hale getirmektedir. Karbon fiberin üstün ağırlık-dayanım oranı TPMS yapıların hafiflik avantajını koruyarak ekstra mukavemet kazandırır ve çeşitli endüstriyel alanlarda bu yapıları daha uzun ömürlü ve güvenilir bir hale getirir. Sonuç olarak malzeme mühendisliği, üretim teknolojileri ve endüstriyel tasarım alanındaki ilerlemeler sayesinde 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar birçok sektörde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Sağladıkları hafiflik, mukavemet ve esneklik gibi avantajlar bu yapıların farklı

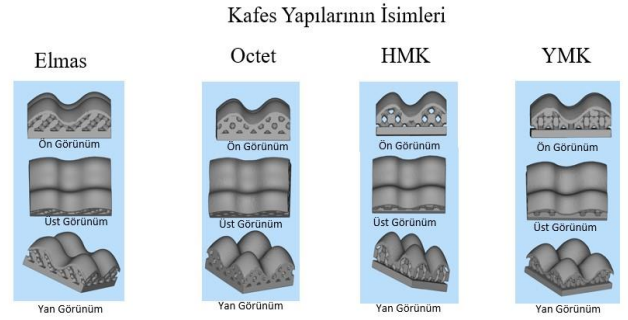
endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Özellikle savunma sanayisinde kullanılan bileşenlerin mühendislik tasarımlarında mekanik özelliklerin ve darbe emme yeteneklerinin iyileştirilmesi gerekliliği öne çıkmaktadır. Bu çerçevede hafif, güçlü, dayanıklı ve özgün geometrilere sahip kafes yapılar mekanik özellikler açısından yüksek verimlilik sunmaktadır. Bu işlemde tercih edilen yüksek mukavemetli karbon fiber, cam veya aramid gibi diğer elyaflardan daha yüksek ağırlık-dayanım oranına sahip olmasıyla ve standart karbon fiberlere kıyasla daha esnek olup darbe yükleri altında çatlama veya kırılmaya karşı daha dirençli olmasıyla dikkat çekmektedir. Bu konuda literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında; Yin ve diğ. çalışmalarında daha verimli ve hafif yapılar üretebilmek için metaller yerine karbon fiber takviyeli plastiklere (CFRP) olan ilgiyi vurgulamıştır. Günümüzde artık yüksek performanslı Formülal yarış arabalarının neredeyse tamamının epoksi reçine ve karbon fiber takviyeli plastiklerden oluşması bu vurguyu desteklemiştir [1]. Yaqoob ve diğ. Titanyum köpük kafes yapının ortopedik implantlarda stres kalkanını azaltmaya yardımcı olduğunu ve köpük kafes yapının elastik modülünün insan kemiklerine daha yakın olduğu üzerinde durmuşlardır [2]. Wang ve diğ. Yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi elde etmek amacıyla karbon kompozit iki kabuk ve piramidal alüminyum kafesten oluşan hibrit bir sandviç panel üretmişlerdir. Üretilen yapıların enerji soğurma mekanizmasını ve hasar direncini değerlendirmek için darbe testi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, hibrit yapının diğer yapılara kıyasla üstün enerji emme kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir [3]. Karbon fiber üzerine başka bir çalışma Pyl ve diğ. tarafından gerçekleştirilmiştir. Pyl ve diğ. karbon fiberle güçlendirilmiş polimer matris kompozitlerin mekanik karakterizasyonu için en uygun çekme numunesi geometrisini tanımlamışlardır. Düz dikdörtgen numunelerin, çekme numunelere göre daha iyi mekanik performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir [4]. Vijayanandh ve diğ. karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini optimize etmek amacıyla fiber yönelimlerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada farklı fiber yönelimlerine sahip CFRP kompozit numunelerinin çekme yükü altındaki davranışlarını değerlendirmişlerdir. Sonuçlarda fiber yöneliminin kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır. Özellikle uygun fiber yönelimiyle deformasyon ve enerji absorpsiyon kapasitesi optimize edilmiştir [5]. Di Caprio ve diğ. Titanyum metal kafes ve karbon fiber takviyeli plastik kompozit malzemeden oluşan eksenel simetrik olmayan hibrit yapı oluşturmuş ve mekanik analiz yapmışlardır. Hibrit yapıların düz konfigürasyondaki yapısal uygulamalar için yaygın olarak kullanıldığını ancak giderek daha karmaşık şekiller ve yüksek performansa sahip hibrit bileşenlere talep olduğunu ve bu konudaki gelişmeleri gerekli kıldığını belirtmişlerdir [6]. Erzurum ve diğ. eklemeli imalat yöntemleriyle polimer matrisli sürekli karbon fiber takviyeli kompozit parçaların üretilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada karbon fiberlerin mekanik dayanımı artırmadaki rolü ve eklemeli imalat süreçlerine entegrasyonu ele alınmıştır [7]. Sezer ve diğ. ergiyik biriktirme yöntemi (FDM) ile karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin üretimini ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Karbon fiber oranının artırılmasının mukavemeti artırdığı ancak esneklik

ve işlenebilirliği azalttığı belirtmişlerdir [8]. Eren ve diğ. karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin FDM yöntemiyle üretimini ve süreç parametrelerinin çekme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Karbon fiberlerin mekanik dayanımı artırdığı, ancak yazdırma parametrelerinin kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır [9]. Tekinalp ve diğ. çalışmalarında karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin mekanik performansını artırmak için fiber yönelimlerinin optimizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada, ASTM D3039 standardına uygun olarak beş katmanlı karbon fiber ve epoksi reçine kombinasyonlarıyla 15 farklı model oluşturulmuş ve bu modeller ANSYS ACP yazılımı kullanılarak yapısal analizlere tabi tutulmuştur. Çekme yükü altında yapılan simülasyonlar sonucunda, farklı fiber yönelimlerinin deformasyon, gerilme dağılımı ve enerji absorpsiyon kapasiteleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Farklı fiber yönelimleri, kompozitlerin mekanik performansını önemli ölçüde etkilemiştir. Model-11, en düşük deformasyon (0.085 mm) ve enerji absorpsiyon (0.0298 mJ) değerleriyle en iyi performansı göstermiştir [10]. Bu çalışmada eklemeli imalat teknoloji kullanılarak PLA ile TPMS kafes yapılar üretilmiş ve sonrasında karbon fiber kaplama uygulanmıştır. Kafes yapı ve karbon fiber avantajlarını bir araya getiren yeni bir kafes yapı tasarlanmıştır. Literatürde de sıklıkla kullanılan ve yüksek mekanik dayanım, enerji emme kapasitesi ve hafiflik özelliklerini bir arada sunarak sıkıştırma testlerinde üstün performans sağlayan Elmas, HMK, YMK, Octet kafes yapısı tercih edilmiştir [11-13]. Tasarlanan yapıya mekanik testler ve darbe testleri uygulanmıştır. Sunulan çalışmada, savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde yüksek mekanik performans ve enerji emme yeteneği gösteren üç boyutlu serbest şekilli yüzeye sahip parçalara olan ihtiyacı karşılaması hedeflenmiştir.

Materyal ve Metot

Yüzey ve Kafes Tasarımı, Üretim ve Kaplama İşlemi

Bu çalışmada karbon fiber kaplamalı TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) kafes yapılarının sıkıştırma testine yönelik tasarımı gerçekleştirilmiştir. TPMS yapıları, yüksek mekanik dayanım ve hafiflik özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir [14]. Tasarım sürecinde kafes yapılarının geometrik özellikleri ve boyutları, test koşullarına uygun şekilde optimize edilmiştir. Kafes yapılar, 2 cm x 2 cm x 2 cm boyutlarında olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu boyutlar sıkıştırma testlerinde homojen bir yük dağılımı sağlamak ve test cihazına uygunluğu sağlamak amacıyla seçilmiştir [15]. Yapıların yüzeyleri karbon fiber kaplama ile güçlendirilmiş olup bu kaplama malzemesi hem mekanik dayanımı artırmakta hem de yapının yüzey özelliklerini iyileştirmektedir [16]. TPMS geometrisi olarak Elmas, HMK, YMK, Octet kafes yapısı tercih edilmiştir (Şekil.1).



Şekil.1 Karbon fiber kaplama yapılamak üzere seçilen TPMS kafes yapıları.

Bu kafes yapıları minimal yüzey alanı ve yüksek rijitlik özellikleri ile öne çıkmaktadır [17-19]. Kafes yapıların G kodları oluşturularak Ultimaker Connet+2 3D yazıcı ile üretim gerçekleştirilmiştir (Şekil.2).



Şekil.2 Üretilen TPMS kafes yapıları.

Yüzey kaplaması karbon fiberin reçine infüzyonu metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde öncelikle karbon fiber kumaşlar kafes yapının yüzeyine dikkatlice yerleştirilmiş ve yapının geometrisine uygun şekilde sarılmıştır. Daha sonra kaplama işlemi için yapı bir vakum torbası içerisine alınmış ve vakum sistemi kullanılarak torba içerisindeki hava tamamen boşaltılmıştır. Vakum altında reçine torba içerisine kontrollü bir şekilde yönlendirilmiş ve karbon fiber dokusuna nüfuz etmesi sağlanmıştır. Reçinenin tüm yüzeye eşit şekilde yayılması için infüzyon işlemi sırasında sabit bir akış hızı ve basınç korunmuştur. Bu çalışmada vakum basıncı-0.8 bar olarak ayarlanmış ve reçine akış hızı yaklaşık 100-150 ml/dakika arasında sabit tutulmuştur. Bu değerler reçinenin karbon fiber dokusuna homojen bir şekilde nüfuz etmesini sağlamak ve hava kabarcıklarının oluşumunu önlemek amacıyla seçilmiştir. İnfüzyon işlemi tamamlandıktan sonra yapı kürlenme (sertleşme) sürecine alınmıştır. Kürlenme işlemi reçine türüne bağlı olarak 25°C oda sıcaklığında 24 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Kürlenme sürecinin ardından, yapının yüzeyinde düzgün ve homojen bir kaplama elde edilmiştir (Şekil.3). Reçine infüzyonu sırasında karbon fiber kumaşın yapıya tam olarak oturması ve reçinenin homojen bir şekilde yayılması için vakum basıncı ve reçine akış hızı dikkatlice kontrol edilmiştir. Bu yöntem özellikle karmaşık geometrilere sahip yapılar için uygun bir kaplama tekniği olarak tercih edilmiştir [20].



Şekil.3 Karbon fiber kaplama yapılmış TPMS kafes yapısı.

Basma Testi

Bu çalışmada karbon fiber kaplanmış kafes yapıların mekanik dayanımını değerlendirmek amacıyla basma testi gerçekleştirilmiştir. Testin temel amacı, farklı kafes geometrilerine (Elmas, HMK, YMK ve Octet) sahip karbon fiber kaplanmış yapıların sıkıştırma yükleri altındaki davranışlarını incelemek ve bu yapıların deformasyon özelliklerini karşılaştırmaktır. Basma testleri DevoTrans marka basma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, maksimum 100 kN kapasiteye kadar yük uygulayabilme özelliğine sahiptir ve bu çalışmada karbon fiber kaplanmış kafes yapıların sıkıştırma dayanımını ölçmek için kullanılmıştır (Şekil.4).



Şekil 4. Basma Test Cihazı ve Modelin Test Sırasındaki Örnek Görüntüsü.

Test sırasında kafes yapılar üzerine aksel yönde artan bir yük uygulanmış ve yapının deformasyonuna bağlı olarak yük-deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Testler, ASTM D695 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve her bir yapı için üç tekrar yapılmıştır.

Test parametreleri şu şekilde belirlenmiştir:

- Yükleme hızı: 1 mm/dakika
- Maksimum deformasyon oranı: %70
- Test ortamı: Oda sıcaklığı (25°C)
- Numune boyutları: 2 cm x 2 cm x 2 cm

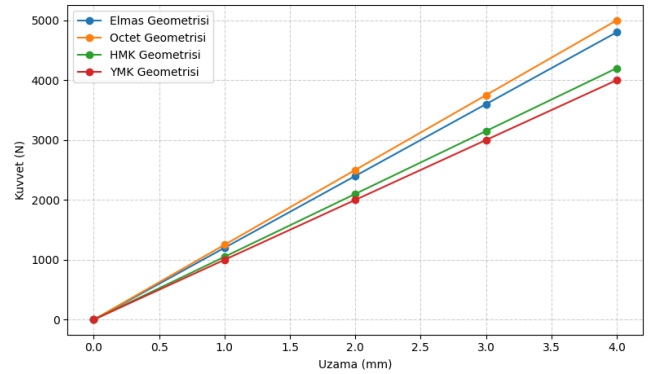
Basma testi sırasında, karbon fiber kaplanmış kafes yapıların elastik bölgedeki davranışları, akma noktası ve kırılma sonrası enerji emme kapasiteleri analiz edilmiştir. Test sırasında elde edilen veriler yük-deformasyon eğrileri üzerinden değerlendirilmiş ve her bir kafes yapının maksimum yük taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Karbon

fiber kaplamanın kafes yapıların rijitliğini ve deformasyon direncini artırdığı göz önünde bulundurularak, kaplamanın mekanik dayanım üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Test sonuçları, farklı kafes geometrilerinin karbon fiber kaplama ile birlikte sıkıştırma yükleri altındaki performansını karşılaştırmak için kullanılmıştır [21].

Tartışma ve Sonuçlar

Basma Testi Sonuçları

Basma testleri sonucunda karbon fiber kaplanmış kafes yapıların mekanik dayanım özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Test sırasında elde edilen yük-uzama eğrileri her bir kafes yapının maksimum yük taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışları gibi mekanik özelliklerini ortaya koymuştur. Test sonuçlarına göre karbon fiber kaplanmış kafes yapıların yük-deformasyon eğrileri, elastik bölge, akma noktası ve kırılma sonrası davranışları açıkça göstermiştir. Elde edilen eğriler farklı kafes geometrilerinin (Elmas, HMK, YMK ve Octet) sıkıştırma yükleri altındaki performansını karşılaştırmak için kullanılmıştır. Özellikle karbon fiber kaplamanın kafes yapıların rijitliğini ve deformasyon direncini artırdığı gözlemlenmiştir [22]. Karbon fiber kaplanmış kafes yapıların basma testleri sırasında elde edilen yük-uzama eğrileri Şekil.5’de gösterilmiştir.



Şekil.5 TPMS kafes yapılarının kuvvet uzama grafiği.

Yük-uzama eğrilerinde şu temel gözlemler yapılmıştır:

- **Elastik Bölge:** Tüm kafes yapılar belirli bir yük seviyesine kadar elastik davranış sergilemiştir. Bu bölgede yük kaldırıldığında yapılar orijinal şekline geri dönebilmştir.
- **Akma Noktası:** Elastik bölgenin ardından, yapılar akma noktasına ulaşmış ve plastik deformasyon başlamıştır. Akma noktasındaki yük değerleri kafes geometrisine bağlı olarak değişiklik göstermiştir.
- **Kırılma Sonrası Davranış:** Kırılma sonrası Octet geometrisinin yük taşıma kapasitesini kısmen koruduğu, Elmas geometrisinin ise ani bir yük kaybı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Özellikle Octet geometrisinin kırılma sonrası daha kontrollü bir deformasyon sergilediği gözlemlenmiştir. Enerji emme kapasitesi kafes yapıların deformasyon sırasında ne kadar enerji absorbe edebildiğini göstermektedir [23]. Bu değer yük-uzama eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre farklı kafes geometrilerinin enerji emme kapasiteleri şu şekilde belirlenmiştir:

Octet Geometrisi: 1250 J

Octet geometrisi, en yüksek enerji emme kapasitesine sahip yapı olarak öne çıkmıştır. Bu durum Octet geometrisinin deformasyon sırasında yükü daha iyi dağıttığını ve karbon fiber kaplamanın bu yapıda daha etkili olduğunu göstermektedir.

HMK Geometrisi: 1100 J

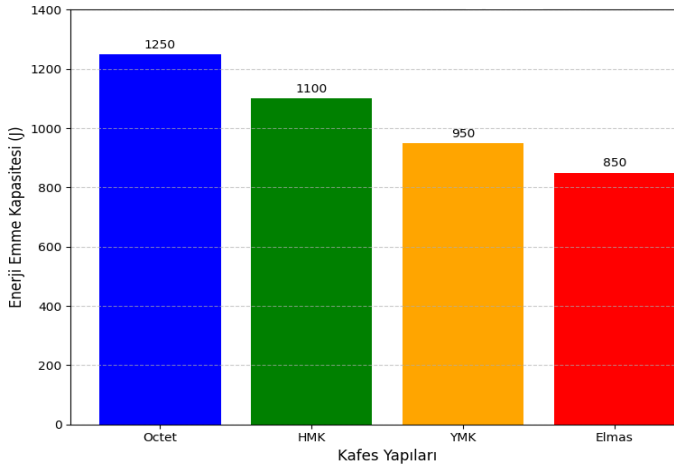
HMK geometrisi, enerji emme kapasitesi açısından ikinci sırada yer almıştır. Bu yapı deformasyon sırasında yüksek enerji absorbe etme kapasitesiyle darbe dayanımı açısından avantaj sağlamaktadır.

YMK Geometrisi: 950 J

YMK geometrisi, deformasyon sırasında orta düzeyde enerji emme kapasitesi sergilemiştir. Bu yapı esnekliği sayesinde deformasyon sırasında enerji absorbe etme kapasitesini korumuştur.

Elmas Geometrisi: 850 J

Elmas geometrisi, yüksek rijitlik ve elastik modül değerlerine sahip olmasına rağmen enerji emme kapasitesi açısından diğer geometrilere göre daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu durum Elmas geometrisinin kırılma sonrası ani yük kaybı göstermesiyle ilişkilidir (Şekil.6).

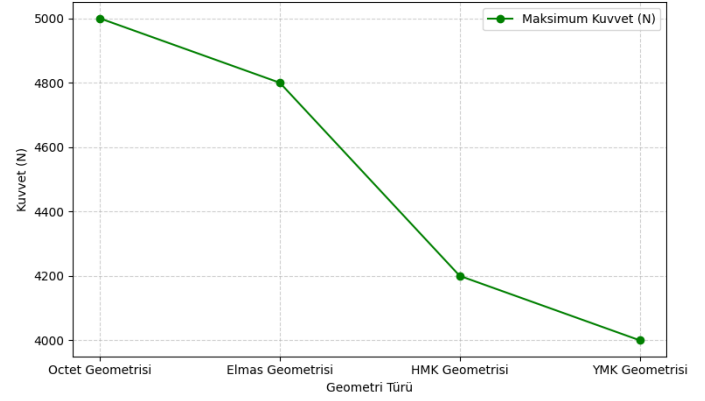


Şekil.6 TPMS kafes yapılarının enerji emme kapasiteleri.

Farklı kafes geometrilerinin maksimum yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında karbon fiber kaplamanın tüm geometrilerde yük taşıma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir [24]. Test sonuçlarına göre:

- **Octet Geometrisi:** 5000 N
- **Elmas Geometrisi:** 4800 N
- **HMK Geometrisi:** 4200 N
- **YMK Geometrisi:** 4000 N

Octet geometrisi, maksimum yük taşıma kapasitesi açısından en iyi performansı sergilemiştir. Bu durum, Octet geometrisinin daha iyi bir yük dağılımı sağladığını ve karbon fiber kaplamanın bu yapıda daha etkili olduğunu göstermektedir [25] (Şekil.7).

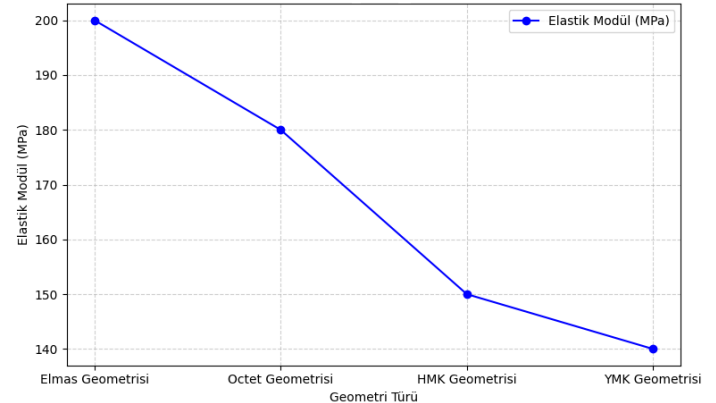


Şekil.7 TPMS kafes yapılarının maksimum yük taşıma kapasitesi.

Elastik modül değerleri karbon fiber kaplanmış kafes yapıların rijitliğini değerlendirmek için hesaplanmıştır. Test sonuçları karbon fiber kaplamanın elastik modülü artırarak yapıların daha rijit bir davranış sergilemesini sağladığını göstermiştir.

- **Elmas Geometrisi:** 200 MPa
- **Octet Geometrisi:** 180 MPa
- **HMK Geometrisi:** 150 MPa
- **YMK Geometrisi:** 140 MPa

Elmas geometrisi, elastik modül açısından en yüksek değere sahip olmuştur. Bu durum Elmas geometrisinin rijitlik açısından avantaj sağladığını göstermektedir [26] (Şekil.8)



Şekil.8 TPMS kafes yapılarının elastik modül değerleri.

Test sırasında kafes yapıların deformasyon davranışları incelenmiştir. Karbon fiber kaplamanın yapıların deformasyon direncini artırdığı ve kırılma sonrası daha kontrollü bir deformasyon sağladığı gözlemlenmiştir:

- **Octet Geometrisi:** Deformasyon sırasında en kontrollü davranışı sergilemiş ve kırılma sonrası yük taşıma kapasitesini kısmen koruyabilmiştir.
- **Elmas Geometrisi:** Yüksek rijitlik nedeniyle kırılma sonrası ani bir yük kaybı göstermiştir.
- **HMK ve YMK Geometrileri:** Deformasyon sırasında daha esnek bir davranış sergilemiş ve kırılma sonrası enerji emme kapasitelerini korumuştur.

Basma test sonuçları karbon fiber kaplamanın kafes yapıların mekanik dayanımını önemli ölçüde artırdığını ve bu

kaplamanın farklı geometrilerde farklı etkiler yarattığını göstermektedir [27]. Özellikle:

- **Octet Geometrisi:** Yüksek yük taşıma kapasitesi (5000 N) ve enerji emme kapasitesi (1250 J) ile öne çıkmıştır.
- **Elmas Geometrisi:** Yüksek rijitlik ve elastik modül değerleriyle (200 MPa) dikkat çekmiştir.
- **HMK ve YMK Geometrileri:** Deformasyon sırasında enerji emme kapasitesi ve esneklik açısından üstün performans sergilemiştir.

Bu sonuçlar karbon fiber kaplanmış kafes yapıların hafiflik, dayanım ve enerji emme kapasitesi gibi özellikleri nedeniyle çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle darbe dayanımı ve enerji emme kapasitesinin önemli olduğu otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi alanlarda bu yapıların potansiyel kullanım alanları bulunmaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışmada karbon fiber kaplamalı TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) kafes yapılarının mekanik performansı, farklı geometrik tasarımlar (Octet, HMK, YMK ve Elmas) kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sıkıştırma testleri, enerji emme kapasiteleri ve elastik modül analizleri sonucunda, her bir geometrinin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın temel bulguları şu şekilde özetlenebilir:

✓ Mekanik Dayanım ve Enerji Emme Kapasitesi

Octet geometrisi, en yüksek yük taşıma kapasitesine (500 N) ve enerji emme kapasitesine (1250 J) sahip olmasıyla öne çıkmıştır. Bu durum, Octet yapısının yük altında daha fazla enerji absorbe edebilme yeteneğini ve darbe emici uygulamalarda üstün performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. HMK geometrisi, 450 N maksimum yük taşıma kapasitesi ve 1100 J enerji emme kapasitesi ile Octet geometrisinden sonra en iyi performansı sergilemiştir [28-30]. Bu yapı, dengeli bir dayanım ve enerji emme kapasitesi sunmaktadır. YMK geometrisi, 400 N yük taşıma kapasitesi ve 950 J enerji emme kapasitesi ile orta düzeyde bir performans göstermiştir. Bu yapı, hafiflik ve dayanım arasında bir denge sunmaktadır. Elmas geometrisi, 350 N yük taşıma kapasitesi ve 850 J enerji emme kapasitesi ile diğer geometrilerle kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Ancak bu yapı rijitlik gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabilir.

✓ Elastik Modül Değerleri

Octet geometrisi, diğer mekanik özelliklerde yüksek performans göstermesine rağmen elastik modül açısından en düşük değeri vermiştir. Bu durum Octet yapısının geometrik düzenlemesinin elastik deformasyona daha fazla izin vermesiyle açıklanabilir. Yüksek enerji emme kapasitesi, elastik deformasyonun artmasına neden olmuş ve rijitliği azaltmıştır. HMK ve YMK geometrileri, elastik modül açısından daha dengeli bir performans sergilemiştir. Bu yapılar hem rijitlik hem de deformasyon direnci açısından orta düzeyde bir performans sunmaktadır. Elmas geometrisi, en yüksek elastik modül değerine sahip olarak en rijit yapı olarak öne çıkmıştır. Bu durum, Elmas yapısının daha az elastik deformasyona izin veren kompakt geometrik düzenlemesiyle ilişkilidir.

✓ Karbon Fiber Kaplamanın Etkisi

Karbon fiber kaplama tüm kafes yapılarında mekanik dayanımı önemli ölçüde artırmıştır [31]. Reçine infüzyonu

yöntemiyle yapılan kaplama karbon fiber dokusunun vakum altında reçine ile tamamen kaplanmasını sağlamış bu da yüzey pürüzlülüğünü azaltarak yük aktarımını optimize etmiştir. Kaplama özellikle enerji emme kapasitesini artırmış ve yapının genel dayanıklılığını iyileştirmiştir [32]. Bu durum karbon fiber kaplamanın hafiflik ve dayanım gerektiren uygulamalarda önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

✓ Geometrik Yapının Performansa Etkisi

Geometrik yapı kafes yapıların mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmıştır. Octet yapısı, enerji emme kapasitesi ve yük taşıma performansı açısından en iyi sonuçları verirken, elastik modül açısından en düşük değeri göstermiştir. Bu durum, Octet yapısının enerji emme odaklı bir tasarım olduğunu ortaya koymaktadır. Elmas yapısı, rijitlik gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabilecek en sert yapı olarak öne çıkmıştır. Ancak, enerji emme kapasitesi ve yük taşıma dayanımı açısından diğer geometrilerle kıyasla daha düşük performans göstermiştir. HMK ve YMK yapıları, dengeli bir performans sunarak hem rijitlik hem de enerji emme kapasitesi açısından orta düzeyde sonuçlar vermiştir.

✓ Uygulama Potansiyeli

Octet geometrisi, yüksek enerji emme kapasitesi ve yük taşıma dayanımı sayesinde darbe emici, hafif yapı ve enerji absorbe edici uygulamalar için ideal bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Özellikle otomotiv, havacılık ve spor ekipmanları gibi alanlarda kullanılabilir. Elmas geometrisi, rijitlik gerektiren uygulamalarda örneğin yapısal destek elemanları veya yüksek rijitlik gerektiren mühendislik uygulamalarında tercih edilebilir. HMK ve YMK geometrileri, hafiflik ve dayanım arasında bir denge sunarak çok yönlü uygulamalarda kullanılabilir.

Öneriler

Bu çalışma karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının mekanik performansını anlamak için önemli bir temel sağlamaktadır. Çalışma farklı geometrik yapıların mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymuş ve uygulama alanlarına göre doğru tasarım seçiminin önemini vurgulamıştır. Gelecekte şu konular üzerinde çalışılması önerilmektedir:

- Farklı malzeme kombinasyonları ve kaplama yöntemlerinin etkisinin incelenmesi
- Daha karmaşık yükleme koşulları altında (örneğin, dinamik yükleme) bu yapıların performansının değerlendirilmesi
- Geometrik parametrelerin (örneğin hücre boyutu, bağlantı kalınlığı) optimize edilerek mekanik özelliklerin iyileştirilmesi.

Bu sonuçlar karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının hafiflik, dayanım ve enerji emme kapasitesi gerektiren mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

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

Kaynakça

- [1] Yin, H. T., Lang, M. M., & Zhao, Y. N. (2014). Research on carbon fiber composite materials and F1 racing automobile design. *Applied Mechanics and Materials*, 454, 263-267.
- [2] Yaqoob, K., Amjad, I., Munir Awan, M. A., Liaqat, U., Zahoor, M., & Kashif, M. (2023). Novel method for the production of titanium foams to reduce stress shielding in implants. *ACS omega*, 8(2), 1876-1884.
- [3] Wang, Y., Zeng, H., Nie, B., Jia, F., & Gao, Q. (2024). Energy absorption characteristics of carbon fiber reinforced plastic/aluminum hybrid materials double arrow-head auxetic structure. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 26(4), 490-506.
- [4] Pyl, L., Kalteremidou, K. A., & Van Hemelrijck, D. (2018). Exploration of specimen geometry and tab configuration for tensile testing exploiting the potential of 3D printing freeform shape continuous carbon fibre-reinforced nylon matrix composites. *Polymer Testing*, 71, 318-328.
- [5] Vijayanandh, R., Venkatesan, K., Ramesh, M., Raj Kumar, G., & Senthil Kumar, M. (2019). Optimization of orientation of carbon fiber reinforced polymer based on structural analysis. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(11), 3020-3029.
- [6] Di Caprio, F., Acanfora, V., Franchitti, S., Sellitto, A., & Riccio, A. (2019). Hybrid metal/composite lattice structures: Design for additive manufacturing. *Aerospace*, 6(6), 71.
- [7] Ermurat, M., & Gebel, M. E. (2021). Kompozit eklemeli imalat için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parça üretilebilirliğinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 57-68.
- [8] Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R., & Özdemir, V. (2019). Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 663-674.
- [9] SEZER, H., Eren, O., BÖRKLÜ, H., & Özdemir, V. (2019). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2).
- [10] Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., ... & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150.
- [11] Wang, N., Meenashisundaram, G. K., Chang, S., Fuh, J. Y. H., Dheen, S. T., & Kumar, A. S. (2022). A comparative investigation on the mechanical properties and cytotoxicity of Cubic, Octet, and TPMS gyroid structures fabricated by selective laser melting of stainless steel 316L. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 129, 105151.
- [12] Tang, W., Zhou, H., Zeng, Y., Yan, M., Jiang, C., Yang, P., ... & Zhao, Y. (2023). Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 201, 123642.
- [13] Rico-Baeza, G., Pérez-Soto, G. I., Morales-Hernández, L. A., Cuan-Urquizo, E., & Camarillo-Gómez, K. A. (2023). Additively manufactured foot insoles using body-centered cubic (BCC) and triply periodic minimal surface (TPMS) cellular structures. *Applied Sciences*, 13(23), 12665.
- [14] Yu, S., Sun, J., & Bai, J. (2019). Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design*, 182, 108021.
- [15] Saleh, M., Anwar, S., Al-Ahmari, A. M., & Alfaify, A. (2022). Compression performance and failure analysis of 3D-printed carbon fiber/PLA composite TPMS lattice structures. *Polymers*, 14(21), 4595.
- [16] Tang, D., Gao, T., Chen, H., Tian, M., He, M., & Xu, S. (2024). Structure optimization and heat dissipation performance of additive-manufactured diamond/SiC and carbon fiber/SiC TPMS structural panel. *Journal of Manufacturing Processes*, 127, 589-598.
- [17] Lyu, Y., Gong, T., He, T., Wang, H., Zhuravkov, M., & Xia, Y. (2024). Study on the Energy Absorption Performance of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Structures at Different Load-Bearing Angles. *Biomimetics*, 9(7), 392.
- [18] Alagha, A. N., Sheikh-Ahmad, J. Y., Almesmari, A., Jarrar, F., Almaskari, F., & Abu Al-Rub, R. K. (2024). Mechanical Behavior and Energy Absorption of TPMS Diamond Structures and Hybrid SC-FCC-BCC Plate-Lattices. *Journal of Engineering Mechanics*, 150(12), 04024088.
- [19] Disayanan, D., Buntornvorapan, P., Sukprasertchai, T., & Uthaisangsuk, V. (2024). Improving energy absorption and failure characteristic of additively manufactured lattice structures using hollow and curving techniques. *Composite Structures*, 337, 118067.
- [20] Mu, Y., Jin, Y., Ji, H., Luo, J., Li, G., Xu, M., ... & Du, J. (2024). Mechanical performance of interpenetrating phase composites with multi-sheet lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 276, 109369.
- [21] Peng, C., Tran, P., & Mouritz, A. P. (2022). Compression and buckling analysis of 3D printed carbon fibre-reinforced polymer cellular

- composite structures. *Composite Structures*, 300, 116167.
- [22] Ormiston, S., & Srinivas Sundarram, S. (2024). Fiberglass-reinforced triply periodic minimal surfaces (TPMS) lattice structures for energy absorption applications. *Polymer Composites*, 45(1), 523-534.
- [23] Tang, D., Gao, T., Chen, H., Tian, M., He, M., & Xu, S. (2024). Structure optimization and heat dissipation performance of additive-manufactured diamond/SiC and carbon fiber/SiC TPMS structural panel. *Journal of Manufacturing Processes*, 127, 589-598.
- [24] Peng, C., Tran, P., & Mouritz, A. P. (2022). Compression and buckling analysis of 3D printed carbon fibre-reinforced polymer cellular composite structures. *Composite Structures*, 300, 116167.
- [25] Poddar, P., Olles, M., & Cormier, D. (2022). Mechanical response of carbon composite octet truss structures produced via axial lattice extrusion. *Polymers*, 14(17), 3553.
- [26] Lazar, P. J. L., Subramanian, J., Natarajan, E., Markandan, K., & Ramesh, S. (2023). Anisotropic structure-property relations of FDM printed short glass fiber reinforced polyamide TPMS structures under quasi-static compression. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9562-9579.
- [27] Saleh, M., Anwar, S., Al-Ahmari, A. M., & AlFaify, A. Y. (2023). Prediction of mechanical properties for carbon fiber/PLA composite lattice structures using mathematical and ANFIS models. *Polymers*, 15(7), 1720.
- [28] Leiffer, J. J. (2022). Behavior of 3D Printed Polymeric Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Cellular Structures Under Low Velocity Impact Loads.
- [29] Akbay, Ö. C., Bahce, E., & Ölmez, C. (2022). Investigation of Mechanical Behavior of Scaffolding Structures Produced Using CoCr Alloy by Selective Laser Melting Method. *ICONTECH INTERNATIONAL JOURNAL*, 6(2), 18-26.
- [30] Akbay, Ö. C., & Bahçe, E. (2024). Investigation of mechanical performance of hybrid design porous structures manufactured from CoCr Alloy. *Progress in Additive Manufacturing*, 1-16.
- [31] Stepinac, L. (2024). *Characterisation and modelling of additively manufactured polymeric tpms lattices for structural application* (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Civil Engineering).
- [32] Sengsri, P., Fu, H., & Kaewunruen, S. (2022). Mechanical properties and energy-absorption capability of a 3D-printed TPMS sandwich lattice model for meta-functional composite bridge bearing applications. *Journal of Composites Science*, 6(3), 71.



Yerüstü Madencilik Delme-Patlatma Faaliyetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi

Evaluation of Surface Mining Drilling and Blasting Activities in Terms of Occupational Health and Safety

Sümevra Cevheroğlu Çıra ^{1*}, Özgür Akkoyun²

¹Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, sumeyra@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7665-7514>

²Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, oakkoyun@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9103-8300>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 20 Aralık 2024
Revizyon 27 Ocak 2025
Kabul 28 Ocak 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

Delme-patlatma, İSG - Risk değerlendirme, Fine-Kinney

ÖZ

Madencilik faaliyetleri 6331 sayılı İş Sağlığı Güvenliği (İSG) yasası, ona bağlı mevzuat ve ilgili bakanlık tarafından çok tehlikeli işler olarak sınıflandırılmıştır. Madencilik faaliyetlerinin içinde de en tehlikeli işlerin başında delme-patlatma işleri gelmektedir. Bu çalışmada delme-patlatma faaliyetleri için literatürde yapılan İSG çalışmaları incelenmiş, mevzuatın getirdiği düzenlemeler değerlendirilmiş ve ortalama bir yerüstü maden işletmesinde uygulanan delme patlatma faaliyeti ile ilgili karşılaşılabilecek hemen tüm tehlikeler ortaya çıkarılmış, bu tehlikelerden yola çıkılarak riskler tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında tespit edilen 215 adet tehlike Fine-Kinney risk değerlendirme yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Risk değerlendirmesi sonucunda elde edilen veriler analiz edilerek yorumlanmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 December 2024
Received in revised form 27 January 2025
Accepted 28 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Drilling-blasting, occupational health and safety risk assessment, Fine-Kinney

ABSTRACT

Mining activities are classified as very dangerous jobs under the Occupational Health and Safety (OHS) Law numbered 6331, the related regulations and ministry. Among mining activities, drilling and blasting operations are among the most hazardous jobs. This study examines the OHS studies conducted in the literature regarding drilling and blasting activities, evaluates the regulations set forth by the legislation, and identifies almost all potential hazards associated with drilling and blasting activities applied in an average surface mining operation. Based on these hazards, risks have been determined. A total of 215 potential hazards identified within the scope of the study were assessed using the Fine-Kinney risk assessment method. The data obtained from the risk assessment were analyzed and the conclusions were shared.

Doi: 10.24012/dumf.1603806

* Sorumlu Yazar

Giriş

Türkiye’de iş sağlığı ve güvenliği konusu 4857 sayılı İş kanunu 5. bölümünde bir kanunun bölümü olarak bulunuyordu. Tek başına ve sadece iş sağlığı güvenliğini konu alan bir kanun, İSG kanunu, gelişmiş Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında geç bir tarihte, ilk kez 2012 yılında yayınlanmış ve takip eden yıllarda kademeli olarak yürürlüğe girmiştir. 6331 sayılı İSG kanunu ile işyerleri farklı tehlike sınıflarına ayrılmış ve hemen bütün iş yerleri için risk değerlendirme çalışması yapmak zorunlu hale getirilmiştir. Yine aynı kanuna bağlı ve bakanlıkça yapılan sınıflandırma çalışmaları ile maden işyerleri ‘Çok tehlikeli (A)’ sınıfında yer almışlardır. Maden işyerleri gerçekten de gerek kendine özgü koşulları ve gerekse ülkemizde geçmişten günümüze yaşanan iş kazaları göz önüne alındığında hemen herkes tarafından çok tehlikeli işyerleri olarak değerlendirilmektedirler. Madencilik, birçok “çok tehlikeli” faaliyeti içeren karmaşık bir çalışma disiplindir. Ancak bu faaliyetler içinde, en tehlikelilerinden birisi de delme-patlatmadır. Delme-patlatma faaliyeti yoğun olarak büyük miktarlarda patlayıcı madde ile yapılan bir işlem olduğu için bu alanda yapılacak bir hata çok büyük can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir.

Delme-patlatma faaliyetleri sırasında alınması gereken iş sağlığı güvenliği tedbirleri ile ilgili olarak, 6331 sayılı kanundan çok önce, 1984 ve 1987 yıllarında tüzükler [1], [2] ve daha sonraki yıllarda yayınlanan yönetmelik [3] kılavuz niteliğindeki kaynaklardır. Bunlara ek olarak Şafak (2006) tarafından bir açık ocak işletmesindeki madencilik faaliyetleri Çeklist Metodu ve L Tipi Risk Değerlendirme Karar Matrisi Yöntemi ile irdelenmiş, risk teşkil eden durumların kabul edilebilir seviyeye indirilebilmesi için alınması gereken önlemler belirlenmiştir [4]. Atakol vd. (2015) mevcut riskleri Fine-Kinney metodu ile raporlayarak tehlike potansiyellerini önem sırasına göre belirlemiştir [5]. Ayrıca oluşan bir iş kazası hata ağacı analizi ile değerlendirilmiştir. Altınok (2016) ve Reis (2019) agrega üretim tesislerinde Fine-Kinney Metodunu kullanarak risk değerlendirmesi yapmış ve belirledikleri riskleri tehlike kaynaklarına, düzeylerine, şiddetlerine ve etmenlerine göre gruplandırarak analiz etmiş, sektörde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının iyileştirmesine yönelik çözüm önerileri getirmişlerdir [6-7]. Aykal (2018), bir kalker rezervi kazanımı için yapılan çalışmalar sırasında oluşabilecek risk unsurlarını belirleyip bu unsurları azaltmak üzere saha çalışmaları yaparak olası iş kazalarının önüne geçilmesini amaçlamıştır [8]. Dovan (2018), bir taş ocağında delme patlatma yöntemi ile yapılan üretimlerde, patlatma işlerinde kullanılan gecikmeli elektriksiz kapsüllerin yerine elektronik kapsüllerin kullanımını sağlayarak patlatma

işlemini daha verimli hale getirmenin yanısıra iş güvenliğinin artırılması ve çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik araştırmalar yapmıştır [9]. Kantarcı (2023), bir asfaltit maden sahasında delme patlatma risk değerlendirmesi için L tipi matris ve Fine-Kinney metodlarını karşılaştırmış ve madencilik sektörü açısından Fine-Kinney metodunun, L tipi matris yöntemine kıyasla daha hassas sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur [10]. Kılıç (2023), bir altın ocağında L tipi matris ile Fine-Kinney metodlarını kullanarak risk analizleri yapmış bu iki farklı yöntemle yapılan risk analizinde yöntem farklılığından kaynaklı sınıflandırmanın ne kadar değiştiğini ortaya koymuştur [11].

Bu çalışmada yerüstü maden işletmelerinde sıklıkla uygulanan delme-patlatma faaliyetleri, İSG açısından değerlendirilmiş, 6331 sayılı yasa ve mevzuatın zorunluğu kıldığı şekilde bir risk değerlendirme çalışması yapılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikli olarak yasal mevzuat dikkate alınmış, buna literatürdeki bilgiler ve bu çalışmanın yazarlarının delme-patlatma konusundaki mesleki tecrübeleri eklenerek delme-patlatma faaliyetleri için risk değerlendirme çalışması yapılmıştır. Yöntem olarak Fine-Kinney yöntemi kullanılmıştır. Delme-patlatma faaliyeti risk değerlendirmesi yapılırken patlayıcı madde deposu bulunan bir maden işletmesi temel alınarak değerlendirme yapılmış, faaliyetler ise patlatma öncesi, patlatma sırasında ve patlatma sonrasındaki faaliyetler olarak sınıflandırılarak uygulama yapılmıştır. Bu faaliyet grupları ayrıca alt gruplara da ayrılmışlardır. Kullanılan materyal, metod, elde edilen bulgular, çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

Materyal ve metod

Bu çalışmada yerüstü madenciligi delme-patlatma faaliyetleri için iş sağlığı güvenliği risk değerlendirme çalışması yapılmıştır. Çalışma için kullanılan materyal Fine-Kinney risk değerlendirme yöntemidir. Yöntem hakkında takip eden bölümde bilgi verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan metod olarak ise şöyle bir yol izlenmiştir; Genelde madencilik ve özelde delme-patlatma faaliyetleri ile ilgili yasal mevzuat ve literatür, iş sağlığı güvenliği açısından değerlendirilmiş ve delme-patlatma faaliyeti hemen tüm bileşenlerine ayrılarak her bir bileşenin risk skoru hesaplanmıştır. Bu değerlendirme yapılırken özellikle frekans parametresi ile ilgili olarak, yazarların delme patlatma konularındaki saha tecrübeleri, farklı bilimsel ve mühendislik amaçlı çalışmalar için topladıkları veriler de bu değerlendirmeye ışık tutmuştur.

Fine-Kinney Risk Değerlendirme Yöntemi

Fine ve Kinney iki farklı araştırmacının isimleridir. Yöntemi ilk olarak W. T. Fine Kaliforniya Donanma Silah Merkezi için geliştirmiş ve 1971 yılında yayına dönüştürerek önermiştir [12] ve bu çalışmayı temel alan Kinney ve çalışma arkadaşı Wiruth 1976 yılında Amerika'da Kaliforniya Donanma Silah Merkezi'nde hazırlanan teknik bir belgede Fine-Kinney yönteminden söz etmişlerdir [13]. Fine-Kinney yöntemi ile risk analizi özellikle Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Gözlemlerimize göre Türkiye'de 2013 yılından sonra yani İSG yasasının yürürlüğe girmesinden sonra 5x5 matris yöntemi hızla kullanılmaya başlandı, ancak yaşanan sorunların ardından bu yöntemin kullanımı azaldı. Birgören'e (2017) göre, Fine-Kinney yönteminin kullanımı Türkiye'de de giderek yaygınlaşmaktadır [14]. Fine-Kinney yönteminde, tehlikenin gerçekleşmesi halinde insan, işyeri ve çevre üzerinde oluşturacağı zarar ya da hasarın şiddeti değerlendirilmekte ortaya çıkması olası risklerin sonuçları derecelendirilmektedir. Yöntem, işyeri istatistiklerinin kullanımına imkân sağlamakta ve bu yönüyle gerçekçi sonuçlar vermektedir. Risk değeri derecesine göre alınacak önlemlerin öncelik düzeyi belirlenmekte ve risk düzeyine göre önem sıralaması yapılmaktadır [15]. Fine-Kinney risk değerlendirme yönteminde risk skoru;

$$\text{Risk Skoru} = \text{Olasılık} \times \text{Frekans} \times \text{Şiddet} \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada olasılık (O) riskin ortaya çıkma olasılığı, frekans (F) çalışanların söz konusu risk ile çalışma koşulları içinde karşılaşma sıklıkları ve şiddet (Ş) risk gerçekleşirse ortaya çıkaracağı zarar derecesi olarak ifade edilir. Bu yöntemde eşitlikteki tüm parametreler için tablolar ve değerler hazır olarak verilir, 5x5 L matrisinde olduğu gibi kullanıcının inisiyatifine bırakılmaz. Fine-Kinney yöntemi olasılık değerleri Tablo1'de verilmiştir. Aynı şekilde Fine-Kinney yöntemi frekans tablosu Tablo 2'de ve Fine-Kinney yöntemi şiddet değerleri tablosu Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo1. Fine-Kinney yöntemi olasılık değerleri tablosu [15]

Olasılık	Açıklama
0,2	Pratik olarak imkânsız
0,5	Zayıf ihtimal
1	Oldukça düşük ihtimal
3	Nadir fakat olabilir
6	Kuvvetle muhtemel
10	Çok kuvvetli ihtimal

Olasılık, frekans ve şiddet değerleri çarpma işlemine tabi tutulduktan sonra elde edilen sonuç risk skoru değeridir ve risklerin derecelendirilmesinde kullanılır. Tablo 4'de olasılık, frekans ve şiddet değeri çarpıldıktan sonra bulunan risk değerinin derecelendirilmesinde kullanılan sınıflar verilmiştir. Risk skor değeri olarak sınır değerler elde edilmesi durumunda güvenlik açısından bir üstteki risk derecesine göre önlem alınması önerilir. Yani elde edilen risk skorunun 200 olması durumunda "Yüksek" risk kategorisinde değerlendirilmelidir. Bazı pahalı tedbirler bu sınırların düştüğü bölgelere göre yapılmaktadır bu nedenle kesinlik önemlidir [16]

Tablo 2. Fine-Kinney yöntemi frekans değerleri tablosu [15].

Frekans	Açıklama	Gerçekleşme
0,5	Çok nadir	Senede bir ya da daha az
1	Oldukça nadir	Senede bir ya da birkaç kez
2	Nadir	Ayda bir ya da birkaç kez
3	Ara Sıra	Haftada bir ya da birkaç kez
6	Sıklıkla	Günde bir ya da birkaç kez
10	Sürekli	Sürekli ya da saatte birden çok

Tablo 3. Fine-Kinney yöntemi şiddet değerleri tablosu [15].

Şiddet	Açıklama	Gerçekleşme
1	Dikkate Alınmalı	Ucuz atlatma, çevresel zarar bulunmamaktadır
3	Önemli	Küçük hasar, yaralanma, dâhili ilk yardım, arazi sınırlarında çevresel zarar
7	Ciddi	Önemli hasar, yaralanma, dış ilk yardım, arazi sınırları dışında çevresel zarar
15	Çok	Kalıcı hasar, yaralanma, iş kaybı, çevresel engel oluşturma
40	Çok	Kötü ölümlü kaza, ciddi çevresel problem
100	Felaket	Birden fazla ölümlü kaza, çevre felaketi

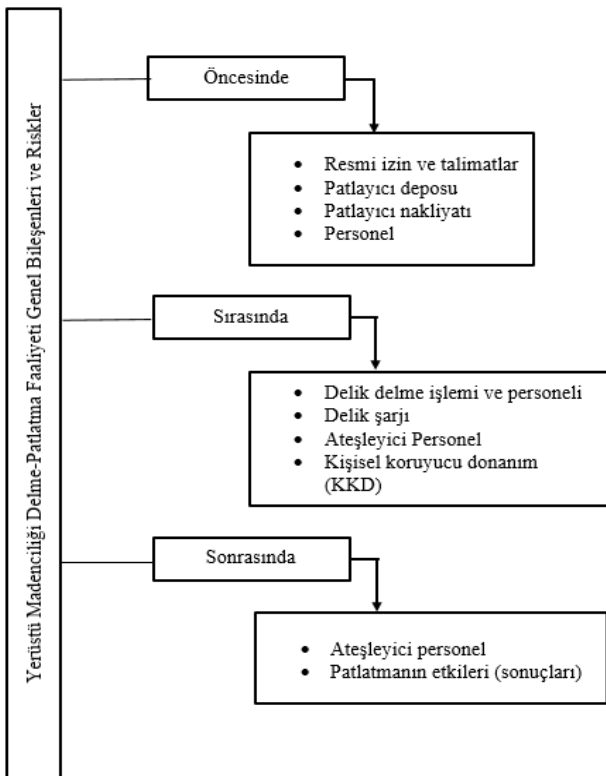
Tablo4. Fine-Kinney yöntemi risk derecelendirme tablosu

Sıra	Risk	Değeri
1	R<20	Kabul edilebilir (Önemsiz)
2	20<R<70	Kesin
3	70<R<200	Önemli
4	200<R<400	Yüksek
5	R>400	Çok yüksek

Bulgular ve Tartışma

Yerüstü madencilik delme ve patlatma faaliyetleri

Bilindiği gibi madencilik faaliyetlerinde kullanılan patlayıcı maddeler mevzuatta “sivil kullanım amaçlı patlayıcı maddeler” olarak tanımlanan türlerdir ve bu kullanım ile ilgili iş ve işlemler 6551 sayılı Kanunun 2.Maddesi hükmüne istinaden hazırlanmış olan 87/12028 sayılı Tüzük hükümleri, Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği ve İçişleri Bakanlığı tarafından 25.04.2023 tarihinde yayınlanan Sivil Kullanım Amaçlı Patlayıcı Madde İşlemleri Genelgesi çerçevesinde yürütülmektedir. Yerüstü madencilik yönteminde uygulanan delme-patlatma faaliyetini; tüm yasal izin ve işlemlerin sonuçlandırıldığı bir işletmedeki patlayıcı maddenin depolanması, patlayıcı maddenin işletme dışında ve içinde nakledilmesi, delici makine ve delik delme, deliklerin patlayıcı ile doldurulması, patlatmanın yapılması ve patlatmanın sonuçlarına ulaşılması şeklinde kurgulayabiliriz. Bu durumda, delme-patlatma faaliyetleri ile ilgili riskler; patlatma öncesi riskler, patlatma sırasında karşılaşılabilecek riskler ve son olarak patlatma sonrasında karşılaşılabilecek riskler olarak üç aşamaya ayrılabilirler. Her üç aşamada da alt faaliyet alanları ve bunların içerdikleri riskler mevcuttur. Şekil 1’de verilen basitleştirilmiş şema delme-patlatma faaliyeti ile ilgili risk içeren alt işlem adımlarını içermektedir.



Şekil 1. Delme-patlatma faaliyeti ile ilgili risk içeren alt işlem adımları

Patlatma Öncesindeki İşlemler ile İlgili Riskler

Resmi izin ve talimatlar

Yerüstü madencilik delme patlatma faaliyetlerinde ilk aşama; patlayıcı maddelerin tedarik edilmesi, taşınması, saklanması, tüketilmesi gibi faaliyetler ile ilgili mevzuatta öngörülen izinlerin yanı sıra, patlayıcıyı kullanacak personelin de yine mevzuatta öngörülen eğitimleri alması ve belgelere sahip olması sürecidir. Patlayıcı maddelerin üretilmesi gibi taşınmaları, depolanmaları ve amacına uygun olarak kullanılması da ilgili mevzuat ile kontrol edilmekte, patlatma faaliyetlerine bu mevzuata uygun olarak jandarma nezaret etmektedir. Bu nezaret daha çok patlayıcının tümünün amaca uygun olarak tüketilip tüketilmediğinin kontrolü olsa da aynı mevzuatta nakliye ve saklama koşulları ayrıntılı olarak düzenlenmiştir. Yine ilgili mevzuat patlayıcı maddenin kullanılmasında çalışacak personelin bu alanda eğitimli olmasını zorunlu kılmaktadır. Yapılan sınavlar ile başarılı olanlara verilen ateşleyici yeterlilik belgesine sahip olmayanlar patlayıcı maddelerin kullanıldığı ateşleme işlemlerinde yer alamazlar. Yine aynı mevzuat patlayıcıların depolanması ile ilgili koşulları da ayrıntılı bir şekilde düzenlemiştir. Maden işyerleri kullanım kapasiteleri, özel koşullar ve tercihlerine göre patlayıcıyı maden işyerlerindeki özel depolarda saklayarak kullanabilirler ya da kendilerine ait depolar yerine her kullanım öncesi yetkili tedarikçiden satın alma ve nakliye yolu ile işyerlerine getirerek kullanma yolunu tercih edebilirler.

İSG açısından bir değerlendirmenin daha başlangıcında maden işyeri ile ilgili tüm bu yasal izin, sertifika, ehliyet, talimat vb. gibi yasal belgelerin eksiksiz olması aranmalıdır. Patlayıcının taşınması, depolanması ve kullanılması ile ilgili en küçük bir yasal eksiklik çok büyük risk olarak geri dönecektir. Bu nedenle risk değerlendirmesi sürecinin daha başında ilk yapılacak iş yukarıda sözü edilen belge ve izinlerin eksiksiz olarak tamamlanmış olması ve depo özelliklerinin yasada belirtilen koşulları sağlıyor olmasıdır.

Patlayıcı Deposu

İlgili yasal mevzuata uygun olarak patlayıcı deposuna sahip olan maden işyerlerine İSG açısından bakıldığında alınması gereken birçok önlem bulunmaktadır. Öncelikle deponun fiziki koşulları ilgili mevzuata uygun şekilde (farklı patlayıcı türleri için ayrılmış bölümler, havalandırma, belirli sıcaklık koşulları, güvenli kapılar, tuğla duvar, dar saçaklı çatı vb.) olması, kapısında statik yük giderici levhaya bağlı metal çubuk olması, yağmur oluklarının açık olması, yangın söndürücülere sahip olması gibi önlemler bunlardan bazılarıdır[2]. Çalışma kapsamında sadece maden işyerlerinde bulunan sabit patlayıcı deposu için 38 adet dikkat edilmesi gereken tehlike ve bunlara bağlı risk tespit edilmiş olup bunlardan bazıları aşağıda Tablo 5’te verilmiştir.

Patlayıcı Nakliyatı ve Personeli

Patlayıcı maddenin nakledilmesi işlemi, madencilik faaliyetleri içinde önemli bir yere sahiptir. Bunun sebebi çok tehlikeli olan patlayıcı maddelerin nakli sırasında yaşanabilecek çok fazla tehlike olmasıdır. Patlayıcı nakliyesi maden işletmesi içindeki depodan patlatma

alanına gibi kısa bir mesafe olabileceği gibi deposu olmayan işletmeler için patlayıcı tedarikçisinin deposundan maden işletme noktasına kadar uzun bir mesafe de olabilir. Patlayıcı madde nakliyatı barındırdığı riskler nedeniyle ayrıntılı ve sıkı mevzuat maddeleri ile kontrol edilmektedir [2]. Bunun bir sebebi de patlayıcı maddeyi amacı dışında kullanılabilir kişilerin eline geçmesinin önlenmesi ve amacı doğrultusunda kullanılarak tamamen tüketildiğinden emin olunmasıdır. Çalışma kapsamında sadece bu alt başlık altında 30 adet risk tespit edilmiştir. Bunlardan sadece bazıları aşağıda Tablo 6'da verilmiştir.

Patlatma sırasındaki işlemler ile ilgili riskler

Delik delme işlemi ve personeli

Yerüstü madencilik patlatma faaliyeti delme işlemi ile başlar. Patlatma planlanan bölgede patlatma düzenine (paternine) uygun deliklerin delinmesi işlemi, bu amaç için özel tasarlanmış delici makineler ile gerçekleştirilir. Delici makine en az bir personel tarafından idare edilir ve bu sırada önemli oranda gürültü ortaya çıkar.

Modern makineler dışarıya toz vermeyecek şekilde tasarlanmış olsalar da işletmelerde hala çıkan tozu dışarıya veren delici makineler yaygın olarak kullanılmaktadır. Delici makine ile delik delme işlemi sırasında önemli bir yüksekliğe sahip (5m-12m) basamağın hemen yanında çalışıyor olmak, çok yakın mesafeden gürültüye maruz kalmak, yüksek oranda toza maruz kalmak, gürültü nedeniyle etrafımızdan geçip giden kamyon ve iş makinelerinden kaynaklanan tehlikelere maruz kalmak gibi

birçok tehlike ve bunlardan doğan risk ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında sadece bu alt başlık altında 36 adet risk tespit edilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda Tablo 7'de verilmiştir.

Delik şarjı

Delici makine ile hazırlanan deliklere patlayıcının şarj edilmesi patlatma işleminin önemli adımlarından birisidir. Delik şarjı sırasında bu işe özel makineler kullanılabildiği gibi manuel olarak da delik şarjı yapılabilmektedir. Her iki durumda da birebir temas edilen şey kilolarca patlayıcı madde olup bu noktaya kadar bir arada durmaları özel tedbirler ile önlenen kapsüller ile yemleme ve ana patlayıcılar, tam bu anda birbirlerine bağlanmaktadır. Çok hassas patlayıcılar olan kapsüller ile çok güçlü patlayıcılar olan yemleme ve ANFO (Amonyum Nitrat + Fuel Oil) burada bir araya geldiği için büyük riskler ortaya çıkmaktadır. Genel kural ne depoda, ne nakliye sırasında ne de başka bir yerde/anda çok hassas patlayıcılar ile çok güçlü patlayıcılar bir arada bulundurulmazlar. Bir araya geldikleri ilk ve tek yer patlatmanın yapılacağı yerde deliklerin başıdır. Bu nedenle de bu işlem sırasında söz konusu bölgeye sadece bu konuda eğitim almış ehliyetli kişilerin girmesine izin verilmelidir. Delik şarjında bir başka konu da deliklerin doldurulması sırasında bağlantıların doğru sıra ile yapılması ve bağlantılarda kopmalara neden olunmamasıdır. Ateşleme düzeninde, gecikme sırasında yapılacak bir hata, verimsiz patlatmanın yanı sıra iş kazalarına da neden olabilmektedir. Çalışma kapsamında sadece bu alt başlık altında 61 adet risk tespit edilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 5. Patlayıcı Deposu Örnek Tehlike ve Riskleri

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Depo zemini temizlenmesi kolay ve kıvılcım meydana getirmeyecek malzemeden	Tozların ve sürtünmenin yaratacağı yangın riski	1	1	15	15	Kabul edilebilir
Depoda yıldırımdan korunmaya karşı bakımları yapılmış bir paratoner sisteminin	Yıldırım düşmesi sonucu yangın ve patlama riski	3	1	40	120	Önemli
Depolarda sıcaklık 8°C'den az 30°C'den çok olması	Sıcak veya soğuktan patlayıcı maddenin olumsuz etkilenmesi sonucu riskler	1	1	40	40	Kesin
Depoya kibrit, çakmak, sigara, pipo vb. ile giriş yapılması	Depoda yangın riski	3	1	40	120	Önemli
Dinamit ve kapsüllerin aynı depoda ve birlikte depolanması	Kapsüllerin patlayarak dinamiti ateşlemesi sonucu patlama riski	3	2	40	240	Yüksek
Duvarlarının nem geçirmez nitelikte olmaması, duvarda çatlakların olması	Patlayıcının uygun koşullarda saklanmaması sonucu bozulma ve yangın riski	3	1	15	45	Kesin
Kullanılan el arabalarının zeminle temas eden kısımlarının yalıtımsız olması	Statik elektrik nedeniyle yangın riski	1	1	15	15	Kabul edilebilir
Patlayıcı maddelerin yerleştirilirken zemine ve istif kurallarına uyulmadan yerleştirilmemesi	Patlayıcının uygun koşullarda saklanmaması sonucu ve yangın riski	1	2	15	30	Kesin
Statik elektrik yük giderici levhanın periyodik kontrolünün her yıl yapılmaması	Statik elektrik nedeniyle yangın riski	1	1	15	15	Kabul edilebilir
Yangın söndürme cihazlarının olmaması/periyodik bakımlarının yapılmaması	Olası yangının fark edilmemesi sonucu patlama riski	6	1	15	90	Önemli

Tablo 6. Patlayıcı Nakliyesi Örnek Tehlike ve Riskleri

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Patlayıcı madde depolama ve nakil işlerinde çalışanların işin ve işyerinin özelliğine uygun ayakkabı ve kıyafet giymemesi	Statik elektrik nedeniyle yangın ve patlama riski	1	1	40	40	Kesin
Patlayıcı madde taşınacak motorlu taşıtlarda en az iki yangın söndürme cihazının olmaması	Yangına müdahale edememe riski	3	1	15	45	Kesin
Patlayıcı taşıyan sürücülerin ehliyetsiz, uyuklu, yorgun, hasta, dalgın veya moralinin bozuk olması	Patlayıcının sağlıklı nakledilememesi sonucu olası riskler	6	1	15	90	Önemli
Patlayıcıların özel sandık içinde taşınmaması	Patlayıcının sağlıklı nakledilememesi sonucu yangın ve patlama olasılığı	3	1	40	120	Önemli
Patlayıcıların taşınması ve depolanması hakkında talimat olmaması.	Talimatlara uymayan personelin kazaya neden olası olasılığı	1	1	15	15	Kabul edilebilir
Taşıma araçlarına uygun uyarı levhaların asılmaması	Çevredekilerin uyarılmamaları sonucunda zarar görmeleri riski	1	1	15	15	Kabul edilebilir
Kapsüllerle diğer patlayıcı maddeler, aynı kap içinde bir arada bulundurulmaları ya da taşınmaları	Patlayıcı maddenin kontrolsüz patlama riski	3	2	40	240	Yüksek
Taşıma sırasında kapsüllerin kablo uçlarının birbirine bağlı olması	Statik elektrik nedeniyle patlama ve yangın riski	3	2	40	240	Yüksek
Taşıma aracı arkasında statik elektriğe karşı, yola temas eden zincir takılmaması	Araçtaki olası elektrik kaçağından patlayıcının etkilenmesi riski	3	1	40	120	Önemli
Bozulmuş veya kapsül takılmış olan dinamitlerin araçla taşınması	Patlayıcı maddenin kontrolsüz patlama riski	3	2	40	240	Yüksek

Tablo 7. Delme İşlemi Örnek Tehlike ve Riskleri

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Deliciden parça sıçraması	Operatör ya da yardımcısının kaza geçirmesi	3	3	7	63	Kesin
Kullanılan ağır parçaların düşmesi	Operatör ve yardımcısının yaralanma riski	3	1	7	21	Kesin
Makine kulesinin dikey durumdayken vürütülmesi	Makinanın devrilmesi sonucu zarar operatör ve yardımcılarının zarar görme riski	3	1	7	21	Kesin
Makine yangın söndürme tüpünün olmaması	Makinada yangın çıkması sonucu zarar görme riski	6	1	7	42	Kesin
Operatöre titreşim etkisi	Operatör ve yardımcısının yaralanma riski	3	1	7	21	Kesin
Delici makinada 80 dB üzerinde gürültü oluşması	Operatör ve yardımcılarında duyma kusuru oluşması riski	6	3	7	126	Önemli

Tablo 8. Delik Şarjı Örnek Tehlike ve Riskleri

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Çalışan personelin cep telefonu ve telsiz gibi cihazları kapalı tutmaması	Statik elektrik nedeniyle patlama riski	1	2	7	14	Kabul edilebilir
Fitilli patlatmada yeterli güvenlik mesafesi bırakılmaması	Taş savrulması ve hava şoku nedeniyle yaralanma riski	3	1	7	21	Kesin
Nonel ateşleme kapsülünün erken bağlanması	Patlatmanın olmaması ya da eksik olması sonucu kontrolsüz ateşleme riski	3	1	7	21	Kesin
Sıkılama mesafesinin gereğinden kısa olması	Taş savrulması ve hava şoku nedeniyle yaralanma riski	3	2	7	42	Kesin
Nonel manyetosu yerine uygun olmayan cihaz kullanımı	Patlatmanın olmaması ya da eksik olması sonucu kontrolsüz ateşleme riski	3	1	15	45	Kesin
Şarj işlemi bitmeden nihai bağlantının yapılması	Kontrolsüz patlama riski	3	1	15	45	Kesin
Patlayıcı maddenin sıkılanmadan ateşlenmesi	Taş savrulması ve hava şoku riski	1	3	40	120	Önemli
Patlatma alanında sıkılama ve delik delme işleminin beraber yapılması	Kontrolsüz patlatma sonucu kaza riski	6	3	7	126	Önemli
Dinamitlerin yalıtkan bir delici ile delinmeden kapsül yerleştirilmeye çalışılması	Kontrolsüz patlatma sonucu kaza riski	6	2	15	180	Önemli
Kapsül takılmış dinamitlerin taşınması	Kontrolsüz patlatma sonucu kaza riski	6	3	15	270	Yüksek
Aşırı toz oluşumu	Operatör ve yardımcılarında toz solunması sonrası sağlık sorunları oluşması olasılığı	6	2	7	84	Önemli
Delik boy ve göçük kontrolünün yapılmaması	Sıkılamanın yapılamaması ya da kusurlu patlatma sonucu taş savrulması olasılığı	3	2	15	90	Önemli
Bozuk zeminde makinenin devrilmesi	Operatör ve/veya yardımcılarının zarar görmesi olasılığı	1	2	7	14	Kabul edilebilir
Eğimli zeminde düzgün manevra yapamaması, yetersiz çalışma alanında delme	Makine devrilmesi sonucu operatör ve yardımcılarının zarar görmesi olasılığı	1	1	7	7	Kabul edilebilir

Ateşleyici Personel

Maden işyerlerinde patlayıcı maddelerin kullanımı ile ilgili işlemler 87/12028 sayılı Tüzük kapsamında tanımlanan ateşleyici yeterlilik belgesine sahip personel tarafından icra edilir ve bu personele 'ateşleyici' ya da maden işyerlerindeki yaygın kullanımla 'ateşçi' adı verilir. Bir patlatmanın sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi, İSG açısından sorunsuz uygulanabilmesi ateşleyici personelin eğitimine tecrübesine dikkatine ve İSG açısından işini ne kadar doğru yaptığına bağlıdır.

Patlayıcı maddenin depodan patlatma noktasına nakli, deliklerin şarj edilmesi, hattın bağlanması, çevre güvenliğinin alınması, ateşleme işleminin yapılması ve ateşleme sonrası sahanın güvenlik açısından kontrol edilmesi gibi çok riskli işlerin tümü ateşleyici personeller tarafından yürütülmektedir. Sadece ateşleyici personelin davranışlarına özgü 12 adet risk tespit edilmiş olup bunlardan 3 tanesi Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Ateşleyici Personel Örnek Tehlike ve Riskleri

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Ateşleyicinin çevresel önlemler alınmadan bağlantıları yapması.	Bağlantıların zarar görmesi ya da kontrolsüz patlama olması	3	3	15	135	Kesin
Patlayıcı maddelerin ateşlenmesinde görev alacak kişilerin, ateşleyici yeterlik belgesinin olmaması	Yetkisiz kişilerin patlatma yapmasının çalışanlara zarar verme riski	1	2	15	30	Önemli
Ateşleyicinin kendi emniyeti için yeterli mesafeye gitmemesi veya güvenli bir siper noktasının olmaması	Ateşçinin savrulan taşlardan zarar görmesi olasılığı	6	3	15	270	Yüksek

Kişisel koruyucu donanım (KKD)

Yerüstü maden işyerlerinde patlatma işlemi ile ilgili olarak uygun kişisel koruyuculara örnek olarak; delici makine çevresindekilerin kullanması gereken kulak koruyucuları, basamaklarda ve şev altlarında kabin dışında çalışanların kullanması gereken baretler, patlayıcı madde naklinde çalışan personelin kullanması gereken anti-statik ayakkabılar ve son olarak iş makineleri ve kamyonların hareket halinde olduğu bir ortamda kabin dışında çalışanların fark edilebilmeleri için giymeleri gereken fosforlu yelekler sayılabilir. Çalışma kapsamında sadece bu alt başlık altında 5 adet risk tespit edilmiş ve bunlar Tablo 10'da verilmiştir

Ateşleme işlemi

Doğaldır ki delme-patlatma işlerindeki en yüksek riskli iş adımı ateşleme işlemidir. Bu işlemde deyim yerinde ise az

ama öz riskler vardır çünkü telafisi neredeyse imkansız ve çok yüksek riskler yer alırlar. Bu adımda farklı patlayıcı türleri ve farklı ateşleme sistemleri olmakla birlikte yaygın kullanım olarak; patlayıcı ile doldurulan delikler, özel üretilmiş zaman ayarlı kapsüller yardımı ile belirli uzaklıktaki bir noktadan manyeto ya da benzeri bir araç ile ateşleyici personel tarafından patlatılırlar. Patlatma anından hemen önce sahanın boşaltılması, çevre emniyetinin alınması, yolların kapatılması, civarda varsa sivil insanların tedbir almaları, hazırlıklı olmaları ve psikolojik olarak daha az etkilenmeleri için siren çalınması gibi önlemlerin ardından yapılmalıdır. Patlatma emniyetli bir mesafeden gözlenmeli ve sonraki patlatma için sonuçlar çıkarılmalıdır. Çalışma kapsamında bu alt başlık altında 16 adet risk tespit edilmiş ve bunlardan bazıları Tablo 11 'de verilmiştir.

Tablo 10. Kişisel Koruyucu Donanımlar ve ilgili Tehlike ve Riskler

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Personelin çalışmalar esnasında baret kullanmaması	Cisim düşmesi sonucu yaralanma olasılığı	1	1	7	7	Kabul edilebilir
Personelin çalışmalar esnasında eldiven kullanmaması	Sert ve sivri cisim yaralanması olasılığı	6	1	7	42	Kesin
Personelin çalışmalar esnasında iletken ayakkabı kullanmaması	Statik yük nedeniyle kontrolsüz patlama	3	1	7	21	Kesin
Personelin çalışmalar esnasında kulaklık kullanmaması	Gürültü nedeniyle kulaklarda hasar olasılığı	3	1	7	21	Kesin
Personelin çalışmalar sırasında uyarıcı kıyafet giymemesi	İş makineleri ve kamyonların fark edememesi sonucu kaza riski	6	1	7	42	Kesin

Tablo 11. Ateşleme İşlemi ile İlgili Tehlike ve Riskler

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Ateşleme öncesi ocak içi ve dışı en az 2 km yarı çapta güvenlik önlemleri alınmaması	Patlatma sonrası çevredekilerin zarar görme olasılığı	6	3	7	126	Önemli
Yağışlı ve elektrik yüklü havalarda delik delme, delik sıkılama ve atım yapılması	Yıldırım düşmesi sonucu yangın ve patlama	3	1	7	21	Kesin
Ateşlemede uygun manyeto yerine akü gibi uygun olmayan cihaz kullanılması	Patlatmanın olmaması ya da eksik olması sonucu kontrolsüz ateşleme	3	1	40	120	Önemli
Sıkılamada yalıtkan çubuk kullanılmaması	Patlayıcının kontrolsüz patlaması sonucu zarar görme olasılığı	6	2	40	480	Çok yüksek
Galeri patlatması yapılması	Mevzuata aykırı kontrolsüz patlatma yapılması sonucu savrulan kaya, hava şoku ve titreşim riski	3	1	100	300	Yüksek

Patlatma Sonrasındaki İşlemler ve İlgili Riskler

Patlatma işleminden sonra, yapılan patlamanın sonuçlandırılması adına mevzuata göre alana giriş için elektrikli ateşlemede en az 5 dakika, fitilli ateşlemede ise 1 saat beklemek gerekir [3]. Önce toz ve gaz dağılımı olmalıdır. Daha sonra ateşleyici personel patlatma alanına gidip patlamamış delik olup olmadığını kontrol eder ve olmadığına dair izin verir.

Her patlatma bir diğerinden farklı ve kendine özgü koşullar içerir bu nedenle her patlatmadan ve sonuçlarından çıkarılacak dersler vardır. Bu anlamda patlatma sonuçlarının değerlendirilmesi sonraki patlatmaların daha güvenli ve sağlıklı yapılabilmesi açısından hayati önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında bu başlık altında 14 adet risk tespit edilmiş ve bunlardan bazıları Tablo 12’de verilmiştir.

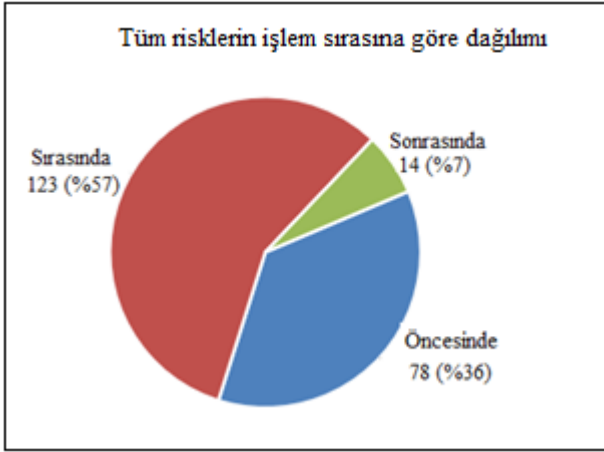
Tablo 12. Patlatma Sonrasındaki İşlemler ile İlgili Tehlike ve Riskler

Tehlike	Risk	O	F	Ş	SKOR	Derece
Patlatma sonrası güvensiz şevlerin kontrol edilmemesi.	Şev kayması sonrası kaza riski ve yaralanma olasılığı	3	1	15	45	Kesin
Zeminde aşırı titreşim oluşması	Çevre yapılarında hasar riski	3	1	40	120	Önemli
Patlatma sonrası yol, zemin ve ayna kontrolü yapılmaması	Şev akması ya da yol çökmesi gibi nedenlerle kaza riski	6	3	7	126	Önemli
Patlamamış kartuş ve kapsüller bulunması kartuş ve kapsüller aranırken kürek, kazma ve benzeri aletlerin kullanılması	Kontrolsüz patlama riski	6	3	15	270	Yüksek

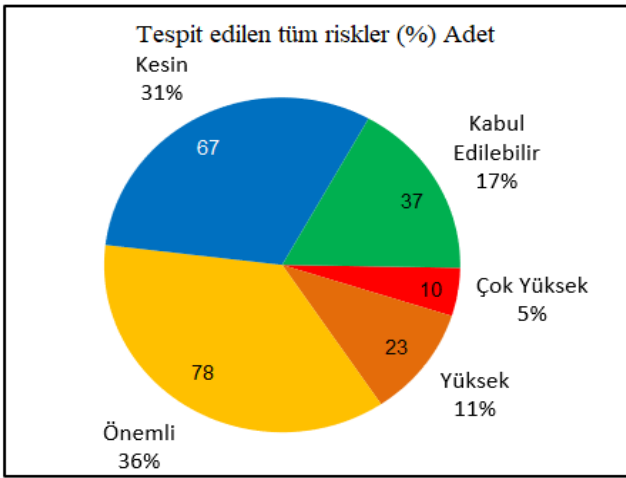
Yapılan çalışmada delme-patlatma faaliyeti üç ana başlık ve 10 alt başlıkta incelenmiş ve toplamda 215 adet risk olasılığı içeren potansiyel tehlike tespit edilmiştir. Bu 215 adet tehlikeden 78 tanesi faaliyet öncesine, 123 tanesi faaliyet sırasına, 14 tanesi de faaliyet sonrasında aittir ve iş akışına göre dağılımı Şekil 2’de verilmiştir. Tespit edilen 215 adet tehlike ve buna bağlı olası risk için Fine-Kinney risk değerlendirme yöntemi uygulanarak risk skorları hesaplanmıştır. Elde edilen risk skorlarına göre dağılım yüzde ve adet olarak Şekil 3’te verilmiştir.

Patlatma faaliyeti öncesinde yapılan işlemler ile ilgili tespit

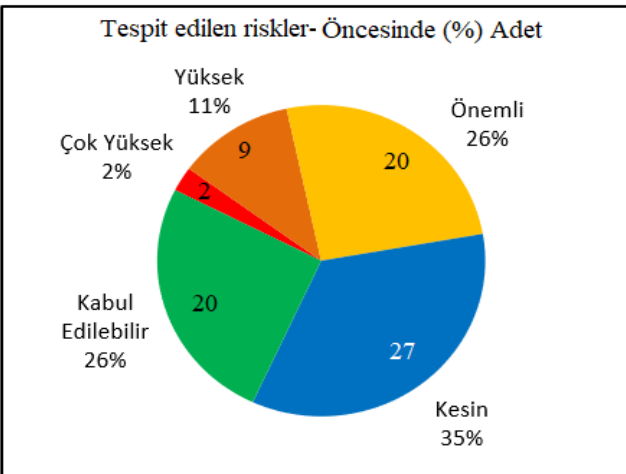
edilen 78 adet riskin dağılımı Şekil 4’te verilmiştir. Patlatma öncesi faaliyetler içinde kabul edilebilir risklerin oranı sadece %26 olarak tespit edilmiş, kabul edilebilir seviyeyi aşan risklerin oranı ise %74 olarak bulunmuştur. Bunlardan yüksek riskler %11, çok yüksek riskler ise %2 olarak tespit edilmiştir (Şekil 4). Patlatma öncesi için öngörülen 78 adet riskten 2 tanesi çok yüksek, 9 tanesi yüksek, 20 tanesi önemli ve 27 tanesi de kesin risk olarak sınıflandırılmıştır. Bu sonuçlar patlatma öncesindeki tutum ve davranışların da iş kazası riskleri açısından çok önemli olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Tespit Edilen Risklerin İş Akışına Göre Dağılımı (%)



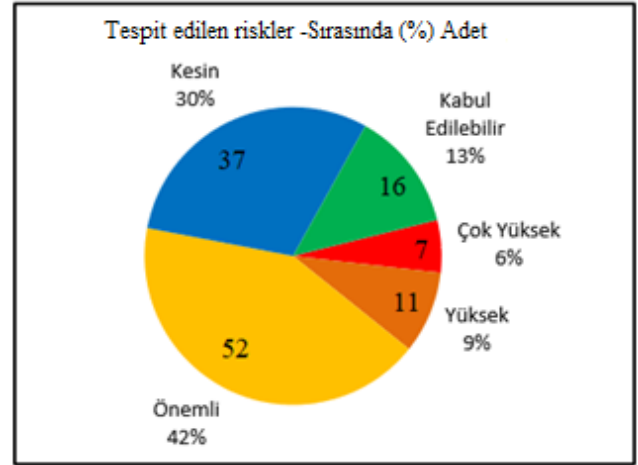
Şekil 3. Tespit Edilen Tüm Olası Risklerin Dağılımı (%)



Şekil 4. Patlatma Öncesi ile İlgili Risklerin Dağılımı (%)

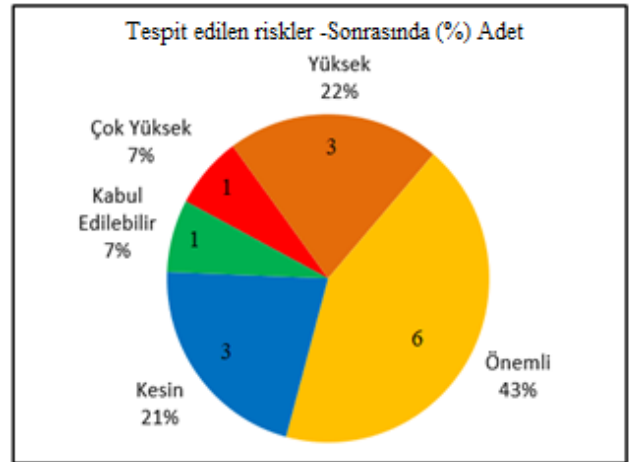
Patlatma faaliyeti sırasında yapılan işlemler ile ilgili 123 adet risk tespit edilmiştir. Bunların dağılımı Şekil 5’de verilmiştir. Bunlar içinde de kabul edilebilir risklerin oranı yalnızca %13 olarak tespit edilmiş, kabul edilebilir seviyeyi aşan risklerin oranı %87 gibi çok yüksek bir oran ile ortaya konulmuştur. Bu sonuçlar da özellikle patlatma sırasında

çok dikkatli davranılması gerektiğini göstermektedir. Bu bölümde yüksek riskler %9, çok yüksek riskler ise %6 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Patlatma Sırasında ile İlgili Risklerin Dağılımı (%)

Patlatma faaliyeti sonrasında yapılan işlemler ile ilgili 14 adet risk tespit edilmiştir. Bunların dağılımı ise Şekil 6’da verilmiştir. Patlatma sonrasında ait faaliyetler içinde kabul edilebilir risklerin oranı çok küçük bir oranda yalnızca %7 olarak tespit edilmiş, kabul edilebilir seviyeyi aşan riskler %93 gibi çok yüksek bir oran ile ortaya çıkmıştır (Şekil 6). Bunlardan yüksek risklerin oranı %22, çok yüksek risklerin oranı ise %7 olarak tespit edilmiştir. Buradan patlatma sonrasında da ciddi riskler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



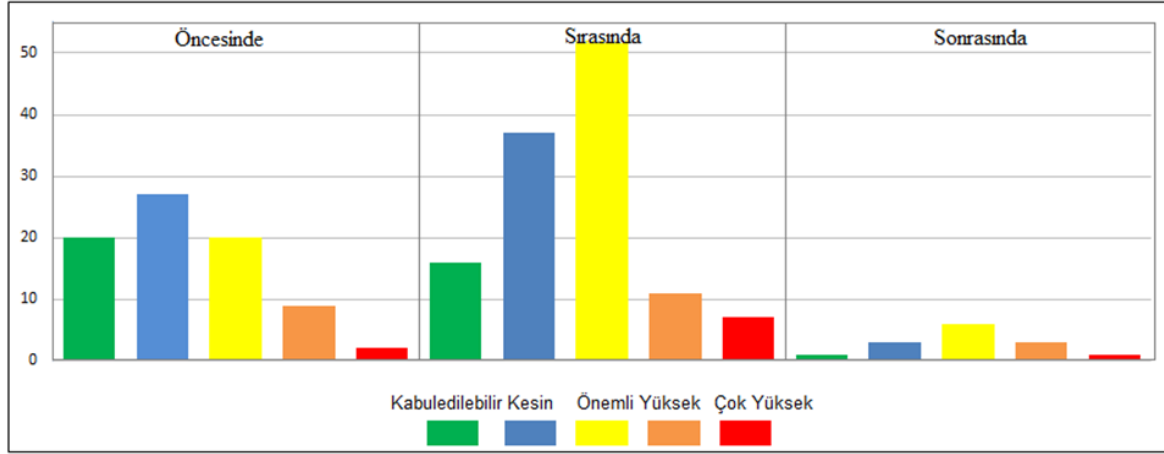
Şekil 6. Patlatma Sonrası ile İlgili Risklerin Dağılımı (%)

Çalışma kapsamında tespit edilen yerüstü delme-patlatma faaliyeti ile ilgili tüm potansiyel tehlikelerin ve bunlardan doğması olası risklerin birlikte gösterildiği grafik Şekil 7’de verilmiştir. Delme-patlatma faaliyeti öncesi, sırası ve sonrası olarak birlikte değerlendirildiğinde adet olarak en fazla riskin patlatma sırasında (123 adet) ortaya çıktığı, en sık görülen risk türünün önemli risk olarak sınıflandırılan riskler olduğu, sadece patlatma sırasında 50’den fazla

önemli riskin ortaya çıkma olasılığının olduğu, yüksek ve çok yüksek risklerin de yine patlatma işlemi sırasında çıkabileceği sonuçları görülmektedir (Şekil 7). Risklerin sayısal büyüklüklerinin yanı sıra hangi davranışların ve durumların ne tür risklere yol açacağına bakıldığında ise en fazla riskin delik şarjı (61 adet) ile ilgili olduğu sonucuna varılmıştır.

Ardından en fazla risk patlayıcı madde deposu ile ilgili

olarak tespit edilmiştir (38 adet). Bu işlemleri sırasıyla patlayıcı nakliyesi ve personeli ile ilgili riskler (36 adet) ve delik delme işlemi ve personeli ile ilgili riskler (30 adet) izlemektedir. Sadece ateşleme işlemi ile ilgili 16 adet ve ateşleme personeli ile ilgili patlatma öncesinde 6, sırasında 5 ve sonrasında 1 olmak üzere toplamda 12 risk tespit edilmiştir (Tablo 13).



Şekil 7. Tespit Edilen Risklerin Dağılımı (adet)

Tablo13. Tespit Edilen Risklerin İş Adımına Göre Dağılımı (adet)

	Riskler	Kabul edilebilir	Kesin	Önemli	Yüksek	Çok Yüksek	Toplam
Öncesinde	Resmi izin ve talimatlar	1	1	2	0	0	4
	Ateşleyici personel	0	1	3	1	1	6
	Patlayıcı deposu	12	16	9	1	0	38
	Patlayıcı nakliyesi ve personeli	7	9	6	7	1	30
	Toplam-Öncesinde	20	27	20	9	2	78
Sırasında	Delik delme işlemi ve personeli	10	11	13	2	0	36
	Delik şarjı	6	21	29	2	3	61
	Ateşleyici personel	0	0	2	2	1	5
	Kişisel koruyucu donanım	0	2	3	0	0	5
	Ateşleme işlemi	0	3	5	5	3	16
Toplam-Sırasında	16	37	52	11	7	123	
Sonrasında	Ateşleyici personel	0	0	1	0	0	1
	Patlatmanın sonuçları	1	3	5	3	1	13
	Toplam-Sonrasında	1	3	6	3	1	14
Genel Toplam		37	67	78	23	10	215

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada yerüstü maden işletme faaliyetlerinin çok önemli bir bileşeni olan delme-patlatma çalışmaları iş güvenliği perspektifi açısından incelenmiş, delme-patlatma faaliyeti bileşenlerine ve iş adımlarına ayrılarak riskler ortaya konulmuş ve Fine-Kinney risk değerlendirme yöntemi uygulanarak riskler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Sadece yer üstü maden işletmeleri delme patlatma çalışması için tespit edilen 215 adet risk faaliyetin ve çalışmanın önemini göstermesi açısından önemlidir. Bu risklerin %36'sı (78 adet) faaliyet öncesine, %57'si (123 adet) faaliyet sırasında ve %7'si de (14 adet) faaliyet sonrasında ait risklerdir (Şekil 2 ve Tablo 13). Bu veriler delme-patlatma faaliyetlerinin tüm aşamalarının ciddi güvenlik riskleri taşıdığını ortaya koymuştur. Dolayısıyla delme-patlatma faaliyetleri öncesi ve sonrası ile birlikte bir bütün olarak değerlendirilmelidir.
- Tespit edilen 215 adet risk Fine-Kinney risk değerlendirme yöntemi ile değerlendirildiğinde, bunların sadece %37'sinin kabul edilebilir risk olduğu kalan %63 oranındaki riskin, bir başka deyişle 178 adet riskin farklı derecelerde ancak müdahale edilmesi gereken riskler olduğu ortaya çıkmıştır. Bu risklerin dağılımı kesin %31, önemli %36, yüksek %11 ve çok yüksek %5 şeklindedir (Şekil 3). Bu verilere göre yer üstü delme-patlatma faaliyetlerinde yapılan her 100 işlemden 11 tanesi yüksek riskli ve 5 tanesi de çok yüksek riskli olarak belirlenmiştir. Bu durumda her 100 işlemden 16 tanesi çok büyük oranda kaza potansiyeli taşıyan işlemler olarak karşımıza çıkmaktadır ki bu da delme-patlatma faaliyetinin ne kadar ciddiyetle yapılması gerektiğini bir kez daha ortaya koymaktadır.
- Delik delme ve patlayıcı şarjı işlemleri ile bu işlemleri yapan personel ile ilgili risklerin 97 adet olduğu (toplamın %45'i), patlayıcı nakliyesi ve depolanması işlemlerinin 68 adet risk barındırdığı (toplamın %27'si) ve ateşleyici personelin davranışları ile ateşleme işleminin de 28 adet risk barındırdığı (toplamın %11'i) görülmüştür (Tablo 13). Buradan ateşleme personelinin, patlayıcı nakliyesi, depolanması, delik şarjı ve ateşleme işlemi konularında iyi eğitilmesi durumunda risklerin

çok büyük oranlarda tespit edilip önlenebilecekleri değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu sonuçlar, genel İSG literatüründe sık tekrarlanan ve kazaların sebepleri çoğunlukla tedbirsiz davranışlardır şeklinde özetlenecek bilgiyi de desteklemektedir.

- Delme-patlatma faaliyetlerinde her aşama, bir can güvenliği meselesi olduğundan, alınacak her önlem, sadece riskleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda hayatları korur ve güvenli bir çalışma ortamı yaratır.
- Son olarak, çalışma sonucunda ülkemizdeki patlatma faaliyetlerimizi düzenleyen mevzuatın sektörün biraz gerisinde kaldığı kanaati oluşmuştur. Özellikle İSG ile ilgili hemen bütün tedbirlerin, elektrikli ateşleme elemanları ve kapsülleri üzerine kurgulandığı mevzuatın artık neredeyse tamamen non-el sistemlerle çalışan hatta yavaş yavaş elektronik sistemlere geçen sektörün gerisinde kaldığı düşünülmektedir. Mevzuatta en kısa sürede teknoloji ve koşullara uygun düzenlemeler yapılmasının, bu yapılırken de sektör temsilcilerinin görüşlerinin ve katkılarının alınmasının yerinde olacağı yazarlar tarafından önerilmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

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

Yazar katkıları

Yazarlar taslağın oluşturulması, verilerin toplanması analizi ve yorumlanması ile makale yazım ve düzeninde görev almıştır.

Kaynaklar

- [1] Anonim, 1984. Maden ve taş ocakları işletmelerinde ve tünel yapımında alınacak işçi sağlığı ve iş güvenliği önlemlerine ilişkin tüzük.
- [2] Anonim, 1987. Tekel dışı bırakılan patlayıcı maddelerle av malzemesi ve benzerlerinin üretimi, ithali, taşınması, saklanması, depolanması, satışı, kullanılması, yok edilmesi, denetlenmesi usul ve esaslarına ilişkin tüzük.
- [3] Anonim, 2013. Maden işyerlerinde iş sağlığı ve güvenliği yönetmeliği.

- [4] Şafak, R. E. (2006). Açık ocak işletmelerinde iş güvenliği uygulaması- örnek ocak çalışması, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 98s. Kütahya.
- [5] Atakol, G. E., Kahriman, A., Bağdatlı, S., FURAT, B.Ö. 2019. Yerüstü Patlatmada İş Güvenliği Risk Değerlendirme Yöntemi: Kirnati - Gürcistan Hidroelektrik Santrali Projesi Mühendislik Uygulamaları, Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, Cilt 3, Sayı 2, 113 – 127.
- [6] Altınok, A. 2016. Agregada üretiminde İş Sağlığı ve güvenliğinin Değerlendirilmesi, T.C. Çalışma ve Sosyal güvenlik bakanlığı İş Sağlığı ve güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, 101s. Ankara
- [7] Reis, C. A. (2019). Agregada üretiminde kullanılan patlayıcı maddelerin uygulamasında iş sağlığı ve güvenliğinin değerlendirilmesi, İstanbul Esenyurt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, İş Güvenliği ve Sağlığı Bilim Dalı, 138s, İstanbul.
- [8] Aykal, U. M. 2018. Kalker ocaklarında ocak sularının ve delme-patlatma işlemlerinin iş sağlığı ve güvenliği üzerine etkilerinin araştırılması, Çankaya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Ankara.
- [9] Dovan, C. (2018). Kontrollü basamak patlatmalarından kaynaklanabilecek iş sağlığı ve güvenliği risklerinin değerlendirilmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, 70s, Adana.
- [10] Kantarcı, O. (2023). Bir Asfaltit Açık Ocağında Patlatma İşlemlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Farklı Risk Değerlendirme Metotlarıyla Değerlendirilmesi. MT Bilimsel (24), 1-11
- [11] Kılıç, B. (2023). Bir Açık Ocak Maden İşletmesindeki Delme Patlatma faaliyetlerinin İki Farklı Risk Değerlendirme Yöntemiyle Analiz Edilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 115s, Ankara.
- [12] Fine, W.T. 1971. Mathematical Evaluations for Controlling Hazards, Journal of Safety Research, 3, 157-166.
- [13] Kinney, G.F., Wiruth, A.D. 1976. Practical Risk Analysis For Safety Management. NWC Technical Publication 5865, Naval Weapons Center, China Lake CA, USA.
- [14] Birgören, B. 2017. Fine-Kinney Risk Analizi Yönteminde Risk Analizi Yönteminde Risk Faktörlerinin Hesaplama Zorlukları ve Çözüm Önerileri, Kırklareli Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 9 (1): 20-25.
- [15] Özkılıç, Ö. 2014. Risk Değerlendirmesi Atex Direktifleri-Patlayıcı Ortam Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması- Kantitatif Risk Değerlendirme-Seveso II direktifleri, TİSK Yayınevi, Yenişehir Kitapevi. 422s, Ankara.
- [16] Dündar, A. C. 2016. Enerji Üretim Tesislerinde Tehlike Ve Risk Analizinde Yeni İnteraktif Bir Yöntem ve Uygulaması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 269.



Volkanik cüruf modifiyeli betonlarda hasarsız deney yöntemleri ile basınç dayanımı tahmini

Prediction of compressive strength in volcanic slag modified concrete using NDT methods

İlker Bekir Topçu¹, İsmail Hocaoğlu^{2*}

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, ilkerbt@ogu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-6361>

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, ihocaoglu@aku.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9294-1120>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 15 Şubat 2024
Revizyon 1 Mart 2025
Kabul 2 Mart 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

*Beton,
Volkanik Cüruf,
SonReb Yöntemi,
Basınç Dayanımı*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 February 2024
Received in revised form 1 March 2025
Accepted 2 March 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

*Concrete,
Volcanic Slag,
SonReb Method,
Compressive Strength*

ÖZ

Volkanik cüruflar, kolay temin edilebilir olması, gözenekli yapısı ve yoğunluğunun düşük olmasından dolayı yarı hafif beton imalatlarında ve yalıtım amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Betonların dayanımının hasarsız olarak belirlenmesinde ultrases geçiş hızı ile Schmidt çekici sonuçlarının birleşik olarak değerlendirildiği SonReb yöntemi yerinde beton dayanımı tahmin edilmesinde kullanılır. SonReb yöntemi, yapıya zarar vermeden hızlı bir şekilde yerinde beton dayanımını tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin önemli bir avantajı, bileşime giren yöntemlerin tek tek kullanılmasından kaynaklanan hata oranlarının en aza indirilmesidir. Bu sayede, beton dayanımı hakkında yaklaşık ve güvenilir tahminler elde etmek mümkün hale gelmektedir. Bu çalışmada farklı oranlarda volkanik cüruf içeren betonlara SonReb yöntemi uygulanarak basınç dayanımının tahmin edilmesi amaçlanmıştır ve sonuçta yöntemin yararlı olduğu görülmüştür. Özellikle depremlerin meydana gelmesinden hemen sonra, hasar alan betonarme yapılarda beton basınç dayanımının erken ve ekonomik olarak tesbit edilmesi açısından bu çalışma büyük önem arz etmektedir.

ABSTRACT

Volcanic slags are frequently preferred in the production of lightweight concrete and for insulation purposes due to their easy availability, porous structure, and low density. The SonReb method, which combines the evaluation of ultrasonic transmission velocity and Schmidt hammer results, is used to predict the strength of concrete in situ without causing damage, thus determining the strength of concrete without damage. The SonReb method enables a rapid estimation of concrete strength in situ with reasonable accuracy, minimizing error rates associated with individual methods used in combination. This study aimed to predict the compressive strength of concrete containing various proportions of volcanic ashes using the SonReb method, and the results demonstrated the usefulness of the method. This study is critical for especially in the aftermath of earthquakes, determining the early and cost-effective assessment of concrete compressive strength in earthquake-damaged reinforced concrete structures is of significant importance.

Doi: 10.24012/dumf.1437934

* Sorumlu Yazar

Giriş

Dünya genelinde en çok tercih edilen yapı malzemesi olan çimento, hidrolik bağlayıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Dünya genelinde sınırlı enerji kaynaklarının azalması ve çimento üretimi sırasında çevreye salınan CO₂ bilim insanlarını beton üretiminde alternatif malzemelere yönlendirmektedir [2-3]. Volkanik cüruf, volkanik olaylarda oluşan bazaltik-andezitik ve camı yapıya sahip bir kayaç türüdür [4,5,6]. Kolay temin edilebilir olması, gözenekli yapısı ve yoğunluğunun düşük olması sayesinde yarı hafif beton imalatlarında ve yalıtım amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir [7-10]. Ayrıca bazı durumlarda volkanik patlama sırasında gaz kabarcıkları tarafından oyulmuş, boşluklu kayalardan da oluşabilmektedir [11,12].

Deprem gibi sismik olaylarda yapılarda meydana gelen hasarlar, can ve mal kayıplarının meydana gelmesinde etkili olmaktadır. Bunun yanında ülkelerin ekonomilerinin de olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Örnek olarak 6 Şubat 2023'de Türkiye'de 7.8 büyüklüğünde meydana gelen depremde beş yüz doksan bin yapı az hasarlı, kırk beş bin beş yüz yapı ise orta hasarlı olduğu tespit edilmiştir [13,14]. Depremde hasar gören, hafif ve orta hasarlı yapılarda beton basınç dayanımlarının belirlenmesi ve önlemler alınması ile bir sonraki depremde daha az can kaybının yaşanması sağlanabilir. Günümüzde hasarlı (karot) yöntemlerle beton basınç dayanımları belirlenebilmektedir. Ancak hasarlı yöntemler ekonomik olmamakla birlikte zaman kaybına da neden olmaktadır. Bu doğrultuda hasarlı yöntemler ile çimento esaslı malzemelerin boşluk oranları belirlenerek, basınç dayanımlarını tahmin etme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Uyanık ve diğ. [15] beton basınç dayanımının tahmininde jeofizik yöntemler kullanmışlar ve beton basınç dayanımı ile basınç dalga hızı arasında anlamlı bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Schmidt ölçümleri basınç dayanımı ile ilgili net bilgiler vermese de betonun yüzey sertliği hakkında bilgi verebilmektedir [16]. Bir diğer deney yöntemi ise ultrasonik ses geçiş cihazı ile çimentolu malzemelerde boşluk miktarı ile basınç dayanımının ilişkilendirilmesidir [17].

SonReb yöntemi, betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesine uygun, en yaygın hasarsız yöntemdir. Tek tek ele alındığında, hem Schmidt geri tepme çekici hem de ultrasonik geçiş hızı yöntemlerindeki belirsizlik için belli sınırlarda hesaplama yapılmasını sağlamaktadır. SonReb'le, betonarme bir binanın yerinde beton dayanımı tahmin edilerek ve hasarlı deney sonuçları karşılaştırılır. Bu yöntem, Schmidt çekici okumaları ve ultrases geçiş hızı sonuçlarını bir araya getirilerek değerlendirir. SonReb, yerinde beton dayanımını hızlı bir şekilde ve yapıya zarar vermeden yaklaşık olarak tahmin etmekte olup, bu yöntemin bir diğer avantajı, bileşime giren yöntemlerin tek tek kullanılmasından kaynaklanan hataları en düşük seviyelere indirmesidir [18].

Literatürde SonReb yöntemiyle çok sayıda çalışma yapıldığı görülmektedir. Akman ve Güner [19] yaptıkları çalışmada, ultrasonik darbe hızı ve Schmidt indeksi ölçümünün bir kombinasyonu olan Sonreb yönteminin, yüksek sıcaklıkların ve amonyum nitrat ve amonyum sülfatın kimyasal saldırısının neden olduğu hasarın belirlenmesinde

uygulanabilirliğinin sınırlarını belirlemektedir. Yangından zarar gören betonların hasar derecesi, süresi gibi sınıflandırmalar yapıldıktan sonra SonReb yönteminin yangından zarar gören betonların değerlendirilmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [19]. Cianfrone ve Facaoaru [20] çalışmalarında, bazı doğu Avrupa ülkelerinde, betonun dayanımının yerinde hasarsız incelenmesi için ultrasonik hız - geri tepme endeksi birleşik yönteminin yaygın olarak kullanıldığını ve resmi olarak standartlaştırıldığını belirtmişler, yazdıkları makalede bu yöntemin İtalya'da çeşitli bileşimlerdeki belirli sayıda örnek beton küp üzerinde uygulanmasının sonuçlarını sunmaktadırlar [20]. Mevcut Romanya uygulamalarına özellikle atıfta bulunularak, İtalya'da uygulanmak üzere bu yöntemde bazı değişiklikler ve genişletmeler yapılmasını önerilmektedirler [20]. Ancak betonarmeye yapılan hatalar, yapının yaşı, donatıların olup olmadığı, karbonatlaşma, gözeneklilik, çatlaklar, agregaların özellikleri gibi faktörlerin yanı sıra sıcaklık ve nem gibi çevresel parametreler sonuçların doğruluğu ve hassasiyetini etkileyebilmektedir [21,22]. Bu nedenle, bu yöntem hasarsız bir teknik olması nedeniyle, hasarlı deneylerin güvenilirliğini ve doğruluğunu destekleyebilmektedir [21,22]. Literatürde SonReb yöntemi kullanılarak güvenilirliğini araştıran (katsayı çeşitliliği) bazı çalışmaların yapıldığı da görülmüştür [23]. SonReb yönteminin güvenilirliğini inceleyen bazı araştırma sonuçları Tablo 1' de gösterilmiştir [23].

Tablo 1. SonReb yönteminin katsayı çeşitliliğini araştıran bazı çalışmalar [23]

Yazar	f _{ck} , MPa	Standart sapma	Katsayı çeşitliliği, %
RILEM [24]	26.29	3.12	11.88
Bellander [25]	53.30	9.12	17.11
Meynink ve diğ. [26]	41.00	3.82	9.33
Tanigava ve diğ. [27]	26.07	3.50	13.60
Arioğlu ve Köylüoğlu [28]	36.40	4.89	13.45
Chandak ve Kumavat [29]	23.67	1.40	5.91
Kheder [30]	17.99	1.29	7.18

Depremlerin yapılarda meydana getirdiği hasarlar bilim insanlarını alternatif hafif malzemelere yönlendirmektedir. Ayrıca depremden hemen sonra yapılarda hasar tespit çalışmalarının olabildiğince erken tamamlanması, olası can kaybının en düşük seviyelerde kalmasını sağlanabilir. Bu çalışmada volkanik cüruf katkılı betonlarda Schmidt çekici deneyleri ve ultrases geçiş hızı ölçümlerinin yapılması ile basınç dayanımının tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Çimento

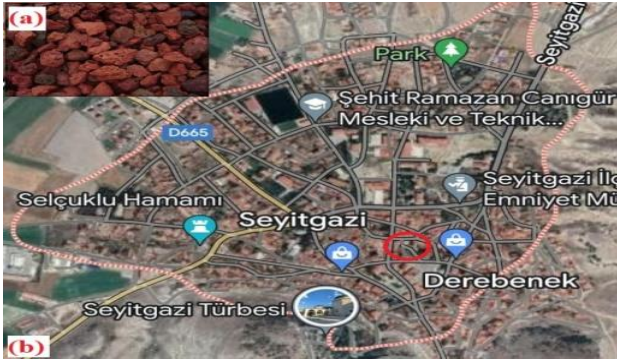
Deneylerde Eskişehir Çimento fabrikasının ürettiği olduğu CEM I 32.5 R çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun 28 günlük basınç dayanımının 36.5 MPa olduğu gözlenmiştir. Beton üretiminde kullanılan çimentonun bazı özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	CEM I 32.5 R
90µ'luk elekte kalan miktar (g)	1080
90µ'luk elekte kalan miktar (g)	1080
Özgül ağırlık (gr/cm ²)	2.97
Toplam şişme (Le Chatelier) mm	4
Priz başlangıç (dak.)	200
Priz bitiş (dak.)	300

Volkanik Cüruf

Beton üretimindeki volkanik cüruf, Eskişehir-Seyitgazi yolu üzerindeki Şükranlı köyü civarından (Şekil 1) temin edilmiştir. Volkanik cürufların mikroskobik incelemesinde camsı matris içerisinde sanidin, andezin ve kuvars fenokristalleri ile %1 oranında piroksen kristallerinden oluştuğu, cürufta oluşan boşlukların soğuma sırasında matriste meydana geldiği ve adının içi boş riyodasit olabileceği öngörülmüştür. Bir kenarı 7 cm olan küp şeklinde olduğunda birim ağırlığının 1390 kg/m³ olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı 17 MPa olup, Böhme aşındırma cihazı ile aşınması %9 olarak bulunmuş olup, agrega haline getirildiğinde cürufun özgül ağırlığı 1730, birim ağırlığı 1330 kg/m³, su emmesi %14, gözenekliliği 0.22 olarak bulunmuştur [5,12].



Şekil 1. Beton üretiminde kullanılan volkanik cürufun bir görünümü (a) ve temin edildiği yer (b)

Deneylerde kullanılan volkanik cüruf konkasörden geçirilerek 0/31.5 mm boyutuna indirilmiştir. Sonrasında volkanik cüruf 0/16 ve 0/8 mm'lik dane boyutuna indirilmiştir. Volkanik cürufa ait elek analizi sonuçları ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Volkanik cürufun elek analizi ve bazı fiziksel özellikleri.

Elek açıklıkları (mm)	Geçen %	
	0/8	0/16
31.5	100	100
16	100	100
8	100	91
4	82.0	79
2	54.5	57.5
1	35.2	39
0.50	26.5	28
0.25	12.5	12
İncelik modülü	2.89	2.94
Özgül ağırlık (kg/m ³)	1983	1945
Gevşek birim ağırlık (g/dm ³)	1070	1080

Kum

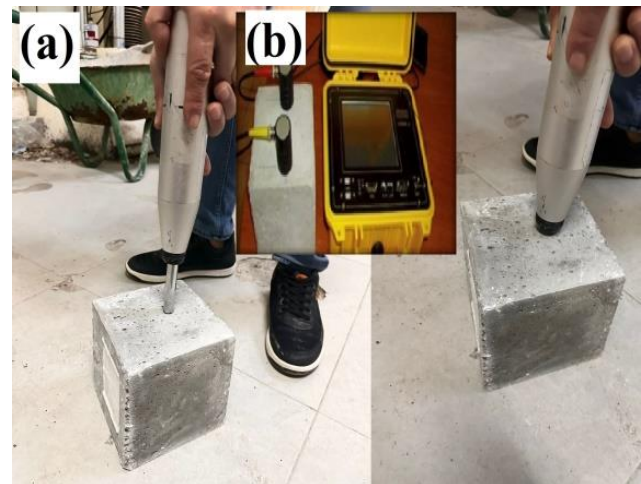
Deneylerde kırma kum kullanılmıştır. Beton üretimi için kullanılan kumun elek analizi sonuçları ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Kullanılan kumun elek analizi deney sonuçları

Elek açıklıkları (mm)	Geçen %
8	100
4	98
2	94
1	90
0.50	77
0.25	9
İncelik modülü	1.36
Özgül ağırlık (kg/m ³)	550
Gevşek birim ağırlık (g/dm ³)	1449
Su emme (30 dak.) %	1

Beton Üretimi ve Yapılan Deneyler

Beton üretiminde su/çimento oranı sabit (0.40) tutulmuştur. Beton üretiminde ince agrega olarak %50 oranında kırma kum kullanılmıştır. Daha sonra bu harç fazı içerisinde farklı dane boyutlarındaki (0/8 ve 0/16 mm) ve farklı oranlarda (%15, %30, %45 ve %60) volkanik cüruf katılan betonlar üretilmiştir. Karışım işlemleri olarak öncelikle kuru karışım gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bir karıştırıcı yardımıyla beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen betonlar 15 cm'lik polyster küp kalıplara yerleştirilmiştir. Oda koşullarında üretilen betonlar 1 gün sonra kalıplardan çıkartılarak 7 ve 28 gün süreyle kürlenmiştir. Sonrasında SonReb (ultraSon + Rebound hammer) analizi yapabilmek amacıyla Schmidt çekici (ASTM C805, 2013) [31] ve ultrases geçiş süresi ölçümleri (TS EN 12504-4, 2021) [32] gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Hasarsız ölçümlerin hemen ardından volkanik cüruf katkılı ve katkısız betonlarda TS EN 12390-3, 2019'e [33] göre basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

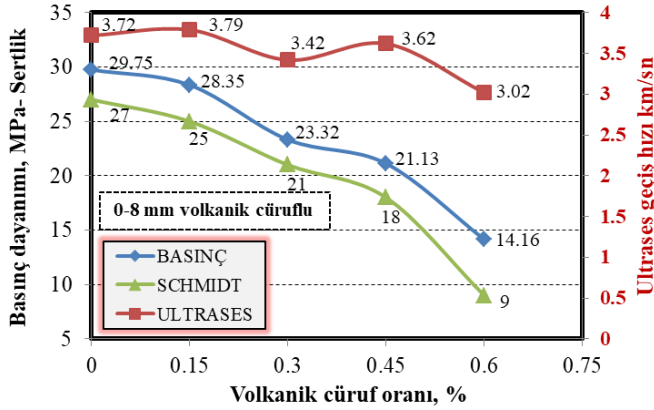


Şekil 2. Hasarsız deneylerin yapılması (a-Schmidt çekici, b-ultrases geçişi)

Sonuçlar ve Tartışma

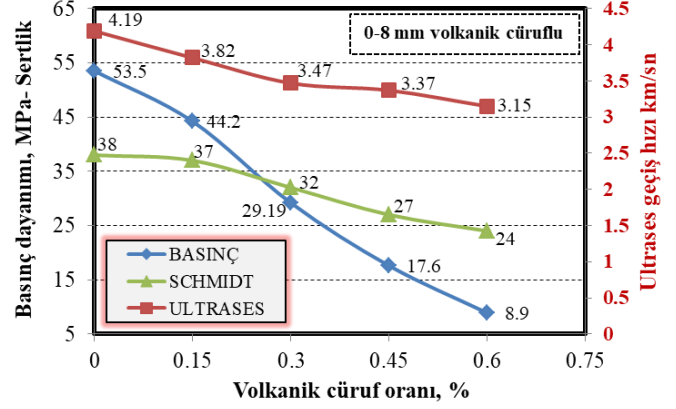
Dane Boyutları 0/8 mm olan Volkanik Cüruf Katkılı Betonların İncelemesi

Şekil 3, 7 gün kür edilen farklı oranlarda volkanik cüruf (0/8 mm dane çapındaki) içeren betonların basınç dayanımları, Schmidt sertlik değerlerini, ultrases değerlerini karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Beton içindeki volkanik cüruf miktarının artmasıyla basınç dayanımında azalma gözlenmiştir. Sırasıyla %0.15, %0.30, %0.45 ve %0.60 oranlarında volkanik cüruf katkılı betonların basınç dayanımları kontrol numunesine göre yaklaşık olarak sırasıyla %4.57, %21.61, %28.97 ve %52.40 oranlarında azalmıştır. Betonların basınç dayanımlarındaki bu azalma porozitenin artması ile açıklanabilir. Numunelerin ultrases ve Schmidt çekici değerleri incelendiğinde tüm serilerde paralel bir azalma gözlenmiştir. Bu sonuç, ultrases deneylerinde elde edilen sonuçların Schmidt çekici deneylerinde elde edilen sonuçları doğrulamaktadır. Bu durum deneylerin güvenilir olduğunu göstermektedir. Yine 7 gün kür edilen betonlarda yüksek oranda volkanik cüruf (%0.45 ve %0.60) kullanılmasının mekanik dayanımı, ultrases geçişini ve numunenin sertliğini yüksek oranda azalttığı gözlenmiştir. Çimentolu malzemelerde volkanik cürufun kullanılması gereken optimum miktarın %0.15 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. 7 gün kür edilmiş betonlarda basınç dayanımı ile hasarsız yöntemlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4, 28 gün kür edilen farklı oranlarda volkanik cüruf (0/8 mm dane çapındaki) içeren betonların basınç dayanımları, Schmidt sertlik değerlerini ve ultrases geçiş hızlarını karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Beton içindeki volkanik cüruf miktarının artması basınç dayanımında azalmaya neden olmuştur. Sırasıyla %0.15, %0.30, %0.45 ve %0.60 oranlarında volkanik cüruf katkılı betonların basınç dayanımlarının kontrol numunesine göre yaklaşık olarak sırasıyla %17.38, %45.43, %67.10 ve %83.36 oranlarında azalmıştır. Tüm serilerde volkanik cüruf oranının artması ile basınç dayanımı, Schmidt sertliği ve ultrases değerlerinde azalmalar gözlenmiştir.

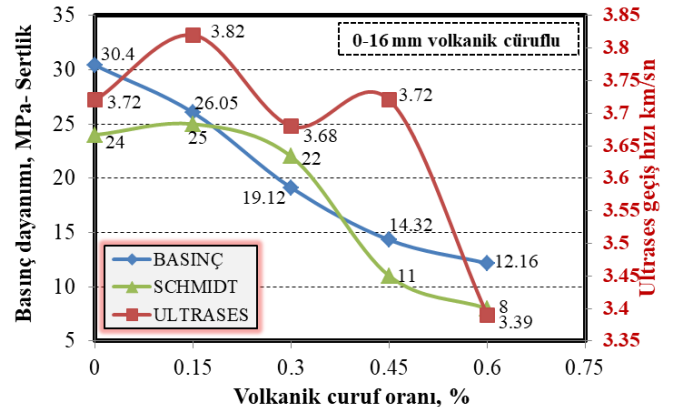


Şekil 4. 28 gün kür edilmiş betonlarda basınç dayanımı ile hasarsız yöntemlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Ancak volkanik cüruf oranının artması ile Schmidt sertliği değerlerinde daha fazla miktarda azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. Bu durum Schmidt çekici deneyinin beton yüzeylerinden yapılması nedeniyle, özellikle %0.45 ve %0.60 volkanik cüruf içeren beton yüzeylerinin boşluklu yapıya sahip olması ile açıklanabilir. Şekil 4, Schmidt çekici deneylerinde elde edilen sonuçların ultrases deneyinde elde edilen sonuçları genel olarak doğruladığını göstermiştir.

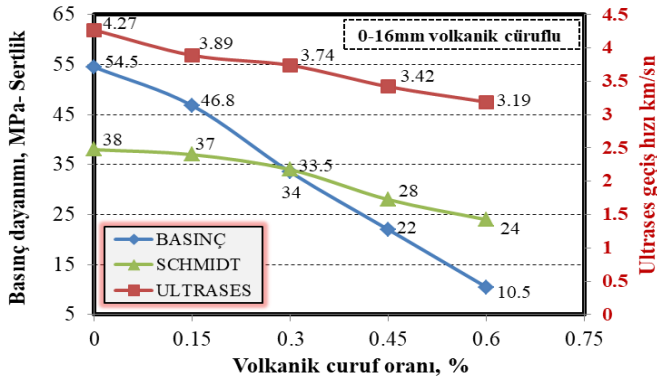
Dane Boyutları 0/16 mm olan Volkanik Cüruf Katkılı Betonların İncelemesi

Şekil 5, 7 gün kür edilen farklı oranlarda volkanik cüruf (0/16 mm dane çapındaki) içeren betonların basınç dayanımları, Schmidt sertlik değerlerini, ultrases değerlerini karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Basınç dayanımı açısından konulması gereken optimum volkanik cüruf oranının %0.15 olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek volkanik cüruf oranlarında basınç dayanımında yüksek miktarda azalmalara neden olmuştur. Bu nedenle taşıyıcı elemanlarda %0.15 üzerinde volkanik cüruf kullanılmasının uygun olmadığı yorumu yapılmıştır. Şekil 5 incelendiğinde volkanik cüruf oranının %0.30'dan %0.45'e çıkarılması ile ultrasonik ölçümde artış gözlenmiştir. Bu durum %0.30 volkanik cüruf içeren beton numunelerinde, ölçümlerin yüksek ihtimalle numunelerin kompozitenin yüksek olduğu bölgelerden deney yapılmasından kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. 7 gün kür edilen 0/8 mm ve 0/16 mm ile üretilen betonların ultrases değerlerinde anlamlı bir ilişki kurulamamıştır.



Şekil 5. 7 gün kür edilmiş betonlarda basınç dayanımı ile hasarsız yöntemlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Şekil 6, 28 gün kür edilen farklı oranlarda volkanik cüruf (0/16 mm dane çapındaki) içeren betonların basınç dayanımları, Schmidt sertlik değerlerini, ultrases değerlerini karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Genel olarak 0/8 mm dane çapında volkanik cüruf katkılı betonların basınç dayanımlarının 0/16 mm dane çaplı volkanik cüruf modifiyeli betonların basınç dayanımlarından daha yüksek değerler aldığı gözlenmiştir. Bu durum daha düşük dane çaplı volkanik cürufun beton içerisindeki boşlukları daha iyi doldurması ile açıklanabilir. Beton içerisinde %0.15'den daha fazla volkanik cüruf katıldığında basınç dayanımının yüksek oranda azaldığı gözlenmiştir (Şekil 6). Bu çalışmanın diğer sonuçları destekleyecek biçimde, Schmidt ve ultrases deneylerinin yapılması ile beton basınç dayanımının karşılaştırılmasının yapılabileceği yorumu yapılmıştır.



Şekil 6. 28 gün kür edilmiş betonlarda basınç dayanımı ile hasarsız yöntemlerde elde edilen sonuçların karşılaştırılması

SonReb Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımı Tahmini

Beton matrisi çok karmaşık olması nedeniyle beton üretim aşamalarında meydana gelecek küçük bir değişim basınç dayanımını etkileyebilmektedir. Bu etkenlerden bazıları agreganın türü, boyutu, çimentonun tipi, çimentonun inceliği, çimento içerleği, kür koşulları, ortam koşulları vb.'dir. Sertleşmiş betondan numune alınması (karot) ile daha kesin sonuçlar elde edilse de hem zaman kaybına hem de maliyet açısından olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu nedenle bilim insanları, hasarsız yöntemlerle basınç dayanımı tahminine yönelmişlerdir. Betonlarda ultrasonik geçiş hızı (UPV) ve beton Schmidt çekici ölçümleri ile basınç dayanımı tahmin edilebilmektedir [34]. Ancak beton basınç dayanımını tahmin edebilmek için hem Schmidt çekici hem de ultrasonik cihazı ile ölçüm yapılması gerekmektedir. SonReb denilen bu yöntemde betonun basınç dayanımı $f_{ck}=a.V^b.S^c$ formülü yardımıyla hesaplanabilmektedir [35]. Formülde f_{ck} betonun tahmini basınç dayanımını, V ultrasonik ses geçiş hızını, S: Schmidt çekiciden elde edilen değeri, a, b, c: veri katsayılarını ifade etmektedir. SonReb yöntemi için EXCEL'in LINEST işlevi kullanılabilir. "LINEST", bir çizginin istatistiklerini hesaplamak için "en küçük kareler" yöntemini kullanarak hesaplama yapmaktadır. Verilere en iyi uyan doğrusal denklemi bulmaya yardımcı olur. Ayrıca diğer model türlerinin istatistiklerini hesaplamak için LINEST'i diğer işlevlerle birleştirip polinom, logaritmik, üstel ve kuvvet serileri de hesaplanabilir. SonReb yöntemi için LINEST'i kullanabilmek için verilerin doğal logaritmaları ile çalışmak gerekir. Bunu yapmak için öncelikle "LN" fonksiyonu

kullanılır. Bunu yapmak için öncelikle "LN" fonksiyonunda ilgili formül $y=m_1x_1+m_2x_2+b$ şeklinde olur. Bu denklemde SonReb katsayıları a, b, c = EXP(b), m2, m1 olur. Buna göre gerekli düzenlemeler yapılırsa hesaplamalar sonucunda aşağıdaki Tablo 5'deki sonuçlar elde edilir.

Bu çalışma için üretilen 2 seri için yukarıdaki denklem yardımıyla betonların basınç dayanım değerleri elde edilmiştir (Tablo 5). Tablo 5 incelendiğinde tahmin edilen basınç dayanımlarının genel olarak gerçek dayanımdan daha düşük olduğu görülmüştür.

Bazı serilerde gerçek dayanımla benzer olacak şekilde basınç dayanımı tahmin edilebilmiştir. Örnek olarak M2 serisinde yalnızca %1.20'lik fark çıktığı gözlenmiştir. Bazı serilerde ise büyük oranda sapmalar gözlenmiştir. Bunun nedeninin hasarsız yöntemlerden %100 doğru sonuç elde edilememesi ile açıklanabilir. Örnek olarak M5 serisi incelendiğinde gerçek dayanım 12.16 MPa iken tahmin edilen dayanım 19.42 MPa olmuştur. Denklemde parametrelerin oldukça fazla olması nedeniyle herhangi bir numunede bir parametrenin yanlış belirlenmesi veya ölçüm yapılan numunenin porozitesinin yüksek olması deney sonuçlarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle SonReb yöntemi ile basınç dayanımının olabildiğince çok numune üzerinde gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

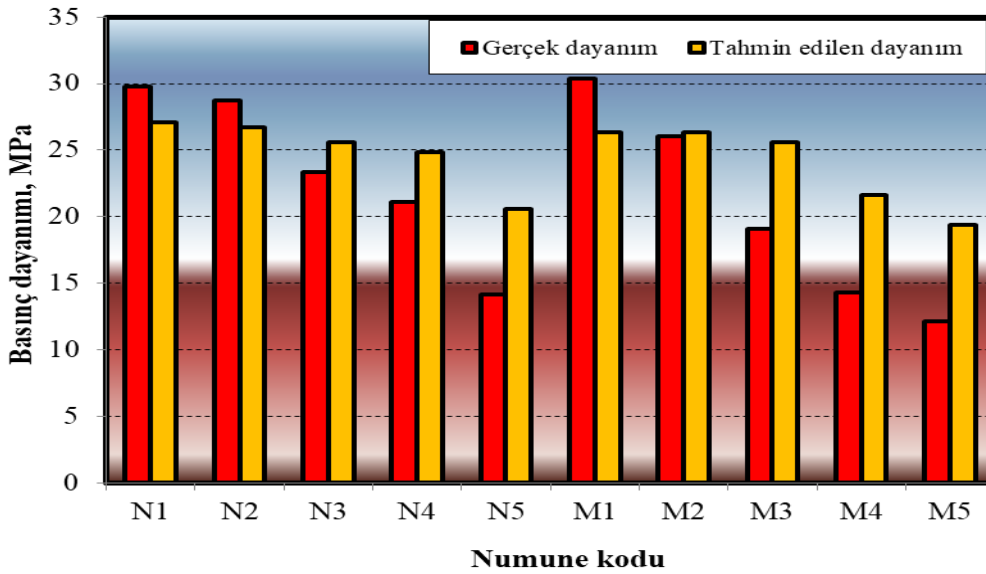
Sonuç ve öneriler

Temele gelen yüklerin azaltılması ile zemin taşıma kapasitesi artırılabilir, bu sayede deprem güvenliği sağlanabilmektedir. Bu çalışmada farklı dane çapındaki ve farklı oranlarda volkanik cüruf katılan betonların basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bir diğer kısmında SonReb yöntemi kullanılarak betonların basınç dayanımları tahmin edilmiştir. Özellikle depremlerin ardından yapıların hasar tespitinin ekonomik olması ve güvenilirlik açısından bu çalışmanın büyük öneme sahip olduğu değerlendirilmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Optimum volkanik cüruf miktarın %0.15 olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle taşıyıcı elemanlarda %0.15 üzerinde volkanik cüruf kullanılmasının uygun olmadığı yorumu yapılmıştır. Betonlarda volkanik cürufun artması ile porozitenin arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle çimento esaslı malzemelerde volkanik cürufun yalıtım amaçlı kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.
- Genel olarak 0-8 mm dane çapında volkanik cüruf katkılı betonların basınç dayanımlarının 0-16 mm dane çaplı volkanik cüruf modifiyeli betonların basınç dayanımlarından daha yüksek değerler aldığı gözlenmiştir.
- 7 ve 28 gün kür edilen betonlarda yüksek oranda volkanik cüruf (%0.45 ve %0.60) kullanılmasının mekanik dayanımı ve ultrases geçişini ve sertliğini yüksek oranda azalttığı gözlenmiştir.
- Bazı serilerde gerçek dayanımla benzer olacak şekilde basınç dayanımı tahmin edilebilmiştir. Örnek olarak M2 serisinde yalnızca %1.20'lik fark çıktığı gözlenmiştir (Şekil 7). Bazı serilerde ise basınç dayanımı tahminlerinde büyük oranda sapmalar gözlenmiştir. Bunun nedeninin hasarsız yöntemlerde (beton numunelerinin homojen özellik göstermemesinden dolayı) %100 doğru sonuç elde edilemeyeceği yorumu da yapılmıştır.

Tablo 5. 28 gün kür edilen betonlarda basınç dayanımı tahmini

Numune kodu	V (m/s)	S	LN(f_{ck})	LN(V)	LN(S)	f_{ck} (MPa)	Tahmini f_{ck} (MPa)	Fark	% Fark
N1	3720	27	3.39	8.22	3.29	29.75	27.06	2,69	0,09
N2	3790	25	3.34	8.24	3.21	28.35	26.69	1,66	0,06
N3	3420	21	3.14	8.13	3.04	23.32	25.56	-2,24	-0,10
N4	3620	18	3.05	8.19	2.89	21.13	24.83	-3,70	-0,18
N5	3020	9	2.65	8.01	2.19	14.16	20.55	-6,39	-0,45
M1	3720	24	3.41	8.22	3.17	30.40	26.36	4,04	0,13
M2	3820	25	3.26	8.24	3.21	26.05	26.36	-0,35	-0,01
M3	3680	22	2.95	8.21	3.09	19.12	25.63	-6,62	-0,35
M4	3720	11	2.66	8.22	2.39	14.32	21.63	-7,31	-0,51
M5	3390	8	2.49	8.12	2.07	12.16	19.42	-7,26	-0,60



Şekil 7. Betonların gerçek basınç dayanımları ile tahmin edilen basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Kaynaklar

- [1] M.Y. Vahabi, B. Tahmouresi, H. Mosavi, S.F. Aval, "Effect of pre-coating lightweight aggregates on the self-compacting concrete," *Structure Concrete*, vol. 23, pp. 2120-2131, 2022. <https://doi.org/10.1002/suco.202000744>.
- [2] M.C. Acar, "Usability of Kayseri volcanic slags as filling material on flexible paved roads," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 37(1), pp. 47-56, 2022.
- [3] İ.B. Topçu, "Volkanik cürüflarla üretilen yarı hafif betonların özellikleri," IX. Müh. Semp., *Süleyman Demirel Üniv., Müh.-Mim. Fak.*, pp. 95-97, 1996.
- [4] S. Demirdağ, L. Gündüz, L. "Volkanik cürüfların inşaat endüstrisinde hafif beton agregası olarak değerlendirilme kriterleri," *3. Kırmataş Sempozyumu*, pp. 51-58, 2003.
- [5] İ.B. Topçu, "Volkanik cürüfların hafif beton agregası olarak kullanılma olanaklarının incelenmesi", *İMO X. Teknik Kongresi*, vol. 1, pp. 437-451, 1989.
- [6] İ.B. Topçu, "Eskişehir volkanik cüruf agregası kullanılarak üretilen yarı hafif betonların özellikleri", *Anadolu Üniv. Müh.-Mim. Fak. Der.*, vol.8(2), pp. 55-73, 1994.
- [7] A. A. Balog, N. Cobirzan, C. Aciu, D.A. Ilutiu-Varvara, "Valorification of volcanic tuff in constructions and materials manufacturing industry (pp: 323328)," *The 7th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2013)*, Petru Maior University of Tirgu Mures, October, pp. 10-11, Romania, 2014.
- [8] T. Ercan, A. Dinçel, S. Metin, A. Türkecan, E. Günay, "Uşak yöresinin neojen havzaları jeolojisi," *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, vol. 21(2), pp. 104, 1978.
- [9] İ.B. Topçu, "Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi," *Doktora Tezi, İTÜ Fen Bil. Ens.*, Mart 1988, İstanbul.
- [10] İ.B. Topçu, "Properties of concretes produced by volcanic slags," *Concrete Technology for Developing Countries, 4th Int. Conf., EMU*, pp. 59-66, 1996.
- [11] T. Ercan, A. Türkecan, A. Dinçel, E. Günay, "Kula-Selendi (Manisa) dolaylarının jeolojisi", *Jeoloji Müh. TMMOB Odası Yayın Organı*, vol.17, pp. 17-19, 1983.

- [12] İ.B. Topçu, "Semi lightweight concretes produced by volcanic slags", *Cement and Concrete Research*, vol. 27(1), pp. 15-21, 1997.
- [13] Preliminary assessment report of AFAD, 06 February 2023, Pazarcık (Kahramanmaraş) mw 7.7, Elbistan (Kahramanmaraş) mw 7.6 earthquakes, 2023.
- [14] Environment, Urbanization, and Climate Change (MEUCC), General Directorate of Construction Affairs, 2023, Ankara.
- [15] O. Uyanık, G. Şenli, B. Çatlıoğlu, "Binaların beton kalitesinin tahribatsız jeofizik yöntemlerle belirlenmesi", *SDU International Technologic Science*, vol. 5(2), pp. 156-165, 2013.
- [16] TS 3260, "Beton yüzey sertliği yolu ile yaklaşık beton dayanımının tayini," *Türk Standartlar Enstitüsü*, Ankara, 1978.
- [17] R.N. Swamy, A.H.M.S. Al-Hamed, "Evaluation of the windsor probe test to assess in-situ concrete strength," *Proc. Inst. Civil Engineering*, Part 2, England, 1989.
- [18] İ. Yüksel, "Bileşik yıkıntısız yöntemle yerinde beton dayanımının tahmini," *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9(2), pp. 231-235, 2003.
- [19] M.S. Akman, A. Güner, A. "The applicability of sonreb method on damaged concrete," *Materials and Construction*, vol. 17, pp. 195-200, 1984.
- [20] F. Cianfrone, I. Facaoaru, Study on the introduction into Italy, of the combined non-destructive method, for the determination of in situ concrete strength, *Materials and Structures*, vol. 12 (71), pp. 413-429, 1979.
- [21] M. Cristofaro, S. Viti, M. Tanganelli, "New predictive models to evaluate concrete compressive strength using the SonReb method," *Journal of Building Engineering*, vol. 27, pp. 1-21, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100962>.
- [22] A. Hussain, S. Akhtar, "Visual analysis and Schmidt rebound hammer test of Taj-ulMasajid," *Informes de la Construcción*, vol. 69(547), pp. 1-8, 2017. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.097>
- [23] A. Hernández Oroza, J.R. Cuetara Ricardo, "Evaluation of SonReb models for estimating compressive strength in Cuban cement and aggregate concrete," *Revista ALCONPAT*, vol. 13(1), pp. 97-111, 2023. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.602>
- [24] RILEM NDT 4., "Recommendation for in Situ Concrete Strength Determination by Combined Non-destructive Methods," *Compendium of RILEM Technical Recommendations*. U.K., London, 1993.
- [25] U. Bellander, "NDT testing methods for estimating compressive strength in finished structures—evaluation of accuracy and testing system" in: RILEM Symp. Proc. on Quality Control of Concrete Structures, *Session*, pp. 37-45, 1979.
- [26] P. Meynink, A. Samarin, "Assessment of compressive strength of concrete by cylinders, cores, and non-destructive tests, in: RILEM Symp. Proc. On Quality Control of Concrete Structures, Session 2.1", *Swedish Concrete Research Institute Stockholm*, Sweden, pp. 127-134, 1979.
- [27] Y. Tanigava, K. Baba, H. Mori, "Estimation of concrete strength by combined non destructive testing methods," *ACI SP-82*, pp. 57-76, 1984.
- [28] E. Arioglu, O. Köylüoğlu, "Discussion of prediction of concrete strength by destructive and nondestructive methods by Ramyar and Kol.," *Cement Concrete World*, vol. 3, pp. 33-34, 1996.
- [29] N.R. Chandak, H.R. Kumavat, "SonReb Method for Evaluation of Compressive Strength of Concrete," *Materials Science and Engineering*, pp. 810, 2020. <http://dx.doi.org/10.1088/1757899X/810/1/012071>
- [30] G.F. Kheder, "A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing," *Mat. Struct.* vol. 32, pp. 410-417, 1999. <https://doi.org/10.1007/BF02482712>
- [31] ASTM C805, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM, 2013.
- [32] TS EN 12504-4, "Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini", *Türk Standartlar Enstitüsü*, Ankara, 2021.
- [33] TS EN 12390-3, "Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin", *TSE*, 2019.
- [34] R.C. Narayan, R.K. Hemraj, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 810 012071, 2020.
- [35] İ.B. Topçu, "Volkanik cürüflü betonlarda SonReb yöntemi uygulaması, 5. Malzeme Sempozyumu," *Pamukkale Üniv., Müh. Fak.*, vol. 2, pp. 770-779, 1993.



Rainwater Harvesting for Lawn Irrigation: A Case Study in Diyarbakır Province

Muhammed Nimet HAMİDİ^{1*}

¹ Istanbul Technical University, Environmental Engineering Department, hamidim@itu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6609-9977

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 October 2024
Received in revised form 26 November 2024
Accepted 31 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

rainwater harvesting, irrigation,
cost, water saving

Doi: 10.24012/dumf.1575255

* Corresponding author

ABSTRACT

The prevalence of water stress is on the rise due to the confluence of population growth and industrialization. The utilization of potable water for non-potable applications such as irrigation and cleaning places considerable strain on freshwater resources, underscoring the growing importance of alternative water management strategies such as rainwater harvesting (RWH). This study investigates the potential of rooftop RWH to mitigate water stress in Diyarbakır, Türkiye, by supplying irrigation water for lawns area. The research calculates the volume of rainwater that can be collected, filtered, and stored for irrigation, comparing it with the water needed to irrigate the lawn. This study evaluates the feasibility of RWH systems for irrigation, focusing on water savings, economic performance, and payback periods. The findings indicate that irrigating a 100 m² lawn area with rainwater harvested from 350, 400, 450, and 500 m² roof areas can provide 56%, 64%, 71%, and 78% of annual water saving, respectively, with larger roof areas providing greater savings. Subsidy mechanisms significantly reduce the payback period while a 400 m² roof area emerges as an optimal size balancing cost and benefit. In the case that the storage tank and pump, which constitute the initial capital costs, are provided free of charge with the subsidy, net present value (NPV) is positive from the first year onwards. The study demonstrates that interest rates, inflation, water prices, initial investments and operating costs are significant factors influencing the economic viability of the RWH system. In countries where the price of water is low, the economic feasibility of RWH systems may be compromised. Nevertheless, in countries where water is scarce, it is essential to consider the economic and environmental benefits simultaneously and to implement incentives to facilitate the implementation of such systems.

Introduction

As of 2023, the global population surpasses 8 billion, with projections indicating it will approach 10 billion by 2080 [1]. An increase in population results in an increased demand for food and raw materials in agricultural and industrial activities [2-3]. Consequently, water demand in urban, agricultural, and industrial sectors escalates [4]. Worldwide, 70% of freshwater utilization is allocated to agriculture, whilst industrial operations account for less than 20% and urban applications approximately 12% [5]. The rising demand for water and issues stemming from global climate change are leading to water scarcity or stress in numerous countries [6]. A nation is deemed to experience water stress when the yearly renewable freshwater availability per capita falls below 1,700 m³ [6]. Moderate water shortage is characterized by a per capita renewable fresh water availability of less than 1700 m³ annually, whilst severe water scarcity is defined as a per capita availability below 1000 m³ [7]. Currently, it is reported that almost 4 billion individuals experience significant water scarcity for at least one month year [8]. Figure 1 demonstrates that the city of Diyarbakır is currently experiencing high water stress, with forecasts predicting a substantial increase to an extremely high level by 2050 [9]. Goal 6 of the Sustainable Development Goals, released by the United Nations in 2015, entitled 'Clean Water and Sanitation', establishes

significant objectives for access to water and wastewater services. The objective is to guarantee universal access to clean water and sanitation services by 2030 [10]. The World Health Organization report indicates that 2.2 billion individuals lack access to safe drinking water [11]. The current global situation demonstrates that more efforts and effective solutions are needed to reach these goals.

The southern and western regions of Türkiye have a Mediterranean climate, while the inland and eastern areas have a continental climate [12]. The southeastern and eastern Anatolia regions of Türkiye encounter considerable short-term drought, whereas the coastal areas exhibit a reduced risk of drought [13]. Based on data from 1991 to 2020, Türkiye's mean annual areal precipitation is 573.4 mm, while Diyarbakır's mean annual areal precipitation, at 492.6 mm, falls below this national average [14]. The General Directorate of Meteorology indicates that Türkiye experiences an average of 100.3 rainy days annually. The years 2008, 2013, 2017, 2020, 2021, and 2022 rank among the driest in Türkiye over the past two decades [15]. Annual precipitation fluctuates yearly, with certain years experiencing aridity while others may exceed average levels. This circumstance exacerbates the issue of water stress during arid years.

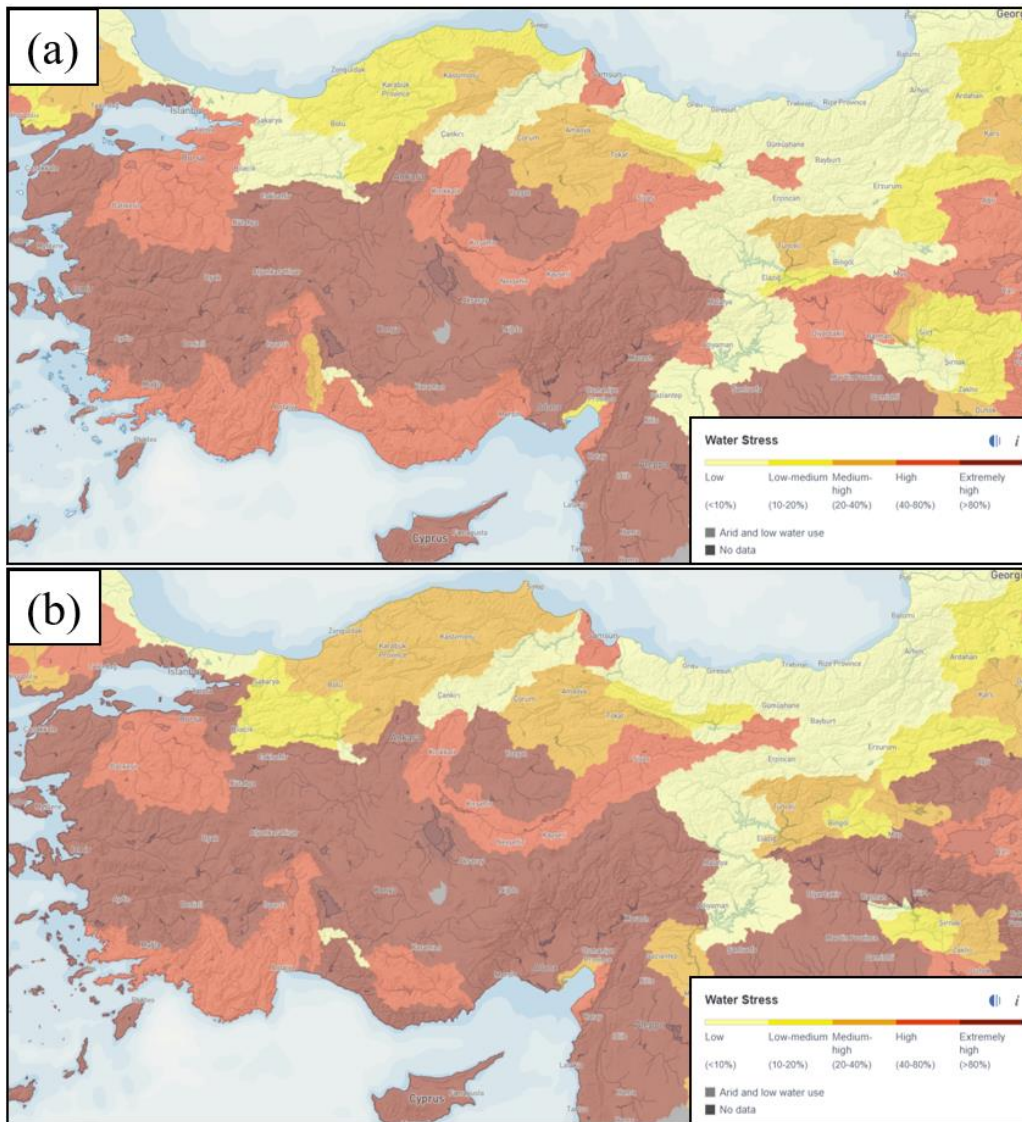


Figure 1. (a) Water stress level in Türkiye in 2024, (b) Estimated water stress level in Türkiye in 2050

[9].

Drinking water quality is unnecessary for agricultural purposes [16]. The parameters for the reuse of treated wastewater for irrigation in Türkiye are outlined in Annex 7 of “Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği”. This regulation categorizes irrigation water into two classifications: Class A and Class B, based on quality and recovery type. Given that agricultural and urban irrigation comprise over 70% of global water consumption, and that potable water quality is unnecessary for irrigation, utilizing alternative water sources in lieu of freshwater resources is deemed an effective strategy to mitigate water stress [17].

Rainwater harvesting (RWH) serves as an alternate water resource for irrigation and mitigates water stress [18-19-20]. RWH involves the comprehensive procedure of collecting rainwater from impermeable surfaces, such as rooftops and rain gardens, for storage and eventual use for many applications [21]. RWH is a technique that aids in water conservation, diminishes reliance on traditional water

delivery systems, and alleviates the impacts of water scarcity [19].

In recent years, the severity of drought has been increasing in Diyarbakır. Şarlak et al. conducted a study indicating that water levels in Devegeçidi Dam had diminished, necessitating supplemental water from Tigris Dam due to insufficient storage for agricultural irrigation [22]. The reason for the decrease in fresh water in the dam lakes is the low rainfall and high agricultural water use. Furthermore, analyses of data from 2008 to 2021 in other studies employed drought assessment methodologies, including the Palmer Drought Severity Index (PDSI) and the Standard Precipitation Index (SPI), in conjunction with precipitation data, revealing intermittent occurrences of drought [22], [23]. Furthermore, the Diyarbakır province experienced a prolonged period of drought between 2007 and 2010, which significantly affected agricultural activities. It is noteworthy that the droughts that occurred during 2008-2009 were particularly severe. The droughts compelled the rural

population to migrate to urban areas, leading to a significant increase in both the population and the population growth rate in Diyarbakır [22].

To meet the growing water demand and protect existing freshwater resources, RWH is proposed as a solution [18]. In urban areas, RWH involves the collection of water from impermeable surfaces, such as roofs and terraces, followed by its storage for non-potable applications, including irrigation [24]. Residential complexes and their associated lawns are common features in the Diyarbakır province. The objective of this study is to assess the economic viability of RWH from buildings in Diyarbakır for the irrigation of lawns. Considering the rising water demand and increasing risk of drought, the potential of RWH to conserve water and reduce reliance on the municipal water distribution network is examined. Furthermore, a cost analysis and payback period for the system have been calculated, and its

suitability for implementation in water-stressed regions such as Diyarbakır has been demonstrated.

Material and method

Water Saving Calculations

This study quantifies water conservation by utilizing rainfall harvested from the roof of a building in Diyarbakır province for lawn watering (Figure 2). Typically, precipitation is inadequate to satisfy the watering requirements of lawn areas, necessitating supplementary irrigation alongside rainfall. The requisite water for irrigating lawn areas ranges from 2.5 to 7.5 mm/day/m² [25]. In another study, the amount of water required for lawn irrigation is recommended at 5 l/day/m², which equates to 5 mm/day [26]. In this study, the water requirement for lawns was established at 5 mm/day/m² (g).

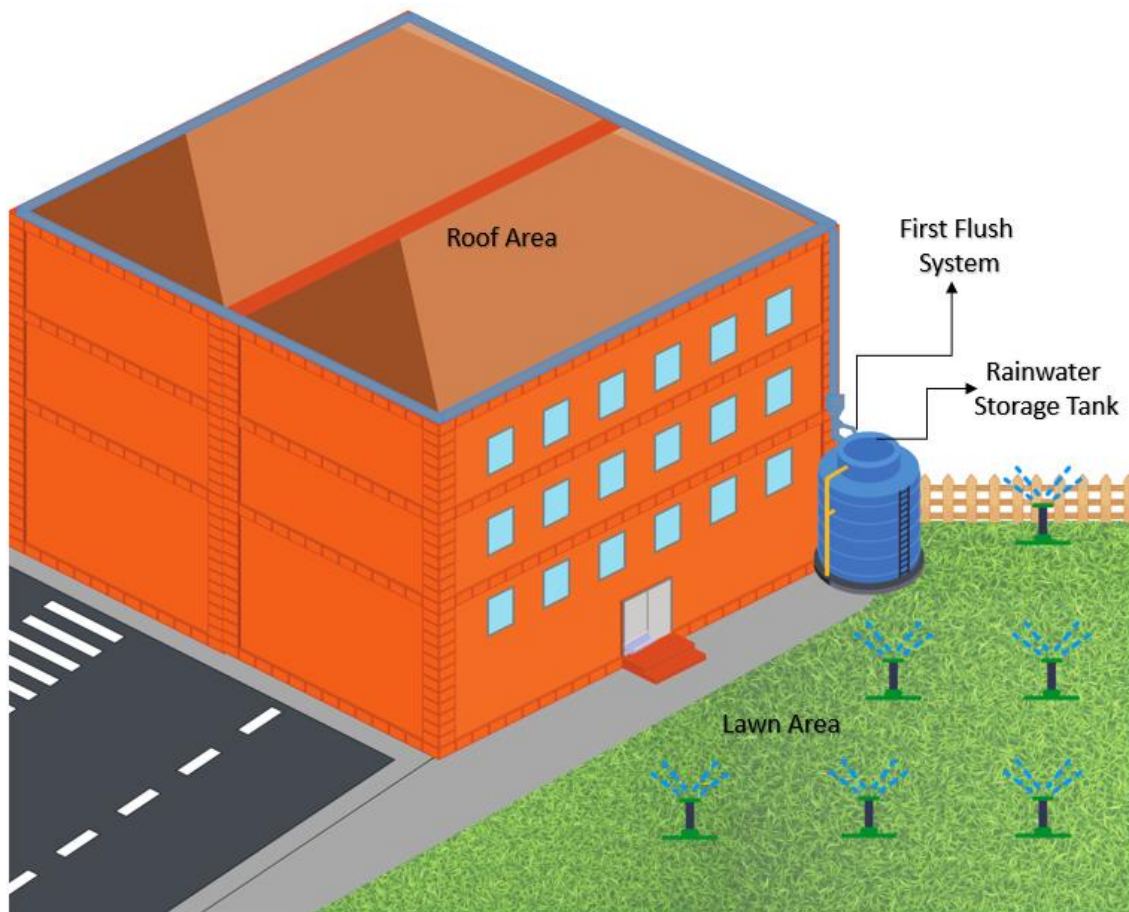


Figure 2. Demonstration of RWH system and irrigation area

The General Directorate of Meteorology of Republic of Türkiye Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change presents data on the average temperature, sunshine length, and number of rainy days in Diyarbakır from 1929 to 2023, as illustrated in the Table 1. In this study, the values of the number of rainy days were rounded to ensure that the first flush calculations were whole numbers. In RWH applications, some of the rain falling on

the roof is collected depending on the structure of the roof. In periods without rainfall, only potable water supplied by the municipal water distribution network will be used for lawn irrigation. In periods of rainfall, potable water and collected rainwater will be mixed in a common storage tank and irrigation will be done with the mixed water.

Table 1. Average temperature, sunlight duration and number of rainy days in Diyarbakır [27]

Month	Average temperature (°C)	Average duration of sunlight (hours)	Average Number of Rainy Days
January	1.8	3.9	12.25
February	3.7	4.9	11.32
March	8.3	5.6	11.82
April	13.8	7.2	11.21
May	19.3	9.6	8.73
June	26.1	12.1	2.63
July	31	12.4	0.46
August	30.5	11.6	0.32
September	25.1	10	1.07
October	17.6	7.5	5.74
November	9.8	5.5	8.19
December	4.1	3.9	11.49
Annual average	15.9	7.9	85.2

In this study, the roof coefficient is assumed to be 0.8, similar to the study of Çakar (2022) [28]. In addition, the collected water will be passed through a coarse filter before entering the storage tank. It is foreseen that some of the water will not be able to enter the storage tank due to the losses in coarse filter. Therefore coarse filter efficiency coefficient is assumed to be 0.9 [28]. The monthly precipitation height values (r) and number of rainy days (c) of Diyarbakır were obtained from the Turkish State Meteorological Service website [27]. Collectible rainfall volume was calculated by multiplying the roof area by the rainfall height. The amount of water separated by the first flush (b) was selected as 1 mm using literature data [18]. The volume of the storage tank was selected as the amount of water harvested in December, the month with the highest rainfall. In Equation (1), the net collected rainwater (a) is calculated by assuming that 80% of the rainwater is lost (roof coefficient) on the roof and 90% is lost while passing through the filter (filter efficiency coefficient). Equation (2) demonstrate the monthly amount of rainwater separated by the first flush (d) multiplied by the number of rainy days (c) and the first flush amount (b). It is assumed that the first flush should be used for each rainy day. In Equation (3), water remaining after the first flush (e) is calculated by subtracting the amount of water separated by the first flush (d) from the net collected rainwater (a). In Equation (4), the monthly rainfall per 100 m² of lawn (h) was calculated by multiplying the water remaining after the first flush (e) by the lawn area. In Equation (5), the monthly amount of irrigation water required for the lawn (j) is calculated by subtracting the monthly rainfall (h) from the monthly water requirement (g) for the lawn. In Equation (6), the monthly amount of water required to be supplemented from the the municipal water distribution network (m) is calculated by subtracting the volume of water collected in the storage tank (l) from the monthly amount of irrigation water required for the lawn (j). The monthly saving percentage (n) from the the municipal water distribution network is shown in Equation (7).

$$a = r \times \text{roof coefficient} \times \text{filter efficiency coefficient} \quad (1)$$

$$d = b \times c \quad (2)$$

$$e = a - d \quad (3)$$

$$h = e \times \text{lawn area} \quad (4)$$

$$j = g - h \quad (5)$$

$$m = j - l \quad (6)$$

$$n = (j - m) \div j \quad (7)$$

Cost Calculations

According to the official data of the Diyarbakır Water and Sewerage Administration, the water tariff for parks, gardens and communal areas in Diyarbakır is 28.4 TL per cubic meter of water used [29]. However, calculations were made based on a USD/TL rate of 34. The initial capital cost (ICC) of rainwater storage tank and water pump were taken from local market in Türkiye [30]. It should be noted that roof construction is not included in the ICC. The rainwater storage tank volumes vary according to the roof area. As the roof area increases, more rainwater is collected. Consequently, the ICC is observed to increase in accordance with the expansion of the storage tank volume. Annual inflation and interest rates are difficult to predict as they depend on many factors. In this study, annual interest rate is selected as 2% and annual inflation rate are accepted as 16,73% which is last 20 years average inflation rate in Türkiye [31], in order to calculate the cost calculation and to calculate the depreciation period of the system. Annual cost for cleaning and maintenance of the system are assumed to be approximately 70 USD. Based on the electricity price in Diyarbakır and the power of a pump that can be sufficient for this system, the cost of the consumed electrical energy is calculated as 9 USD. In the calculation of the energy consumption of the pump, it is assumed that irrigation will be done for 1 hour a day, the pump will operate on the days when the storage tank is full, that is, the pump will operate for 156 days. The storage tank is empty in July, August and September and it is assumed that it will remain empty in other months of the year when there is no rainfall. It is assumed that irrigation water will be supplied from the municipal water distribution network during the periods when the storage tank is empty. Thus, total operation and maintenance (O&M) cost is calculated as 79 USD. Water price is assumed to increase according to inflation. Equation (8) shows the annual cash flow calculation. Net present value (NPV) is calculated in Equation (9). Table 2 shows the parameters and their values used in cost calculations.

$$\text{Annual cash flow} = \text{Cost of water saved} - \text{Operating cost} \quad (8)$$

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Annual cash flow}}{(1+r)^t} - \text{Total initial investment cost} \quad (9)$$

Table 2. Parameters used in cost calculations

Parameters	Value
Annual interest rate (r) (%)	2
Annual inflation rate (%)	16.73
Current unit water price (USD/m ³)	0.8
ICC of RWH system include 350 m ² roof (USD)	2050
ICC of RWH system include 400 m ² roof (USD)	3680
ICC of RWH system include 450 m ² roof (USD)	4680
ICC of RWH system include 500 m ² roof (USD)	6210
Current O&M cost (USD)	79
Annual water saving (m ³)	968

Result and Discussion

In this study, the storage of harvested rainwater (HRW) for irrigation purposes after passing through first flush and coarse filtration units was examined. It was determined that irrigating a 100 m² lawn area with rainwater collected from a 350, 400, 450 and 500 m² roof areas could save 56%, %64, %71 and %78 of the annual water consumption from the municipal water distribution network, respectively. As this

roof:lawn area ratio decreases, the water savings also decline. The primary reason for this reduction is that as the lawn area increases, the water required for irrigation grows proportionally. The results in this study are consistent with the results in the literature. Studies in the literature report that non-potable water savings for domestic use through RWH systems range from 29% to 62%, depending on the characteristics of the buildings [32]. In a study conducted in China, the use of rainwater for irrigation was investigated, and it was shown that a well-designed RWH system could achieve up to 54% water savings from the municipal water distribution network [33].

Comparison of economic and environmental impacts of the RWH system for different roof areas (350 m², 400 m², 450 m² and 500 m²) according to the incentive rates (25%, 50%, 75% and no incentive) were demonstrated in Figure 3. It is evident that the annual water savings (m³/year) exhibit a notable increase with an expansion in roof area, thereby substantiating the assertion that larger roof areas exert a direct influence on the RWH capacity. To illustrate, 100 m³ of water can be saved with a roof area of 350 m², while this value reaches 141 m³ with a roof area of 500 m².

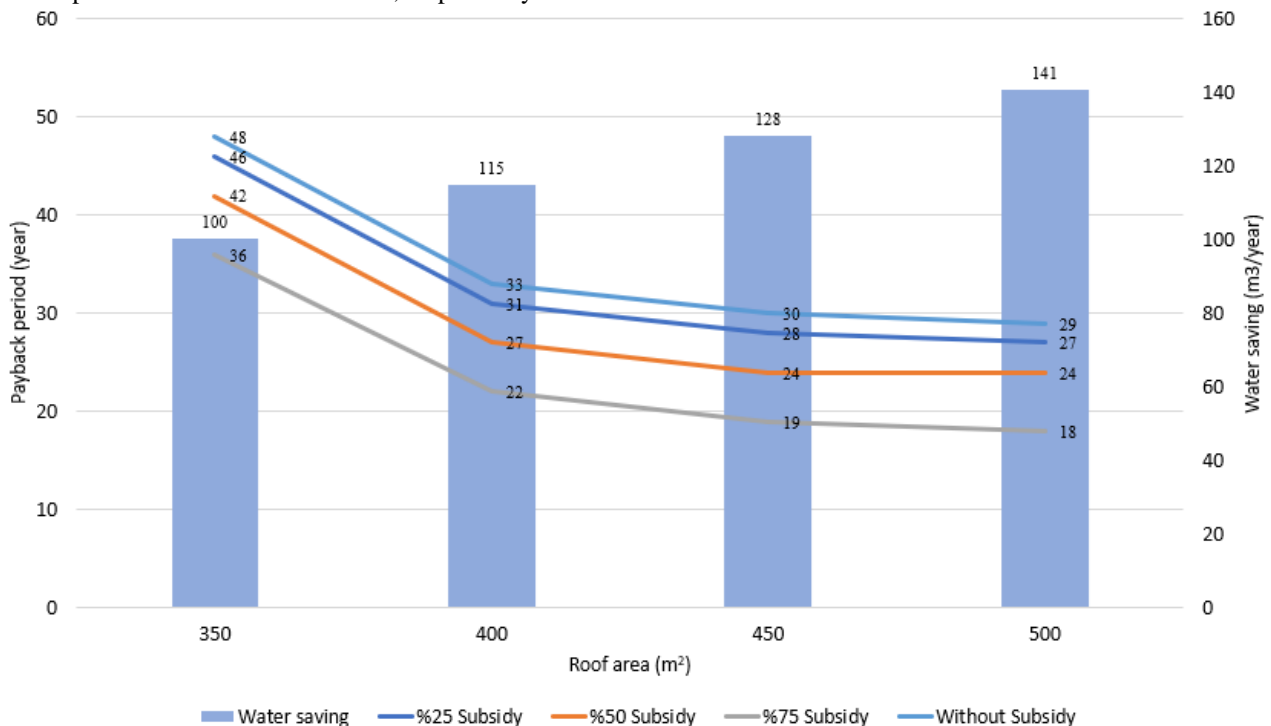


Figure 3. Impact of roof area and subsidy rates on payback period and water savings in RWH systems

The payback period is defined as the year in which the cumulative discounted cash flows exceed the ICC. In other words, even if the annual cash flow is positive from the first year, only after the NPV turns positive does the system generate a profit in total due to ICC. Payback periods decrease inversely proportional to the subsidy rates. While the payback period ranged between 48 and 29 years without subsidy, this period decreased to 36 and 18 years with 75% subsidy. These results reveal that subsidy mechanisms can significantly increase the economic feasibility of the system and strengthen the viability of RWH systems with shorter payback periods, especially in buildings with larger roof

areas. Some studies in literature support subsidy to purchase storage tank and pump, which are the first investment cost items in the RWH system, should be offered to the user free of charge or at a discount by the local or municipal government [27-28]. In addition to the subsidy rates, the size of the roof area is among the main factors affecting the water saving and economic recycling performance of the system. Effect of increases in roof area on payback periods was not linear. In particular, while a significant decrease in the payback period is observed in the transition from 350 m² to 400 m², it is noticed that the rate of decrease decreases in the transition from 400 m² to 450 m² and 500 m². This

indicates that the growth of the roof area initially provides a larger contribution to the economic performance of the system, but after a certain size, this effect marginally decreases. This trend indicates that system design and cost-effectiveness optimisation should be carefully considered in economic analyses. Based on these results, it can be concluded that a roof area of 400 m² can be considered as an optimum value, considering the rapid decrease in payback period and the significant improvement in terms of water saving. The decrease in the rate of decrease in payback period for larger roof areas indicates a decrease in the marginal benefit of economic performance. Therefore,

400 m² roof area stands out as a balancing point between cost and benefit.

The percentage of rainwater harvested from a 400 m² roof that meets the irrigation water needs of a 100 m² lawn area in each month of the year were demonstrate in Table 3. Especially in January-May and November, irrigation needs were met entirely by rainwater. However, due to low rainfall in June-August, dependency on the municipal water network increased and water savings dropped to 0% during this period.

Table 3. Monthly water balance analysis of RWH system and irrigation needs for 400 m² roof and 100 m² lawn area

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Yearly total	Yearly average
Rainfall (mm)	69.7	67.2	67.2	68.3	44.4	8.6	1.3	1	5.3	32.5	55.9	71.2	492,6	41
Rainwater yield (mm)	50.2	48.4	48.4	49.2	32.0	6.2	0.9	0.7	3.8	23.4	40.2	51.3	354,7	29,5
Seperated rainwater by first flush (mm/month)	12	11	12	11	9	3	1	1	1	6	8	11	86	7,1
Rainfall – first flush (mm)	38.2	37.4	36.4	38.2	23	3.2	0	0	2.8	17.4	32.2	40.3	269	22,4
Amount of rainwater collected from 400 m ² roof (m ³)	15.3	15	14.6	15.3	9.2	1.3	0	0	1.1	7	12.9	16.1	107.6	9
Water requirement for 100 m ² lawn (m ³)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	180	15
Rainfall on 100 m ² lawn (m ³)	3.8	3.7	3.6	3.8	2.3	0.3	0	0	0.3	1.7	3.2	4	26,9	2,2
Irrigation water required for 100 m ² lawn (m ³)	11.2	11.3	11.4	11.2	12.7	14.7	15	15	14.7	13.3	11.8	11	153.1	12.8
Amount of water needed from municipal water distribution network (m ³)	0	0	0	0	0	12.2	15	15	13.6	7.9	1.5	0	65.2	5.4
Monthly savings from municipal water distribution network (%)	100%	100%	100%	100%	100%	19%	0%	0%	9%	47%	90%	100%	-	64%

As a consequence of the reduction in precipitation levels and the concomitant increase in water usage from May onwards, the storage capacity of the tank is rapidly depleted. By June, July and August, the tank is almost entirely empty (Figure 4). Given the absence of precipitation during the summer months, the irrigation requirements will be fulfilled from municipal water distribution network, resulting in the rainwater tank remaining empty during this period. Following the increase in rainfall from September onwards, storage levels rise once more, enabling the system to become active once more in November. For a system with a 400 m² roof, the maximum volume of water that can be

stored in the tank is 17 m³. The tank volume was selected to be 20 m³, in order to facilitate market availability and to allow for the inclusion of air space within the storage tank.

A similar study [36] indicates that the payback period of the system is reduced as the storage tank volume increases. Furthermore, the same study highlights that government subsidy contribute to a reduction in the payback period for such systems. In this study, if the ICC is fully subsidised by government incentives, the system generates a profit from the first year onwards.

The use of these RWH systems solely to meet irrigation needs results in a long payback period. In a feasibility study of a RWH in 5 different cities in Brazil, HRW was used for toilet flushing, cleaning and irrigation and the payback period was reported to be in the range of 1.5-10 years [37]. In a study carried out in Barcelona (Spain), HRW met more than 60% of lawn irrigation needs and the payback period was calculated to be 33-43 years for detached houses and 20-29 years for multi-storey buildings [38]. An economic feasibility study in Türkiye calculated that the average payback period for RWH systems is 36 years for residential buildings and 23 years for public buildings. Public buildings have shorter payback periods due to their larger roof areas and water demands [39]. In Türkiye, the water price for public buildings is higher than the water price for residential buildings [39]. From this point of view, it is expected that the payback period of the application of RWH in public buildings and the use of the collected water in irrigation water will be lower than that of residential buildings. Energy prices, storage tank costs, unit water price, annual inflation rate and annual interest rate affect the annual cash flow and NPV. It should be noted that the cost of these items varies from country to country. For this

reason, payback periods are different from each other in the studies in the literature.

NPV of such systems is observed to increase in conjunction with an increase in the interest rate. This demonstrates that the RWH system is not financially viable in an economy characterized by a high interest rate. For the system to be profitable, the savings in water usage must exceed the O&M cost from the first year onwards. If the profit from water savings is higher than the annual O&M, the payback period of the system decreases with the increase in inflation. On the contrary, if the O&M is higher, the payback period increases. This situation emphasizes that water savings must be higher than O&M from the first year of the system. Yearly water savings and economic evaluation for 400 m² roof and 100 m² lawn area are given in Table 4. The increase in water price shortens the payback period in such systems. In countries where water is cheap, it is not economically attractive to install a RWH system. However, not only economic benefits but also environmental benefits are very important for RWH systems. To encourage RWH in water scarce countries, water bills can be increased and the initial investment equipment for the RWH system can be offered to the user free of charge.

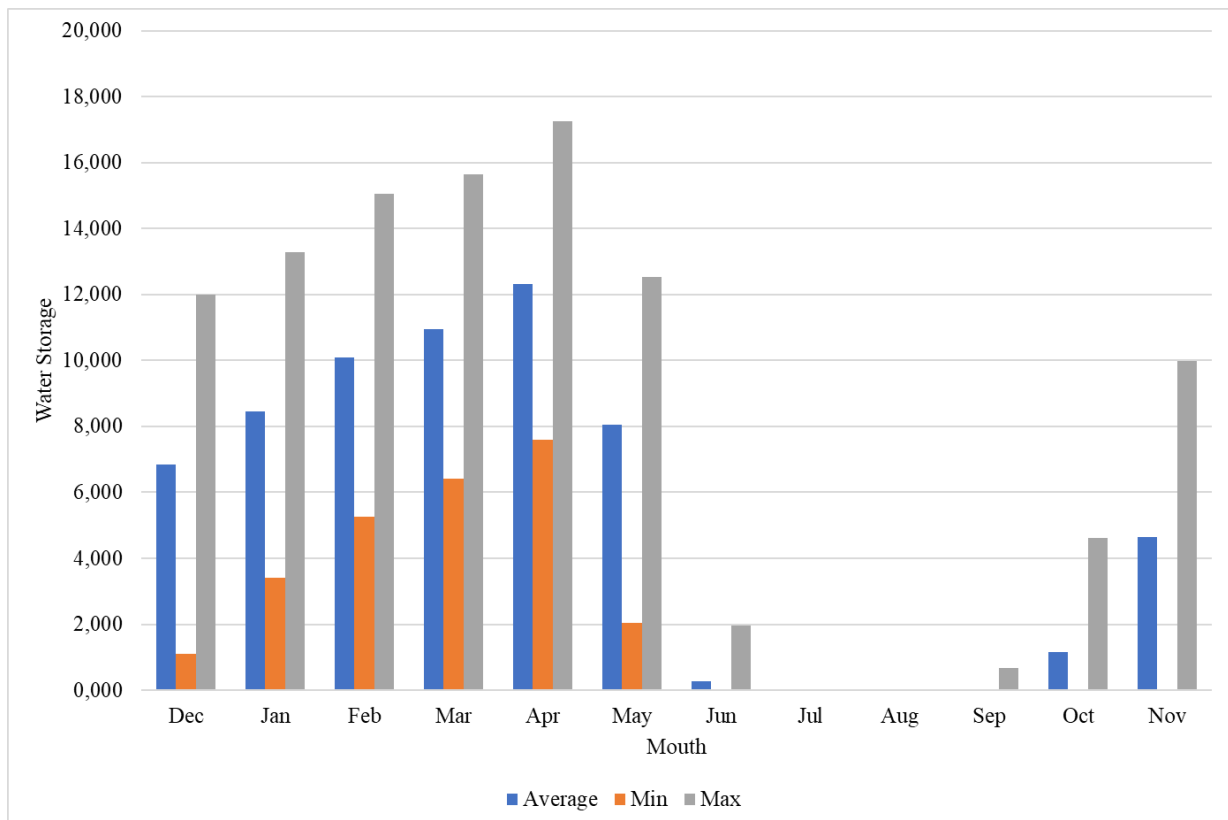


Figure 4. Monthly water storage variations: minimum, maximum, and average values for RWH system with 400m² roof

Table 4. Yearly Water Savings and Economic Evaluation for 400 m² roof and 100 m² lawn area

Year	Water Price (USD)	Annual water saving (USD)	O&M cost (USD)	Yearly cash flow (USD)	Sum of NPV-future value of ICC (USD)
1	0.8	91.8	79.1	12.7	-3737.6
2	0.9	107.2	92.3	14.8	-3798.3
3	1.1	125	107.8	17.3	-3858.6
4	1.3	145.9	125.8	20.2	-3918.0
5	1.5	170.3	146.8	23.5	-3976.3
10	3.2	368.6	317.7	50.9	-4236.3
20	15.0	1726.9	1488.4	238.5	-4274.9
30	70.5	8090.6	6973.0	1117.6	-1847.7
31	330.2	37904.2	32668.4	5235.7	-1275.0
32	385.4	44234.1	38124.0	6110.1	-603.2
33	449.7	51621.2	44490.8	7130.5	182.2

Conclusion

This study highlights the potential of RWH systems for enhancing water sustainability by demonstrating their ability to significantly reduce municipal water consumption for lawn irrigation purposes in Diyarbakır province. Results reveal that larger roof areas yield higher water savings, with a 400 m² roof achieving an optimal balance between cost-effectiveness and water conservation, saving 64% of annual irrigation water needs for a 100 m² lawn. The economic feasibility of RWH systems is strongly influenced by government subsidies, which notably shorten payback periods, and by contextual factors such as energy prices, inflation, and water costs. Seasonal variations underscore the necessity of designing RWH systems to complement municipal water supplies during dry periods. While economic incentives remain critical for widespread adoption, the environmental benefits of these systems provide a compelling case for their implementation, particularly in regions facing water scarcity. In addition, it is also emphasized the importance of using the first flush system to maintain appropriate water quality although it slightly reduces the amount of harvested rainwater. The implementation of RWH applications has the potential to alleviate the issue of water scarcity in arid regions. However, the economic viability of such initiatives remains contingent upon the provision of government incentives or subsidies.

References

- [1] K.-E. Norrman, "World population growth: A once and future global concern," *World*, vol. 4, no. 4, pp. 684–697, 2023.
- [2] R. M. Ewers, J. P. Scharlemann, A. Balmford, and R. E. Green, "Do increases in agricultural yield spare land for nature?," *Glob. Change Biol.*, vol. 15, no. 7, pp. 1716–1726, 2009.
- [3] H. Zhou, "Population growth and industrialization," *Econ. Inq.*, vol. 47, no. 2, pp. 249–265, 2009.
- [4] S. Liu, S. Gao, W. L. Hsu, Y. C. Shiau, and H. L. Liu, "Mechanism study on the impact of China population structure change on the water use of the three main industries," *Sustainability*, vol. 14, no. 1, p. 204, 2021.
- [5] UNESCO World Water Assessment Programme, The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water. UNESCO, 2023. Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655>
- [6] A. du Plessis and A. du Plessis, "Current and future water scarcity and stress," *Water as an Inescapable Risk: Current Global Water Availability, Quality and Risks with a Specific Focus on South Africa*, pp. 13–25, 2019.
- [7] M. Kumm, P. J. Ward, H. De Moel, and O. Varis, "Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia," *Environ. Res. Lett.*, vol. 5, no. 3, p. 034006, 2010.
- [8] M. Salehi, "Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis," *Environ. Int.*, vol. 158, p. 106936, 2022.
- [9] Aqueduct Water Risk Atlas. Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=bw_s_cat&lat=38.48779515943426&lng=35.618485808372505&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=optimistic&scope=baseline&threshold&timeScale=annual&year=baseline&zoom=7
- [10] K. Obaideen, N. Shehata, E. T. Sayed, M. A. Abdelkareem, M. S. Mahmoud, and A. G. Olabi, "The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline," *Energy Nexus*, vol. 7, p. 100112, 2022.
- [11] World Health Organization and United Nations Children's Fund (UNICEF), Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: special focus on inequalities. Geneva: World Health Organization, 2019. Accessed: Aug. 02, 2024. [Online]. Available: <https://iris.who.int/handle/10665/329370>
- [12] M. Turkes, "Climate and drought in Turkey," *Water Resources of Turkey*, pp. 85–125, 2020.
- [13] F. K. Sönmez, A. Ü. Kömüscü, A. Erkan, and E. Turgu, "An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index," *Nat. Hazards*, vol. 35, pp. 243–264, 2005.

- [14] 'Kümülatif Yağış Raporu - Meteoroloji Genel Müdürlüğü'. Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/yagis-raporu.aspx?b=k>
- [15] ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI Meteoroloji Genel Müdürlüğü, '2023 YILI YAĞIŞ DEĞERLENDİRMESİ'.
- [16] I. N. Shaikh and M. M. Ahammed, "Quantity and quality characteristics of greywater from an Indian household," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, no. 3, p. 191, 2022.
- [17] J. Hristov, J. Barreiro-Hurle, G. Salputra, M. Blanco, and P. Witzke, "Reuse of treated water in European agriculture: Potential to address water scarcity under climate change," *Agric. Water Manag.*, vol. 251, p. 106872, 2021.
- [18] M. N. Hamidi, N. Hamidi, O. Işık, H. Güven, H. Özgün, and M. E. Erşahin, "Sürdürülebilir yağmur suyu hasadı," *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, vol. 24, no. 2, pp. 97–110, 2023.
- [19] S. Börü and Z. F. Toprak, "Alternatif bir su kaynağı olarak yağmur suyu hasadı," *Türk Hidrolik Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 42–50, 2022.
- [20] M. N. Hamidi, S. Shitreh, A. I. Cengiz, K. Ozelcik, B. Eryildiz-Yesir, Ö. Ekmekcioğlu, O. M. Halat, M. C. Demirel, B. Canberk, I. Koyuncu, O. Isik, H. Guven, H. Ozgun, and M. E. Ersahin, "Efficient roof selection in rainwater harvesting: Hybrid multi-criteria and experimental approach," *Water Resour. Manag.*, pp. 1–20, 2024.
- [21] A. M. Rodrigues, K. T. M. Formiga, and J. Milograna, "Integrated systems for rainwater harvesting and greywater reuse: A systematic review of urban water management strategies," *Water Supply*, vol. 23, no. 10, pp. 4112–4125, 2023.
- [22] N. Şarлак, A. Muratoğlu, and Ş. Tiğrek, "Devegeçidi Baraj Gölü meteorolojik-hidrolojik-tarımsal kuraklık analizi," *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2024.
- [23] B. İzol, H. Yetmen, and S. Benek, "İklim değişikliğinin ve değişebilirliğinin yerel göç ve çatışmalardaki rolü: Siverek-Diyarbakır (Karacadağ yöresi) örneği," *Cografya Dergisi*, no. 46, pp. 67–80, 2023.
- [24] A. Campisano, D. Butler, S. Ward, M. J. Burns, E. Friedler, K. DeBusk, L. N. Fisher-Jeffes, E. Ghisi, A. Rahman, H. Furumai, and M. Han, "Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives," *Water Res.*, vol. 115, pp. 195–209, 2017.
- [25] R. Baştuğ, "Çim alanların su gereksinimi ve sulanması," *Akdeniz Univ. J. Fac. Agric.*, vol. 12, no. 1, pp. 169–182, 1999.
- [26] Y. Ünlükaplan and B. Tiğiz, "Cumhuriyetin 100. yılında sürdürülebilir su kullanımında yeşil alan tasarım ve yönetiminin etkinliğinin araştırılması: Ankara Dikmen Vadisi örneği," *Kent Akad.*, vol. 16, special issue, pp. 115–130, 2023.
- [27] 'Meteoroloji Genel Müdürlüğü'. Accessed: Oct. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.mgm.gov.tr/Veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=DIYARBAKIR>
- [28] H. Çakar, "İzmir ili koşullarında bahçeli bir sitenin yağmur suyu hasadı potansiyelinin değerlendirilmesi," *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 446–452, 2022.
- [29] 'Güncel Su Fiyatları – DİSKİ Genel Müdürlüğü'. Accessed: Oct. 02, 2024. [Online]. Available: <https://diski.gov.tr/guncel-su-fiyatları/>
- [30] İZOPLAS, 'Su Deposu Fiyatları', Su Deposu Fiyatları. Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: <https://izoplas.com/su-deposu-fiyatları/>
- [31] 'TCMB - Tüketici Fiyatları'. Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Enflasyon+Verileri/Tuketici+Fiyatları>
- [32] M. Carollo, I. Butera, and R. Revelli, "Water savings and urban storm water management: Evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale," *PLoS One*, vol. 17, no. 11, p. e0278107, 2022.
- [33] W. Zhang, J. Sheng, Z. Li, D. C. Weindorf, G. Hu, J. Xuan, and H. Zhao, "Integrating rainwater harvesting and drip irrigation for water use efficiency improvements in apple orchards of northwest China," *Sci. Hortic.*, vol. 275, p. 109728, 2021.
- [34] Y. D. Gómez and L. G. Teixeira, "Residential rainwater harvesting: Effects of incentive policies and water consumption over economic feasibility," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 127, pp. 56–67, 2017.
- [35] Z. Al-Houri and A. Al-Omari, "Assessment of rooftop rainwater harvesting in Ajloun, Jordan," *Water Reuse*, vol. 12, no. 1, pp. 22–32, 2022.
- [36] A. Rahman, J. Keane, and M. A. Imteaz, "Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 61, pp. 16–21, 2012.
- [37] E. Ghisi, L. P. Thives, and R. F. W. Paes, "Investment feasibility analysis of rainwater harvesting in a building in Brazil," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 18, no. 4, pp. 1497–1504, 2018.
- [38] L. Domènech and D. Saurí, "A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): Social experience, drinking water savings and economic costs," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 6–7, pp. 598–608, 2011.
- [39] A. Himat and S. Dogan, "The impact of the regularization on the economic analysis of rooftop rainwater harvesting system," *Water Supply*, vol. 23, no. 3, pp. 1041–1056, 2023.



Evsel atıklardan biyogaz üretimi ve enerji potansiyeli: Diyarbakır Örneği

Biogas production from domestic waste and energy potential: Diyarbakir sample

Şeyhmus Tümür*

¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, stumur@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7589-8941>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Kasım 2024
Revizyon 27 Aralık 2024
Kabul 27 Aralık 2024
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

*Biyogaz,
Enerji üretimi,
Evsel katı atık,
Sürdürülebilirlik*

ÖZ

Sürdürülebilir atık yönetimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu kapsamlı çalışmada, büyük bir biyogaz tesisi üzerinden evsel katı atıkların biyogaz üretimine dönüştürülme potansiyeli incelenmiştir. Diyarbakır ilindeki evsel atıkların toplanması, taşınması, bertarafı ve enerjiye dönüştürülmesi süreçleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Düzensiz depolama ile 2022 yılı ortalama 588891 ton evsel katı atıkla beslenen tesis, 4416,68 MWe elektrik enerjisi üretimi sağlamıştır. Düzenli depolama ile 2022 yılı ortalama 588891 ton evsel katı atıkla beslenen tesis, 7361,14 MWe elektrik enerjisi üretimi sağlamıştır. Düzensiz depolama ile 2036 yılı ortalama 588891 ton evsel katı atıkla beslenen tesis, 5957,88 MWe elektrik enerjisi üretimi sağlamıştır. Düzenli depolama ile 2036 yılı ortalama 588891 ton evsel katı atıkla beslenen tesis, 9929,12 MWe elektrik enerjisi üretimi sağlamıştır. Çalışma sonuçları, evsel katı atıkların biyogaz üretimi için önemli bir kaynak olduğunu ve bu sayede hem atık yönetimi sorununa çözüm bulunabileceğini hem de ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayabilecek yenilenebilir bir enerji kaynağı elde edilebileceğini göstermiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 November 2024
Received in revised form 27 December 2024
Accepted 27 Aralık 2024
Available online 26 March 2025

Keywords:

*Biogas,
Energy Production,
Domestic Solid Waste,
Sustainability*

Doi: 10.24012/dumf.1578183

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In this comprehensive study aimed at advancing sustainable waste management and renewable energy, the potential of converting municipal solid waste into biogas through a large-scale biogas plant was examined. The processes involved in the collection, transportation, disposal, and energy conversion of municipal solid waste in Diyarbakır province were analyzed in depth. It was found that the facility, fed with an average of 588,891 tons of municipal solid waste per year in 2022 under irregular disposal conditions, generated 4,416.68 MWe of electricity. When fed with the same amount of waste under regular disposal conditions in the same year, the facility generated 7,361.14 MWe. Similarly, for 2036, the facility produced 5,957.88 MWe and 9,929.12 MWe under irregular and regular disposal conditions, respectively. The findings of this study indicate that municipal biowaste serves as a substantial resource for biogas production, thereby offering a solution to waste management challenges and providing a renewable energy source that can significantly contribute to the national economy.

Giriş

Enerji, tüm canlıların temel gereksinimlerinden biridir. Geleneksel enerji kaynaklarının sürdürülebilir olmaması ve bunlarla ilişkili çevre kirlilikleri, yenilenebilir enerjiyi günümüzün başlıca ihtiyacı haline getirmiştir. Sürdürülebilir sosyo-ekonomik kalkınmada ve yaşam kalitesinin iyileştirilmesinde belirleyici bir rol oynar. Dünyada geleneksel enerji kaynaklarının aşırı kullanımı nedeniyle sera gazlarının üretimi, küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin başlıca nedenidir.

Artmakta olan nüfus, endüstrileşme ve tüketim alışkanlıkları, katı atık üretimini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, doğal çevre üzerindeki baskıyı artırarak ciddi kirlilik sorunlarına yol açmaktadır. Katı atıkların yanlış yönetimi; toprak, su ve hava kirliliğine neden olmakta, biyolojik çeşitliliği tehdit etmekte ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir [1]. Bu nedenle, katı atıkların toplanması, taşınması, geri dönüşümü ve bertarafı gibi süreçleri kapsayan etkin bir atık yönetimi sistemi oluşturmak büyük önem taşımaktadır. Ancak birçok ülkede ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde, katı atık yönetimi konusunda ciddi eksiklikler bulunmaktadır. Bu durum hem çevresel sorunları derinleştirmekte hem de ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu bağlamda katı atık yönetimi için yerel yönetimler ve özel sektör arasında iş birliği yapılması, sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi için gereklidir [2].

Yenilenebilir enerji sektöründe yaşanan büyüme, anaerobik çürütme ve biyogaz üretimi gibi teknolojilerin gelişimiyle desteklenmektedir. Bu sayede, atıklardan enerji elde edilerek hem enerji güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmaktadır [3].

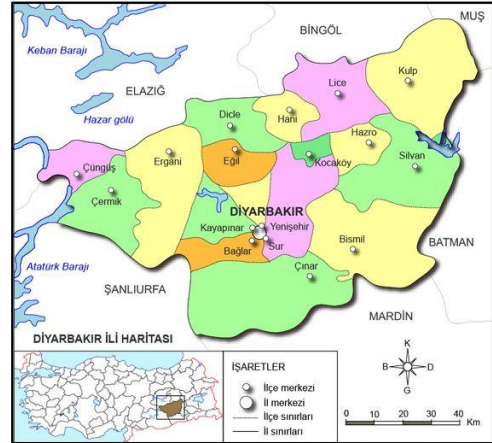
Biyogaz teknolojisi, mikroorganizmalar tarafından oksijen yokluğunda organik maddenin ayrıştırılması veya bozunmasının gerçekleştiği biyoenerji dönüşümünün biyokimyasal dönüşüm teknolojisi [4]. Kompakt biyogaz tesisi yeni bir biyogaz teknolojisidir. Tesisin sindiricisi, 1 m³'lük basit su depolama plastik tankı ve 0,75 m³'lük gaz tutucusudur. Gaz tutucu, daha büyük olanında baş aşağı yerleştirilir. Biyolojik olarak parçalanabilir atıklar (BW'ler) besleme malzemesi olarak kullanılır. Bu tesis genellikle yer üstünde tutulur.

Evsel atıkların artan sorunu ve bunların uygunsuz yönetimi, kentsel çevreyi her geçen gün daha da bozmaktadır. Kentsel ve yarı kentsel alanlarda alan kısıtlamaları, inek gübresi veya diğer hayvan gübrelerinin bulunmaması ve atık malzemeler olarak kaynakların kaybı, insanları alternatif yenilenebilir enerji kaynakları aramaya zorlamaktadır. Çalışmanın temel amacı, biyolojik olarak parçalanabilir evsel atıkların anaerobik sindiriminden alternatif bir enerji olarak biyogaz üretimidir [5].

Çalışma Alanı

Çalışma, Türkiye'nin güneydoğusunda bulunan Diyarbakır'da gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Şehir deniz seviyesinden yaklaşık olarak 645 m yükseklikte yer almaktadır. İklim Temmuz ayında maksimum 40 °C ve

Ocak ayında minimum -2 °C olan karasal iklime sahiptir [6]Şekil 1 Diyarbakır ili haritası.



Şekil 1 Diyarbakır ili haritası

Materyal ve Metot

Materyal

Diyarbakır'da çöplerden enerji elde etme potansiyeli araştırılmaktadır. Bu çalışmada, evsel atıklar ile doğal ortamda oluşan atıklara kadar her türlü atık miktarı detaylı bir şekilde incelenmektedir. Bu sayede, kent merkezi ve çevre ilçelerdeki evsel ve doğal atıkların enerjiye dönüştürülerek nasıl değerlendirilebileceği araştırılmaktadır.

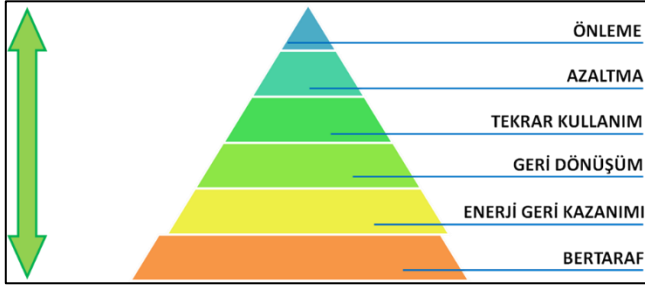
Diyarbakır'da evsel ve endüstriyel katı atıkların bertarafı ve geri dönüşümü

Katı atıkların yönetimi, atıkların oluşumundan bertarafına kadar geçen tüm süreçleri içerir. Bertaraf yöntemleri arasında kompostlaştırma (organik atıkların gübreye dönüştürülmesi), enerji geri kazanımı (yakma yoluyla enerji üretimi) ve düzenli depolama (kontrol altında depolanma) sayılabilir. Geri kazanım ise atıkların ham madde veya enerjiye dönüştürülerek ekonomik değer artırılması ve doğal kaynakların korunması amacıyla uygulanan bir yöntemdir [7]. Geri kazanım hem atık miktarını azaltır hem de çevresel etkileri en aza indirir [8].



Şekil 2 Vahşi depolama alanının kuş bakışı görünümü

Atık yönetimi süreçleri, atıkların önlenmesi, azaltımı, geri kazanımı, bertarafı ve enerji dönüşümü olmak üzere başlıca beş ana başlıkta incelenir (Şekil 3). Geri kazanım, atıkların fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemlerle yeniden kullanılabilir hale getirilmesi sürecidir. Bertaraf tesisleri ise, atıkların hacmini azaltmak, zararlı etkilerini ortadan kaldırmak veya enerji elde etmek amacıyla kullanılan tesislerdir. Çevresel mevzuat, atıkların bertarafı ve kontrolü için gerekli standartları belirler [9].



Şekil 3 Atık yönetim süreçleri şeması

Katı atık yönetimi süreçlerinin etkin bir şekilde planlanması ve uygulanması hem çevresel sürdürülebilirliği destekler hem de ekonomik kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Atık karakterizasyonu, yani atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin belirlenmesi, uygun bertaraf yöntemlerinin seçilmesi için temel bir adımdır. Diyarbakır örneğinde olduğu gibi, atık bileşimindeki organik madde oranı oldukça yüksektir ve bu durum, kompostlama gibi biyolojik işlemlerin önemini vurgulamaktadır. Tablo 7’ de görüldüğü gibi insanların yaşam kalitesine göre değişiklik arz etse de Diyarbakır ilindeki 2020 yılı atık kompozisyonunun yaklaşık %41,99’unun mutfak atıkları, %12,68’inin diğer yanamayan atıklar, %10,48’ini plastik atıklar, %5,81’inin diğer yanabilen atıklar ve %7,97’sinin diğer atıklardan oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 4 Diyarbakır biyogaz tesisinde depolanan atıklar

Katı atıklar, doğru yöntemlerle yönetildiğinde değerli bir enerji kaynağı haline gelebilmektedir. Evsel atıkların önemli bir kısmını oluşturan organik maddeler, anaerobik koşullarda (havasız ortamda) parçalanarak biyogaz adı verilen bir gaz karışımı üretir. Biyogazın ana bileşenleri metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) olup, yakılmasıyla elektrik enerjisi elde edilebilir. Bu süreç, biyometanizasyon olarak adlandırılır ve hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sağlar.

Biyogaz üretimi, atıkların düzenli depolama alanlarında metan gazı oluşumunu önleyerek sera gazı emisyonlarını

azaltır. Ayrıca, biyogaz üretimi sırasında elde edilen sıvı gübre, tarımda kullanılarak toprak verimliliğini artırır. Bu sayede, atıklar hem enerji kaynağı hem de tarımsal üretim için değerli bir girdi haline gelir.

Diğer bir yöntem olan gazlaştırma, katı atıkların yüksek sıcaklıklarda ve sınırlı oksijen varlığında gazlaştırılması ile gerçekleşir. Bu süreçte, katı atıklardan sentez gazı adı verilen yanıcı bir gaz elde edilir. Sentez gazı, daha sonra elektrik veya ısı enerjisi üretmek için kullanılabilir. Gazlaştırma, biyogaz üretimine göre daha yüksek enerji verimliliği sunar ve daha geniş bir atık türü için uygulanabilir. Ancak, yüksek yatırım maliyeti ve karmaşık bir teknoloji olması nedeniyle daha az yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5 Gaz üretimi için atıkların rigollerde depolanması

Katı atıkların yakılması ise, geçmişte sıkça kullanılan ancak günümüzde çevresel etkileri nedeniyle daha az tercih edilen bir yöntemdir. Düşük enerji yoğunluğuna sahip olan katı atıkların doğrudan yakılması, hava kirliliği ve küresel ısınmaya neden olabilmektedir. Ayrıca, yakma işlemi sırasında atıkların hacmi önemli ölçüde azalsa da zararlı yanma ürünleri ve kül oluşumu gibi sorunlar ortaya çıkabilir.

Sonuç olarak, katı atıkların enerjiye dönüştürülmesi, sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adımdır. Biyogaz üretimi ve gazlaştırma gibi teknolojiler, atıkların çevresel etkilerini azaltırken aynı zamanda enerji ihtiyacını karşılamaya da katkı sağlar. Türkiye’de de bu konuda önemli çalışmalar yapılmakta ve atıkların enerjiye dönüştürülmesiyle ilgili yatırımlar artmaktadır [3].

Metod

Diyarbakır’daki biyogaz potansiyelinin belirlenmesi için gerçekleştirilen araştırmada, evsel katı atıkların biyogaz üretimine olan katkısı, çeşitli kabuller ve sabitler kullanılarak modellenmiştir. İlde bulunan Dicle Yenilenebilir Enerji katı atık ve biyokütle elektrik santrali tesisinden elde edilen yıllık 20.736.000 metreküp metan gazı üretim verisi, bu modellemeye önemli bir girdi olarak kullanılmıştır. Bu sayede, ilin biyogaz üretim potansiyeli hakkında daha gerçekçi tahminler yapılabilmektedir. Ayrıca, bu çalışma, biyogaz üretimi için uygun atık türleri, tesislerin

kapasitesi ve enerji verimliliği gibi konularda da önemli bilgiler sunmaktadır.

İşletmenin kapasitesi geçerli kapasite kriter ve esaslarına göre günde 24 saat ve yılda 350 gün üzerinden hesaplanarak;

Kapasite = 2400 Kwe * 24 * 350 = 20.160.000 kWh/yıl olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, ilk olarak ilin nüfus hesabı yapılacaktır.

Nüfus Projeksiyonu

Nüfus projeksiyonu için farklı metotlar kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır [10] [11].

- Aritmetik Artış Metodu
- Geometrik Artış Metodu
- Bileşik Faiz Metodu
- İller Bankası Metodu

Aritmetik Artış Metodu

Aritmetik artış metodunda aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$k_a = \frac{N_s - N_i}{t_s - t_i}$$

$$N_g = N_s \times k_a (t_g - t_s)$$

Burada;

kaAritmetik Artış Katsayısı

NgGelecekteki Nüfus

NsSon Nüfus Sayımı

Niİlk Nüfus Sayımı

tgGelecekteki Nüfus Yılı

tsSon Nüfus Sayım Yılı

ti İlk Nüfus Sayım Yılı

Aritmetik artış katsayısı hesap edilirken yukarıdaki nüfus değerleri kullanılmıştır.

Bu kapsamda öncelikle aritmetik artış katsayıları hesap edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1 Aritmetik Artış Katsayıları

İl	İlçeler	Ortalama	En Büyük	En Küçük
Diyarbakır	Bağlar	5379	5379	5379
	Bismil	771	771	771
	Çınar	903	903	903
	Ergani	1881	1881	1881

Kayapınar	17192	17192	17192
Sur	-2778	-2778	-2778
Yenişehir	2328	2328	2328
Toplam	3668	17192	-2778

Artış katsayılarına göre hesap edilen gelecekteki nüfus değerleri "Nüfus Artış Metotlarının Karşılaştırılması" alt başlığı altında verilmiştir.

Geometrik Artış Metodu

Geometrik artış metodunda aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$k_g = \frac{\log N_s - \log N_i}{t_s - t_i}$$

$$\log N_g = \log N_s \times k_g (t_g - t_s)$$

Burada;

kgGeometrik Artış Katsayısı

NgGelecekteki Nüfus

NsSon Nüfus Sayımı

Niİlk Nüfus Sayımı

tgGelecekteki Nüfus Yılı

tsSon Nüfus Sayım Yılı

tiİlk Nüfus Sayım Yılı

Bu kapsamda öncelikle geometrik artış katsayıları hesap edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2 Geometrik Artış Katsayıları

İl	İlçeler	Ortalama	En Büyük	En Küçük
Diyarbakır	Bağlar	0,0064	0,0064	0,0064
	Bismil	0,0029	0,0029	0,0029
	Çınar	0,0055	0,0055	0,0055
	Ergani	0,0067	0,0067	0,0067
	Kayapınar	0,0262	0,0262	0,0262
	Sur	-0,0102	-0,0102	-0,0102
	Yenişehir	0,005	0,005	0,005
Toplam	0,0061	0,0262	-0,0102	

Artış katsayılarına göre hesap edilen gelecekteki nüfus değerleri “Nüfus Artış Metodlarının Karşılaştırılması” alt başlığı altında verilmiştir.

Bileşik Faiz Metodu

Bileşik faiz artış metodunda aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$N_s = N_i x (1 + r)^{(t_s - t_i)}$$

$$N_g = N_s x (1 + r)^{(t_g - t_s)}$$

Burada;

rArtış Katsayısı

NgGelecekteki Nüfus

NsSon Nüfus Sayımı

Niİlk Nüfus Sayımı

tgGelecekteki Nüfus Yılı

tsSon Nüfus Sayım Yılı

tiİlk Nüfus Sayım Yılı

Bu kapsamda öncelikle artış katsayıları hesap edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3 Bileşik Faiz Metodu Artış Katsayıları

İl	İlçeler	Ortalama
Diyarbakır	Bağlar	0,0148
	Bismil	0,0068
	Çınar	0,0128
	Ergani	0,0154
	Kayapınar	0,0621
	Sur	-0,0233
	Yenişehir	0,0117
	Toplam	0,0143

Ortalama artış katsayılarına göre hesap edilen gelecekteki nüfus değerleri “Nüfus Artış Metodlarının Karşılaştırılması” alt başlığı altında verilmiştir.

İller Bankası Metodu

İller Bankası artış metodunda aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$p = \left(\sqrt[t_s - t_i]{\frac{N_s}{N_i}} - 1 \right) x 100$$

$$N_g = N_s x \left(1 + \frac{p}{100} \right)^{t_g - t_s}$$

Burada;

p Artış Katsayısı

NgGelecekteki Nüfus

NsSon Nüfus Sayımı

Niİlk Nüfus Sayımı

tgGelecekteki Nüfus Yılı

tsSon Nüfus Sayım Yılı

ti İlk Nüfus Sayım Yılı

Bu kapsamda öncelikle artış katsayıları hesap edilmiştir (Tablo 4). Artış katsayısı 1’ den küçük bulunduğu takdirde nüfus artış katsayısı 1 olarak, 1 ile 3 arasında bulunduğu takdirde hesap edilen değer olarak, 3’ ten büyük bulunduğu takdirde ise 3 olarak kabul edilmektedir.

Tablo 4 İller Bankası Metodu Artış Katsayıları

İl	İlçeler	Ortalama
Diyarbakır	Bağlar	1,48
	Bismil	1
	Çınar	1,28
	Ergani	1,54
	Kayapınar	3
	Sur	1
	Yenişehir	1,17
	Toplam	1,5

Artış katsayılarına göre hesap edilen gelecekteki nüfus değerleri “Nüfus Artış Metodlarının Karşılaştırılması” alt başlığı altında verilmiştir.

Nüfus Artış Metodlarının Karşılaştırılması

Yukarıda dört farklı metoda göre nüfus projeksiyonu gerçekleştirilmiş olup sonuçları aşağıdaki grafikte toplu olarak gösterilmiştir.

Tablo 5 Nüfus Projeksiyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yıllar	Aritmetik Artış	Geometrik Artış	Bileşik Faiz	İller Bankası
2020	1.447.249 kişi	1.447.249 kişi	1.447.249 kişi	1.447.249 kişi
2021	1.472.925 kişi	1.482.093 kişi	1.482.054 kişi	1.472.964 kişi

2022	1.498.601 kişi	1.518.708 kişi	1.518.625 kişi	1.499.222 kişi
2023	1.524.277 kişi	1.557.193 kişi	1.557.063 kişi	1.526.040 kişi
2024	1.549.953 kişi	1.597.652 kişi	1.597.468 kişi	1.553.427 kişi
2025	1.575.629 kişi	1.640.193 kişi	1.639.953 kişi	1.581.401 kişi
2026	1.601.305 kişi	1.684.934 kişi	1.684.631 kişi	1.609.974 kişi
2027	1.626.981 kişi	1.732.000 kişi	1.731.627 kişi	1.639.162 kişi
2028	1.652.657 kişi	1.781.522 kişi	1.781.072 kişi	1.668.979 kişi
2029	1.678.333 kişi	1.833.640 kişi	1.833.105 kişi	1.699.444 kişi
2030	1.704.009 kişi	1.888.502 kişi	1.887.872 kişi	1.730.567 kişi
2031	1.729.685 kişi	1.946.267 kişi	1.945.535 kişi	1.762.369 kişi
2032	1.755.361 kişi	2.007.102 kişi	2.006.255 kişi	1.794.869 kişi
2033	1.781.037 kişi	2.071.183 kişi	2.070.213 kişi	1.828.080 kişi
2034	1.806.713 kişi	2.138.703 kişi	2.137.596 kişi	1.862.020 kişi
2035	1.832.389 kişi	2.209.858 kişi	2.208.602 kişi	1.896.711 kişi
2036	1.858.065 kişi	2.284.862 kişi	2.283.446 kişi	1.932.170 kişi

Tablolardan da anlaşılacağı üzere birbirine çok yakın değerlere sahip metotlar arasında İller Bankası metoduna göre hesaplanan nüfus değerleri tercih edilmiş ve atık projeksiyonu bu metoda göre hesap edilen nüfus değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Atık Projeksiyonu

Kişi Başına Düşen Katı Atık Üretim Miktarı

Türkiye İstatistik Kurumu tarafından gerçekleştirilen 2018 Yılı Belediye Atık İstatistikleri' ne göre Diyarbakır İli' nde kişi başına düşen katı atık miktarı 1,08 kg/kişi/gün olarak belirlenmiştir.

Türkiye İstatistik Kurumu tarafından 2010-2018 yılları arasında gerçekleştirilen ve söz konusu kurumun resmi internet sayfasında da yer alan Belediye Katı Atık Göstergeleri adlı çalışmada 2016 yılı için kişi başına düşen

katı atık miktarı 1,06 kg/kişi/gün 2018 yılı için kişi başına düşen katı atık miktarı ise 1,08 kg/kişi/gün olarak verilmektedir [12]. Bu değerler doğrultusunda söz konusu yıl aralığında kişi başına düşen katı atık miktarında bir önceki yıla göre bir artışın görüldüğü anlaşılmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak kişi başına düşen katı atık miktarının 2018 yılından itibaren bir önceki yıla göre %1,0095 oranında artacağı kabul edilmiştir.

Tablo 6 Kişi Başına Düşen Katı Atık Miktarı Projeksiyonu

Yıllar	Kişi Başına Düşen Katı Atık Üretim Miktarı
2018	1,080 kg/kişi/gün
2019	1,090 kg/kişi/gün
2020	1,100 kg/kişi/gün
2021	1,110 kg/kişi/gün
2022	1,121 kg/kişi/gün
2023	1,132 kg/kişi/gün
2024	1,143 kg/kişi/gün
2025	1,154 kg/kişi/gün
2026	1,165 kg/kişi/gün
2027	1,176 kg/kişi/gün
2028	1,187 kg/kişi/gün
2029	1,198 kg/kişi/gün
2030	1,209 kg/kişi/gün
2031	1,220 kg/kişi/gün
2032	1,232 kg/kişi/gün
2033	1,244 kg/kişi/gün
2034	1,256 kg/kişi/gün
2035	1,268 kg/kişi/gün
2036	1,280 kg/kişi/gün

Atık Karakterizasyonu

Diyarbakır Belediyesi tarafından 2020 yılı yaz ve kış dönemi ilçe bazında atık karakterizasyon çalışması yapılmış olup bu kapsamda Diyarbakır ili için kış ve yaz dönemi kentsel atık karakterizasyonu belirlenmiştir.

Projelendirme çalışmalarında Diyarbakır genel ortalama atık karakterizasyonu sonuçları kullanılmıştır (Tablo 7).

Tablo 7 Diyarbakır Genel Ortalama Atık Karakterizasyonu Sonuçları

Malzeme	Ortalama, %
Mutfak Atıkları	41,99
Kağıt	4,55
Karton	3,17
Hacimli Karton	2,22
Plastik	10,48
Cam	4,26
Metal	1,36
Hacimli Metal	0,29
Atık Elektrik ve Elektronik Ekipman	0,52
Tehlikeli Atık	1,31
Park ve Bahçe Atıkları	2,29
Diğer Yanamayan	12,68
Diğer Yanabilen	5,81
Diğer Yanabilen Hacimli Atıklar	0,82
Diğer Yanamayan Hacimli	0,28
Diğer	7,97
Toplam	100

Yukarıdaki tablodan da görüleceği üzere 2020 yılı atık kompozisyonunun yaklaşık %41,99' unun mutfak atıkları, %12,68' inin diğer yanamayan atıklar, %10,48' ini plastik atıklar, %5,81' inin diğer yanabilen atıklar ve %7,97' sinin diğer atıklardan oluştuğu tespit edilmiştir [13].

Projeden faydalanacak ilçe belediyeleri tarafından 2020 yılında kaynağında ayrı toplanan ambalaj atığı miktarları aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 8).

Tablo 8 2020 Yılında Kaynağında Ayrı Toplanan Ambalaj Atığı Miktarları

İlçe	Toplanan Ambalaj miktarı
Bağlar İlçesi	2.662.010 kg/yıl
Bismil İlçesi	3.562.419 kg/yıl
Çınar İlçesi	57.702 kg/yıl
Ergani İlçesi	3.960.500 kg/yıl
Kayapınar İlçesi	3.803.928 kg/yıl
Sur İlçesi	1.500.410 kg/yıl
Yenişehir İlçesi	6.720.300 kg/yıl
Toplam	20.768 ton/yıl

Yukarıdaki veriler doğrultusunda projeden faydalanacak ilçe belediyeleri tarafından 2020 yılı içerisinde kaynağında ayrı toplama faaliyetlerinde toplam 20.768 ton/yıl ambalaj atığı toplanmıştır.

Tablo 9 2020 Yılında Kaynağında Ayrı Toplanan Ambalaj Atığı Miktarları

Yıl	Nüfus (Kişi) (A)	Kişi Başına Düşen Katı Atık Üretim Miktarı (kg/kişi/gün) (B)	Atık Miktarı (ton/yıl) (C) (C=AxBX365/1000)	Ayrı Toplanan Atık Miktarı (D)	Ayrı Toplanan Atıkların Toplam Atığa Oranı (E) (E=Dx100/C)
2020	1.447.249 kişi	1,100 kg/kişi/gün	581.071 ton/yıl	20.768 ton/yıl	3,60%

Yukarıdaki tablodan da görüleceği üzere, "Tablo 6 Kişi Başına Düşen Katı Atık Miktarı Projeksiyonu" tablosunda verilen 2020 yılı kişi başına düşen katı atık üretim miktarı ile 2020 yılı TÜİK-Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları dikkate alınarak yapılan hesaplamaya göre 2020 yılında projeden faydalanacak ilçelerde oluşan toplam atık miktarı 581.071 ton/yıl olup ayrı toplama faaliyetleri ile toplanan ambalaj atıkları toplam atığın yaklaşık %3,6' sına karşılık gelmektedir [14].

Bulgular ve Tartışma

Tesis Hakkında Genel Bilgiler

Dicle Yenilenebilir Enerji tesisi, Diyarbakır İli, Bağlar İlçesi, Yukarı Akdibek Mahallesi, 543, 544, 545, 518 numaralı Parseller üzerinde toplam yaklaşık 400.864,53 m² alanda kuruludur (Şekil 6). Proje yerine en yakın yerleşim yeri; proje alanının yaklaşık 850 m güneybatısında yer alan Kamışpınar Mahallesi' ne bağlı evdir. Söz konusu mesafeler belirlenirken en yakın yerleşim yerindeki en yakın konutun proje sınırlarının en yakın noktasına olan kuş uçuşu mesafesi dikkate alınmıştır.

- İnce Kırıcı (Son Parçalama)
- Atık Biriktirme Alanı (Mekanik Ayırma Tesisi ile Ortak)
- Taşıma ve Yükleme Ekipmanı (Konveyör, vinç vb.)
- Laboratuvar

Biyometanizasyon Tesisi

Proje kapsamında kuru fermantasyon prosesi uygulanacaktır. Biyometanizasyon Tesisi prosesi aşağıda kısaca anlatılmış olup sistemde bulunacak üniteler aşağıda verilmiştir.

- Atık Kabul Birimi
- Ön Şartlandırma Ünitesi (Bunker)
- Reaktör
- Susuzlaştırma Ünitesi
- Karıştırma Sistemi
- Gaz Depolama Birimi
- Gaz Arıtma Sistemi (Elektrik Enerjisi Üretim Tesisi ve Buhar Türbininde bulunan Desülfürizasyon (H₂S Temizleme)'dir.
- Erken Uyarı Sistemi
- Fermente Ürün Deposu

II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisi

Proje kapsamında kurulacak olan II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisi'nde Mekanik Ayırma Tesisi'nden çıkacak olan bakiye atıklar, piyasaya arz edilememesi durumunda Biyometanizasyon Tesisi'nden gelecek katı fermente ürün, 26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazete' de yayımlanarak yürürlüğe giren Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik'in Geçici Madde 1.'deki hedefi sağlayacak şekilde yukarıda belirlenen oranlarda biyobozunur atık ve ATY Hazırlama Tesisi'nden çıkacak bakiye atık II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisi'nde düzenli depolama suretiyle bertaraf edilecektir.

Proje kapsamında kurulacak olan II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisi'nin kapasitesi hedef yıl olan 2036 yılındaki nüfusa göre oluşacak toplam atık üretim miktarı dikkate alınarak 1.248 ton/gün olarak belirlenmiştir. Proje kapsamında kurulacak olan Elektrik Enerjisi Üretim Tesisi'nde düzenli depolama alanı lotlarında oluşacak metan gazı ve Biyometanizasyon Tesisi'nde gerçekleşecek fermantasyon sonucu elde edilecek biyogaz yakılarak ısı ve elektrik enerjisi elde edilecektir.

Elektrik Enerjisi Üretim Tesisi ve Buhar Türbini

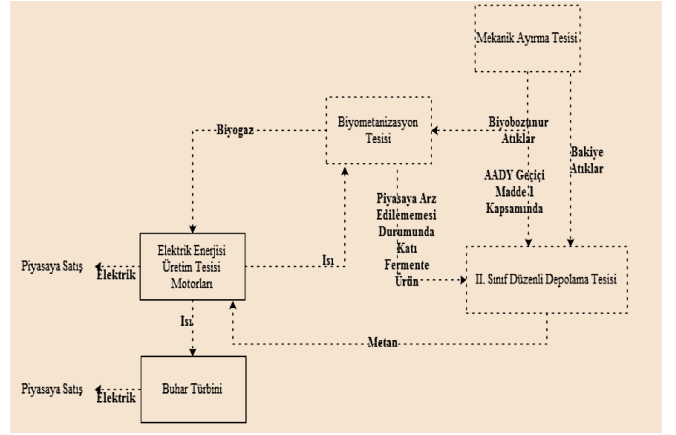
Proje kapsamında kurulacak olan Elektrik Enerjisi Üretim Tesisi ve Buhar Türbini'nin kapasitesi 14,509 MWe olarak belirlenmiştir (Şekil 10). Sistemde bulunacak üniteler aşağıda verilmiştir.



Şekil 10 Elektrik üretim tesisi

- Gaz Depolama
- Desülfürizasyon (H₂S Temizleme)
- Enerji Tesisi
- Flare (Gaz Yakma Bacası)
- Booster Ünitesi
- Gaz Motoru
- Buhar Türbini

Elektrik enerji üretimi iş akış şeması Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11 Elektrik enerjisi üretimi iş akış şeması

Tekerlek Yıkama Ünitesi

Atık taşıma araçları sahayı terk ederken bu üniteden geçecektir. Bu ünite için ayrılan 90 m²'lik alanda yol kotu da dikkate alınarak saha düzenlemesi yapılarak bir platform teşkil edilecektir. Tekerlek yıkama ünitesinin üstünde duracak atık taşıtının tekerlekleri, görevli tarafından kullanılacak manüel bir basınçlı yıkama makinesi sayesinde temizlenecektir. Yıkama makinesi, sıcak-soğuk su ve deterjan püskürtme düzenekli olacaktır. Tekerlek yıkama ünitesinde atık taşıtlarının sadece tekerlekleri yıkanacaktır.

Tekerlek Yıkama Ünitesinde ortaya çıkacak atıksu, sızıntı suyu dengeleme havuzuna bağlanacaktır. Tekerlek Yıkama Ünitesinde gerekli su proje alanı içerisinde yer alan yeraltı suyundan temin edilecektir.

Kalite Kontrol Ünitesi (Yarı Otomatik Sistem)

Tesiste atıklar mekanik ekipmanlar vasıtasıyla tam otomatik sistemde boyutlarına, şekillerine göre ayrıldıktan

sonra yarı otomatik kısımda geri kazanımı mümkün atıkların 2D Kalite Kontrol Platformu ve 3D Kalite Kontrol Platformunda görevli personellerce cinslerine göre ayrıştırılması sağlanacaktır.

Atık Biriktirme Alanı

Mekanik Ayırma Tesisi'nden çıkan geri kazanımı/geri dönüşümü mümkün atıklar ve ATY Hazırlama Tesisi'nden çıkan ATY malzemesi için atık biriktirme alanı oluşturulacaktır (Şekil 12).

Mekanik Ayırma Tesisi'nden plastik, cam ve metal olmak üzere 3 tür geri kazanımı/geri dönüşümü mümkün atıklar ayrılacak ve atık biriktirme alanında lisanslı firmalara gönderilmek üzere biriktirilecektir.



Şekil 12 Atık biriktirme alanı

Mekanik ayırma tesisinde ayrıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra elde edilecek bakiye atık ve biyobozunur atık bantların altında sürekli bulunacak ayrı konteynırlarda biriktirilecek ve ilgili tesislere yönlendirilecektir.

Tablo 10 Mekanik Ayırma Tesisine Gelen Atıkların Dağılımı

Yıllar	Mekanik Ayırma Tesisine Gelen Toplam Atık Miktarı (A)	Biyobozunur Atık Oranı (C) (%)	Biyobozunur Atık Miktarı (D) (D=A x C)	Düzenli Depolama Alanı'na Gidecek Biyobozunur Atık Miktarı (E)	Biyometani zasyon Tesisine Gidecek Biyobozunur Atık Miktarı (F) (F=D-E)
2022	588.891 ton/yıl	46,1252 %	271.627 ton/yıl	243.162 ton/yıl	28.465 ton/yıl
2023	605.309 ton/yıl	46,1249 %	279.198 ton/yıl	249.941 ton/yıl	29.257 ton/yıl
2024	622.159 ton/yıl	46,1250 %	286.971 ton/yıl	256.901 ton/yıl	30.070 ton/yıl

2025	632.797 ton/yıl	46,6105 %	294.950 ton/yıl	228.072 ton/yıl	66.878 ton/yıl
2026	650.372 ton/yıl	46,6104 %	303.141 ton/yıl	234.407 ton/yıl	68.734 ton/yıl
2027	661.378 ton/yıl	47,1063 %	311.551 ton/yıl	203.618 ton/yıl	107.933 ton/yıl
2028	679.708 ton/yıl	47,1063 %	320.185 ton/yıl	209.264 ton/yıl	110.921 ton/yıl
2029	691.098 ton/yıl	47,6128 %	329.051 ton/yıl	210.970 ton/yıl	118.081 ton/yıl
2030	710.217 ton/yıl	47,6129 %	338.155 ton/yıl	181.296 ton/yıl	156.860 ton/yıl
2031	722.000 ton/yıl	48,1305 %	347.502 ton/yıl	182.382 ton/yıl	165.120 ton/yıl
2032	742.547 ton/yıl	48,1302 %	357.389 ton/yıl	187.574 ton/yıl	169.816 ton/yıl
2033	755.355 ton/yıl	48,6594 %	367.551 ton/yıl	150.988 ton/yıl	216.563 ton/yıl
2034	768.262 ton/yıl	49,1999 %	377.984 ton/yıl	151.434 ton/yıl	226.550 ton/yıl
2035	781.275 ton/yıl	49,7529 %	388.707 ton/yıl	105.684 ton/yıl	283.023 ton/yıl
2036	794.385 ton/yıl	50,3183 %	399.721 ton/yıl	105.149 ton/yıl	294.572 ton/yıl

Tablo 11 Mekanik Ayırma Tesisine Gelen Atıkların Dağılımı

Yıllar	Mekanik Ayırma Tesisine Gelen Toplam Atık Miktarı (A)	Biyobozunur Atık Oranı (C) (%)	Biyobozunur Atık Miktarı (D) (D=A x C)
2022	588.891 ton/yıl	21,8022%	128.391 ton/yıl
2023	605.309 ton/yıl	21,8023%	131.971 ton/yıl
2024	622.159 ton/yıl	21,8018%	135.642 ton/yıl
2025	632.797 ton/yıl	22,0319%	139.417 ton/yıl
2026	650.372 ton/yıl	22,0315%	143.287 ton/yıl
2027	661.378 ton/yıl	22,2662%	147.264 ton/yıl
2028	679.708 ton/yıl	22,2659%	151.343 ton/yıl
2029	691.098 ton/yıl	22,5053%	155.534 ton/yıl
2030	710.217 ton/yıl	22,5055%	159.838 ton/yıl
2031	722.000 ton/yıl	22,7501%	164.256 ton/yıl

2032	742.547 ton/yıl	22,7499%	168.929 ton/yıl
2033	755.355 ton/yıl	22,9999%	173.731 ton/yıl
2034	768.262 ton/yıl	23,2553%	178.662 ton/yıl
2035	781.275 ton/yıl	23,5168%	183.731 ton/yıl
2036	794.385 ton/yıl	23,7841%	188.937 ton/yıl

Enerji Üretim Projeksiyonu

2022 ve 2036 yılı vahşi depolama sahasında enerji üretimi

Vahşi depolama sahasında yapılan ölçümlerde ortalama CH₄ oranı %50 olarak bulunmuştur. Bu orana karşılık gelen 120 tonluk katı atık için 0.90 MWe enerji üretimi kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır.

2022 yılı mekanik ayrıştırma tesisine gelen atık miktarı ortalama 588.891 ton/yıldır.

2022 yılı enerji üretimi: $588891 \times 0,90 / 120 = 4416,68$ MWe

2036 yılı enerji üretimi: $794385 \times 0,90 / 120 = 5957,88$ MWe olarak elde edilmiştir.

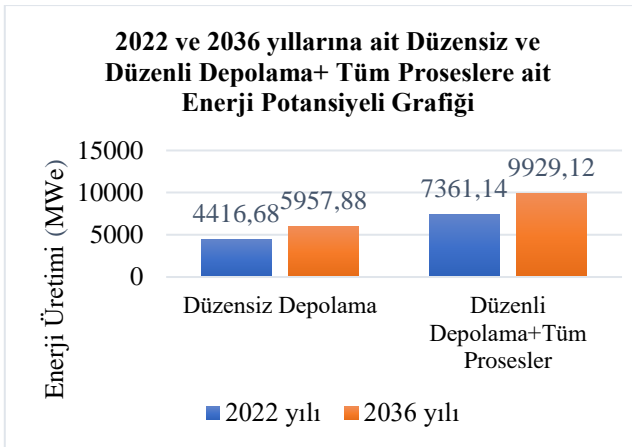
2022 ve 2036 yılı düzenli depolama sahası ve biyometanizasyon, mekanik ayrıştırma ünitelerinin faaliyete geçmesiyle yapılacak enerji üretimi

Tesisin tüm ünitelerinin faaliyete geçirilmesi ve düzenli depolama yapılması ile birlikte katı atık kalitesi ile organik atık oranının artırılacağı öngörülmektedir. Bu çalışmada tesisin fizibilite raporuna göre ortalama CH₄ oranının %85 olacağı öngörülmektedir. Bu orana karşılık gelen 120 tonluk katı atık için 1,50 MWe enerji üretimi kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır.

2022 yılı mekanik ayrıştırma tesisine gelen atık miktarı ortalama 588.891 ton/yıldır.

2022 yılı enerji üretimi: $588891 \times 1,5 / 120 = 7361,14$ MWe

2036 yılı enerji üretimi: $794385 \times 1,5 / 120 = 9929,12$ MWe olarak elde edilmiştir.



Enerji Artış Oranı

Tesisin çalıştırılma şartlarına bağlı olarak enerji üretimi Diyarbakır ilinin nüfus projeksiyonuna göre hesaplanarak elde edilmiştir.

Enerji verimliliği oranı: 2022 yılı tesisin tam kapasite çalışmasıyla elde edilen enerji miktarı / vahşi depolamadan elde edilen enerji miktarı= %66 olarak hesaplanmıştır.

Enerji verimliliği oranı: 2036 yılı tesisin tam kapasite çalışmasıyla elde edilen enerji miktarı / vahşi depolamadan elde edilen enerji miktarı= %66 olarak hesaplanmıştır.

Tesisin tüm proseslerinin faaliyete geçmesiyle birlikte, biyogaz üretiminde önemli bir artış gözlemlenmiş ve bu durum tesisin enerji potansiyelinin yüzde oran olarak anlamlı bir şekilde yükseldiğini göstermiştir.

Sonuçlar

Hızlı nüfus artışı, sanayileşme ve kentsel gelişim gibi faktörler, atık oluşumunu doğrudan etkileyen önemli değişkenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Atık yönetimi, sadece atıkların bertaraf edilmesi değil, aynı zamanda atıklardan enerji elde edilmesi gibi ekonomik faydalar da sağlayan bir süreçtir. Bu nedenle, atık yönetimi sistemleri hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda tasarlanmalıdır.

Bu çalışmada Diyarbakır ili katı atık depolama sahasındaki biyogaz tesisinin enerji potansiyeli, gelecekteki nüfus projeksiyonlarına göre oluşan katı atık miktarı hesaplanarak değerlendirilmiştir. Biyogaz tesisinin düzensiz (vahşi) depolama ile çalıştırılması durumunda; 2022 yılı nüfus verilerine dayalı olarak yapılan hesaplamalar sonucunda, yıllık 588.891 ton katı atıktan **4416,68 MWe** enerji potansiyeli elde edilmiştir. 2036 yılı nüfus projeksiyonu dikkate alındığında ise bu potansiyel, yıllık 794.385 ton katı atık için **5957,88 MWe**'ye yükselmektedir.

Ayrıca tesisin tüm proseslerinin (düzenli depolama, mekanik ayrıştırma, biyometanizasyon ünitesi vb) faaliyete geçirilmesiyle; 2022 yılı nüfus verilerine dayalı olarak yapılan hesaplamalar sonucunda, yıllık 588891 ton katı atıktan **7361,14 MWe** enerji potansiyeli elde edilmiştir. 2036 yılı nüfus projeksiyonu dikkate alındığında ise bu potansiyel, yıllık 794385 ton katı atık için **9929,12 MWe**'ye yükselmektedir.

Çalışmada, düzensiz depolama ve entegre atık yönetim sistemi senaryoları altında, gelecekteki nüfus projeksiyonlarına göre elde edilecek katı atık miktarından üretilebilecek enerji potansiyeli, biyometanizasyon, mekanik ayrıştırma ve düzenli depolama gibi farklı proseslerin de dahil edilmesiyle hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Bu karşılaştırma sonucunda 2022 ve 2036 yıllarına ait hesaplamalarda %66'lık enerji potansiyeli artış oranı belirlenmiştir.

Bu araştırma, biyogaz tesislerinin planlanması sürecinde, yük talebi, güvenilirlik ve mevcut kaynakların

değerlendirilmesi gibi faktörlerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Elde edilen sonuçlar, biyogaz tesislerinin enerji üretimi açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Biyogaz tesislerinin tasarımı ve kurulumu, kapsamlı bir fizibilite çalışması gerektirir. Bu çalışmada elde edilen veriler mevcut kaynakların potansiyelleri değerlendirilerek, tesislerin tüm proseslerinin faaliyete geçmesinin önemini ortaya çıkarmaktadır.

Çöp sahasında atmosfere salınan metan gazı, elektrik enerjisi üretiminde kullanıldığı için, bu da 2022 yılı için yaklaşık olarak 10-11 milyon ağaçlık bir ormanın CO₂ bertarafına denk gelmektedir. 2036 yılı için hesaplanan

metan gazı miktarına göre ise 13-14 milyon ağaçlık bir ormanın CO₂ bertarafına denk gelmektedir. Ayrıca Diyarbakır Entegre Katı Atık Bertaraf ve Düzenli Depolama Tesisi' nin faaliyeti ile birlikte hem çevresel hem de ekonomik olumlu katkılar sağlayacağı ifade edilebilmektedir.

Diyarbakır Entegre Katı Atık Bertaraf ve Düzenli Depolama Tesisi'nde sıfır atık sistemine geçişle birlikte, düzenli depolama, mekanik ayrıştırma ve biyometanizasyon gibi ünitelerin faaliyete geçirilmesiyle enerji üretiminin artacağı görülmektedir.

Kaynakça

- [1] Ö. Aydoğan, G. Varank ve M. S. Bilgili, «Gaziantep İl Merkezi Kentsel Katı Atık Yönetimi,» *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, cilt 3, no. 1, pp. 268-275, 2011.
- [2] A. YILMAZ ve Y. BOZKURT, «TÜRKİYE'DE KENTSEL KATI ATIK YÖNETİMİ UYGULAMALARI VE KÜTAHYA KATI ATIK BİRLİĞİ (KÜKAB) ÖRNEĞİ,» *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 15, no. 1, pp. 11-28, 01 Mart 2010.
- [3] H. Gülşen, . A. Akkuş, . A. Yolun ve M. Aslan, «Adıyaman İlinin Katı Atıkların Elektrik Potansiyelinin Belirlenmesi,» *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 3, no. 25, pp. 173-182, 03 Eylül 2022.
- [4] J. GÜLEN ve Ç. ÇEŞMELİ, «Biyogaz Hakkında Genel Bilgi ve Yan Ürünlerinin Kullanım Alanları,» *EÜFBED- Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt 5, no. 1, pp. 65-84, 2012.
- [5] K. O. Demirarslan ve D. Demirarslan, «Kentlerde Yeni Yerleşim Alanlarının Gelişimi ve Katı Atık Sorunu: İzmit- Yahyakaptan Mahallesi Örneği,» *Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, cilt 2, no. 2, pp. 108-120, 2016.
- [6] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, «Resmi İklim İstatistikleri,» 2024. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=DIYARBAKIR>.
- [7] Ş. Yıldız, F. Saltabaş, V. Balahorli, K. Sezer ve K. Yağmur, «Organik Atıklardan Biyogaz Üretimi (Biyometanizasyon) Projesi – İstanbul Örneği,» %1 içinde *Türkiye'de Katı Atık Sempozyumu*, İstanbul, 2009.
- [8] M. ŞEN ve K. Kestioğlu, «Kırsal Belediyelerde Eysel Katı Atıkların Geri Kazanımı ve Ekonomik Analizi: Mustafakemalpaşa İlçesi/Bursa Örneği,» *Ekoloji Dergisi*, cilt 16, no. 65, 2007.
- [9] Aile ve Tüketici Hizmetleri, «Katı Atıklar,» Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [10] M. Karpuzcu, «Nüfus tahmin Metodları,» %1 içinde *Su Temini ve Çevre Sağlığı*, İstanbul, Kubbalı Dizgi Merkezi, 2005, pp. 27-32.
- [11] İller Bankası, «İÇMESUYU TESİSLERİ ETÜT, FİZİBİLİTE VE PROJELERİNİN HAZIRLANMASINA AİT TEKNİK ŞARTNAME,» İller Bankası Anonim Şirketi, Ankara, 2013.
- [12] Türkiye İstatistik Kurumu, «Belediye Atık İstatistikleri Veri Tabanı,» 2020.
- [13] T.C. DİYARBAKIR VALİLİĞİ ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İL MÜDÜRLÜĞÜ, «DİYARBAKIR İLİ 2020 YILI ÇEVRE DURUM RAPORU,» Diyarbakır Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Diyarbakır, 2021.
- [14] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, «Entegre Katı Atık Bertaraf ve Düzenli Depolama Tesisi (Mekanik Ayırma Tesisi, Yakıttan Türetilmiş Yakıt Hazırlama Tesisi, Biyometanizasyon Tesisi, II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisi ve Elektrik Enerjisi Üretim Tesisi ve Buhar Türbini ÇED Raporu,» Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, Diyarbakır, 2022.



Nevşehir taşı tozunun kendiliğinden yerleşen harçlarda portland çimentosu ikamesi olarak değerlendirilmesi: erken yaşta mukavemet ve reoloji

Evaluation of Nevşehir stone powder as a portland cement substitute in self-compacting mortars: early-age strength and rheology

Mustafa DEMİR¹, Merve ŞAHİN YÖN^{2*}, Mehmet KARATAŞ³

¹ Fırat University, Institute of Science, mustafademir3@tcdd.gov.tr, Orcid No: 0009-0007-6238-4547

² Munzur University, Civil Engineering Department, mervesahinyon@munzur.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-2954-0003

³ Munzur University, Civil Engineering Department, mehmetkaratas@munzur.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-3705-8463

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi

Geliş: 8 Kasım 2024
Revizyon: 5 Ocak 2025
Kabul: 20 Ocak 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler

*Kendiliğinden yerleşen harç,
Nevşehir taşı tozu, taze ve
sertleşmiş özellikler, erken dayanım*

ÖZ

Portland çimentosunun üretimi atmosferdeki karbondioksit emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, Portland çimentosu yerine puzolanik özelliklere sahip doğal kaynakların ve atıkların kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Bu makalede, kendiliğinden yerleşen harç yapımında Portland çimentosunun yerine kullanılacak doğal olarak oluşan puzolanik bir malzeme olan Nevşehir taşı tozunun etkinliği incelenmiştir. Portland çimentosu yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında Nevşehir taşı tozu ilave edilerek hazırlanan harcın performansının değerlendirilmesi amacıyla bir laboratuvar çalışması yapılmıştır. Karışımların başlangıçtaki mekanik performansını incelemek için 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Harçların yayılma çapları Avrupa İnşaat Kimyasalları ve Beton Sistemleri İhtisas Federasyonu standardı referans alınarak belirlenmiştir. Seçilen oranlarda Nevşehir taşı tozu ile oluşturulan numuneler, 23±2 °C sıcaklıktaki suya 3 gün süreyle daldırılmıştır. Kür süresi dolan numunelere erken yaş eğilme ve basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Deneysel analiz, en yüksek basınç dayanımlarının referans numunelerde ve Nevşehir taşı tozu ile %5 oranında çimento ikamesi içeren kombinasyonlarda görüldüğünü ortaya koymuştur. Ancak Nevşehir taş tozu miktarındaki artışla erken basınç dayanımında azalma olmuştur. Bu azalmalar sırasıyla NP5, NP10, NP15 ve NP20 serilerinde yaklaşık %1,3, %5,6, %15,7 ve %25,7'dir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 8 November 2024
Revised: 5 January 2025
Accepted: 20 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

*Self-compacting mortar, Nevşehir
stone powder, fresh and hardened
properties, early strength*

ABSTRACT

The manufacturing of Portland cement is contributing to a rise in atmospheric carbon dioxide emissions. Consequently, the utilization of natural resources and waste materials possessing pozzolanic qualities in lieu of Portland cement has become imperative. This article examines the efficacy of Nevşehir stone dust, a naturally occurring pozzolanic material, as a substitute for Portland cement in the manufacturing of self-compacting mortar. A laboratory study was performed to assess the efficacy of mortar formulated with 5%, 10%, 15%, and 20% Nevşehir stone powder as a substitute for Portland cement. Prismatic specimens of 40x40x160 mm were utilized to assess the initial mechanical properties of the mixtures. The spread widths of mortars have been established according to the standards set by the European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. Samples formulated with specified ratios of Nevşehir stone powder were submerged in water at a temperature of 23±2 °C for a duration of 3 days. Early age flexural and compressive strength tests were applied to the samples whose curing period had expired. The experimental analysis revealed that the highest compressive strengths were seen in the reference samples and in the combinations with a 5% substitution of cement with Nevşehir stone dust. However, with the increase in the amount of Nevşehir stone dust, there was a decrease in compressive strength. These decreases are approximately 1.3%, 5.6%, 15.7% and 25.7% in the NP5, NP10, NP15 and NP20 series, respectively.

Doi: 10.24012/dumf.1581298

* Sorumlu Yazar

1. Introduction

Concrete, composed primarily of cement, is unarguably one of the most widely used construction materials [1], [2]. Cement is the predominant binding agent in both reinforced and unreinforced concrete. The global production of ordinary Portland cement (PC) increases about 9% annually [3]. The increasing rate poses a significant environmental danger due to the substantial carbon dioxide emissions generated during cement production [4]. The cement manufacturing sector is predicted to generate approximately 1.5 billion tons of greenhouse gases yearly, or roughly 6% of global greenhouse gas emissions [5], [6]. Consequently, researchers have advocated for the development of methods to utilize other materials, agricultural and industrial wastes, or by-products in place of PC, due to the depletion of natural resources and the pressing necessity for their conservation [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Numerous studies have been undertaken about the application of pumice and volcanic ash (VA) in concrete and cement manufacturing [14], [15], [16]. Alqarni conducted a comprehensive literature analysis on the concrete qualities, including workability, compressive strength, flexural strength, split tensile strength, and durability performance of volcanic pumice powder ash (VPPA). The findings revealed that the use of VPPA with partial substitution diminishes workability and compressive strength, but enhancements in flexural and split tensile strength, as well as durability characteristics, are reported [17]. The study by Al-Zboon and Al-Zou'b analyzes the impact of Jordanian volcanic tuff aggregates on the characteristics of cement mortar. Tests for compressive strength, flexural strength, and unit weight were conducted at 3, 7, 28, and 56 days on five mortar mixtures utilizing volcanic tuff aggregate in place of conventional aggregate at proportions of 0, 25, 50, 75, and 100%. The results indicated that the compressive and flexural strength were highest for M3. The unit weight diminished with an increase in the volcanic tuff ratio [18]. The study by Arı attempted to ascertain the impact of stone dust grain size in composite mortar mixtures, utilized for the restoration of historical buildings constructed with Nevşehir stones, on strength. The study concluded that the composite mortar formulated with particles sized between 150-250 μm significantly enhanced the strength and surface contact angle of Nevşehir stone [19]. This research aims to investigate the changes in workability and viscosity properties resulting from the incorporation of natural pozzolans into self-compacting mortars (SCMs). For this purpose, a natural pozzolan, volcanic minerals such as Nevşehir stone dust (NP), which is abundantly found in Cappadocia region of Turkey, was used in the experimental study by substituting from 5% to 20% with cement due to its binding properties. As a result of the study, the effects of varying the ratios of NP instead of Portland cement in SCM formulation on early age flexural and compressive strengths of mortar, viscosity, workability and water consumption were investigated.

2. Materials and methods

2.1. Used materials

For this experimental work, type CEM I 42.5 ordinary PC conforming to TS EN 197-1 [20] standards were utilized. NP was utilized in conjunction with cement as a binding agent in the fabrication of SCM. Also, NP, composed of volcanic lava, is a type of volcanic tuff endemic to Cappadocia and its vicinity. The chemical components and physical characteristics of these powders are presented in Table 1. When Table 1 is examined, it can be said that Nevşehir stone has a strong pozzolanic potential. Because SiO_2 combines with calcium hydroxide to form calcium silicate hydrate (C-S-H), which increases the strength of the concrete. In addition, Al_2O_3 forms calcium aluminate hydrates, especially in the presence of water. This contributes to the increase in the strength of the mortar. The local natural river sand was used as fine aggregate with a nominal maximum size of 4 mm, specific gravity of 2.63, and water absorption of 1.91%. The aggregate gradation, illustrated in Figure 1. A liquid superplasticizer (SP) based on polycarboxylate, namely Sika Viscocrete SF 18, was utilized, possessing a specific gravity of 1.07. Figure 2 illustrates the aggregate and binder materials utilized for study.

Table 1. Chemical and physical properties of PC and NP.

Items (%)	PC	NP
SiO_2	18.90	71.42
Al_2O_3	4.36	18.07
Fe_2O_3	3.25	2.79
CaO	63.36	1.98
MgO	2.19	0.44
SO_3	3.29	0.03
Na_2O	0.40	0.1
K_2O	0.66	4.55
LOI	3.5	20.31
Specific gravity	3.1	2.61

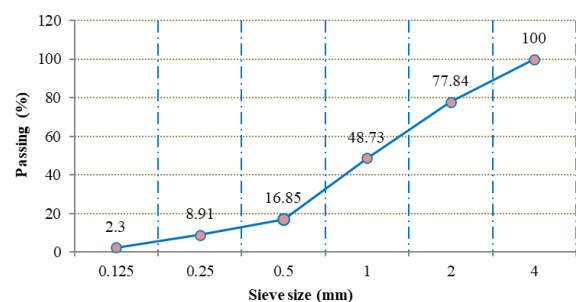


Figure 1. Particle size distribution of river sand.



Figure 2. Dry ingredients a) NP, b) PC, c) sand.

2.2. Mixes proportions

A reference mixture and four mixtures have been designed to assess the fresh and hardened characteristics of SCMs generated by replacing NP with varying quantities of PC. Table 2 shows the SCM ingredient compositions. The weight-based substitution rates were set at 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The substitution of NP with cement as the pozzolanic material was made based on the substitution rates of different pozzolanic materials found in the literature [9], [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Following multiple trial mixtures, the water/binder (W/B) ratios were determined to be 0.42, 0.42, 0.41, 0.41, and 0.41 for control, NP5, NP10, NP15, and NP20, respectively. For reference mixes, NP5, NP10, NP15, and NP20, the binder amounts in the produced mixtures were 600, 570, 540, 510, and 480 kg/m³, respectively. The SP quantity was maintained constant and was chosen at 8 kg/m³. All mix designs, as illustrated in Table 2.

Table 2. Design specifications of the mixes (kg/m³)

ID	PC	NP	Sand	SP	W/B
Control	600	0	1417.51	8	0.42
NP5	570	30	1412.73	8	0.42
NP10	540	60	1421.11	8	0.41
NP15	510	90	1416.32	8	0.41
NP20	480	120	1411.54	8	0.41

2.3. Testing methods

The filling ability characteristics of SCMs were assessed by measuring slump flow diameter in accordance with the rules and requirements established by the European Federation of National Associations Representing Concrete (EFNARC) [27]. The filling capacity of mortar is defined as its ability to conform to the shape of the mold in which it is cast, solely under its own weight, especially in regions where barriers may impede its flow [28]. As shown in Figure 3, viscosity tests and the mini-slump flow test were used to assess the workability and fluidity characteristics of fresh mortars. The viscometer test is a technique employed to assess the fluidity of mortar. Assessing the workability and plastic characteristics of concrete/mortar is essential [29]. The combined mortar was put into a beaker for measurement using the Brookfield DVE viscosity device. It was measured how the mortar in the container changed its torsional moment when the shaft at the end of the gadget turned. The rheological qualities were assessed by measuring the rotational speed of the shaft between 1.0-100 rpm (increasing shear rate-shear stress) and 100-1.0 rpm (decreasing shear rate-shear stress) [30].

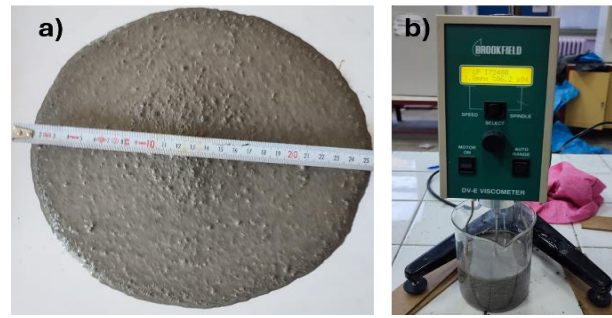


Figure 3. a) Dispersion diameter, b) viscometer test apparatus

Mechanical strength tests were performed on three 40x40x160 mm prismatic specimens at 3 days of age. The samples were removed from the molds after 24 hours and subsequently cured in lime-saturated water at a temperature of 23 °C. As required by ASTM C348 [31] the mortars were put through a 3-day flexural strength test (Figure 4). Using the ASTM C349 [32] standard, the compression strength of each piece split in half under a loading speed of 2.4 kN/s was found after the flexural test.



Figure 4. Flexural strength test

3. Results

3.1. Fresh mortar properties

Slump flow was used to test the features of fresh SCMs that contained NP and PC. The Figure 5 illustrates the water consumption of the combinations necessary to attain a slump flow diameter of 240 ± 20 mm. The spreading diameter of the combination with 10% NP is identical to that of the control sample, whereas the slump values and water requirements of the mixtures with 15% NP and 20% NP are same.

The primary characteristic of SCMs is enough fluidity and resistance to segregation [33]. For these properties to be achieved in SCMs, sufficient viscosity, low shear stress, and cohesion are essential. The viscosity test of mortars including NP was conducted to assess their consistency and workability characteristics (Figure 6). This diagram shows that the viscosity of the samples decreases asymptotically as the angular speed of the spindle increases [9]. At the first two rotational speeds, the viscosity of the NP5 samples was lower than that of the control mixtures but superior to the other three

mixtures. With the increase in rotational speed, the viscosity decreased in all samples, while high nanoparticle (NP) concentrations resulted in lower viscosity values compared to the control mixtures. The NP20 mixture showed the minimum viscosity at 100 RPM, while the control mixture showed the maximum viscosity at the lowest RPM. This indicates that the high NP content reduces the viscosity especially at increasing shear rates, and the improved flow behavior and shear thinning properties for the NP-substituted mixtures.

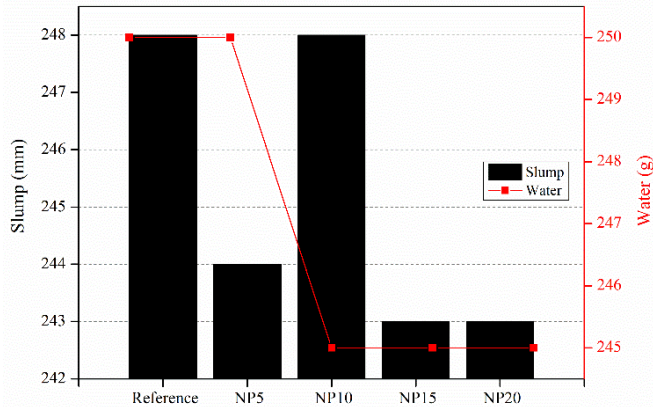


Figure 5. Slump flow diameter and water demands.

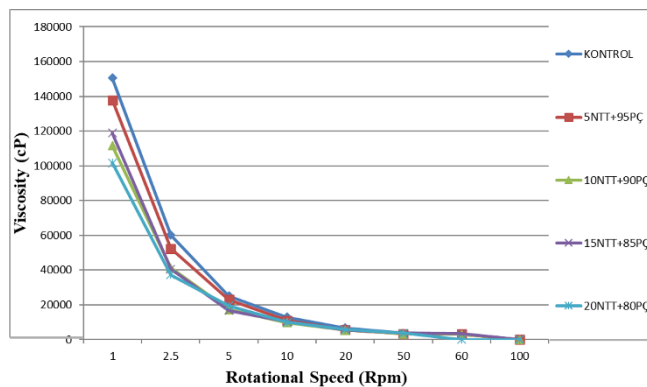


Figure 6. Viscosity test results.

3.2. Flexural and compressive strength

Figure 7 shows how NP changed the flexural strength of samples that were made into prisms over the course of three days. The incorporation of 5% NP enhanced the flexural strength relative to the reference samples. The incorporation of 5%, 10%, 15%, and 20% NP enhanced the early-age flexural strength relative to the reference samples. Comparing the 3-day flexural strengths of the control sample with those containing 5% NP, 10% NP, 15% NP, and 20% NP revealed increases of around 7%, 3.6%, 3.9%, and 6.4%, respectively. The 3-day flexural strength of the series containing NP surpassed that of the control sample, correlating with the increased NP ratio. Increasing the flexural strength of the mortar will provide advantages in creating longer-lasting elements, shortening the manufacturing process and against environmental conditions (e.g. freeze-thaw and humidity effects).

The compressive strengths of SCMs at 3 days are illustrated in Figure 8. The figure indicates that, relative to the reference mixtures, the 3-day compressive strength diminishes when the NP ratio escalates. These decreases are approximately 1.3%, 5.6%, 15.7% and 25.7% in the NP5, NP10, NP15 and NP20 series, respectively. Volcanic tuff contains minerals such as silica and aluminum oxide. These minerals cause changes in the microstructure by participating in the hydration reactions of the cement. Thus, they form components that provide lower early strength. This condition parallels the findings of the researchers [18].

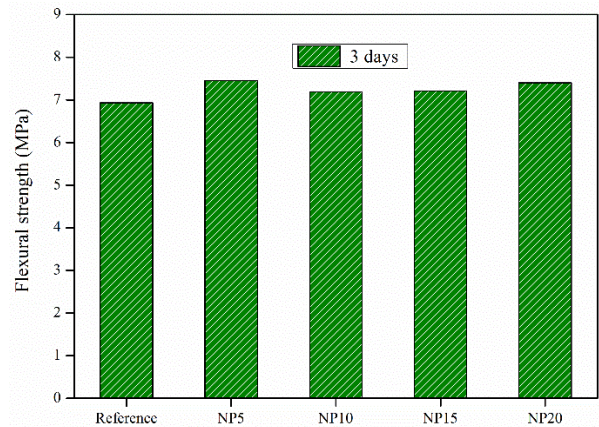


Figure 7. Flexural strength test results

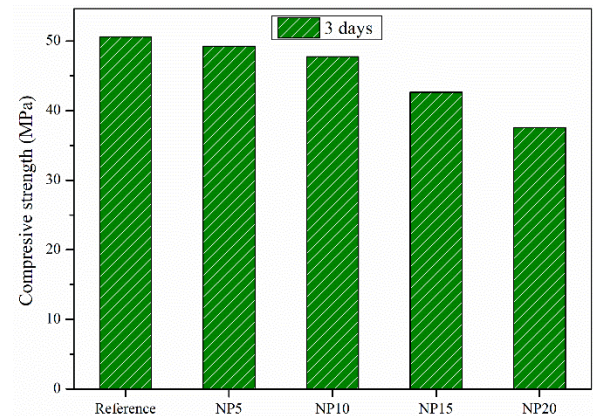


Figure 8. Compressive strength test results.

4. Conclusion

The experimental investigation examined the early age strength, workability and viscosity properties of self-compacting mortars (SCMs) including Nevşehir stone powder (NP) and Portland cement (PC). The results obtained are itemized below.

- The slump flow test results reveal that the combination with 10% NP demonstrated a spreading diameter akin to the control sample, whereas the mixtures with 15% and 20% NP exhibited comparable water demands and slump values. This indicates that the inclusion of NP up to 10% does not substantially affect fluidity relative to the control; however, elevating NP content to 15%

or greater necessitates increased water consumption to maintain equivalent workability.

- The results indicated that when the rotating speed rose, the viscosity measurements for all mixes diminished. At reduced rotation speeds, the NP5 mixture demonstrated lower viscosity compared to the control; nevertheless, as rotation speed escalated, the control blend displayed greater viscosity values than other NP-modified blends. The rising NP proportion resulted in a further reduction in viscosity, with the minimum viscosity recorded in the NP20 mix at elevated speeds, whereas the control blend exhibited the maximum viscosity at low rotating speeds.
- The data indicate that increased NP content in SCMs can decrease viscosity and enhance workability. However it may necessitate more water to achieve the appropriate slump flow rates. The diminished viscosity, especially at elevated NP concentrations, signifies improved fluidity, rendering NP an effective additive for enhancing the rheological characteristics of new mortars, while adequately preserving resistance to segregation.
- The experimental findings indicate that the integration of NP into SCMs enhances early-age flexural strength while adversely affecting compressive strength. The incorporation of 5% NP enhanced the flexural strength by roughly 7% relative to the control sample. These data indicate that NP positively influences early-age flexural performance, augmenting strength with increased NP ratios.

References

- [1] Amin, B. A. Tayeh, and I. S. Agwa, "Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete," *Journal of Cleaner Production*, 273, 123073 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123073.
- [2] I. S. Agwa, O. M. Omar, B. A. Tayeh, and B. A. Abdelsalam, "Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, 235, 117541, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117541.
- [3] B. A. Tayeh, M. W. Hasaniyah, A. M. Zeyad, and M. O. Yusuf, "Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review," *Journal of Cleaner Production*, 10, 117723, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117723.
- [4] C.-S. Engineering Research Centre, "Effect of molarity in geopolymer concrete", doi: 10.6088/ijcser.201304020011.
- [5] B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and A. Alaskar, "Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: A critical review", *Journal of Cleaner Production*, 20, 127734, 2021, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127734.

- Nevertheless, an analysis of the compressive strength at 3 days reveals a decline corresponding to a rise in NP content. The reduction in compressive strength with a larger fraction of NP aligns with prior research, suggesting that although NP improves flexural performance, it may diminish early compressive strength. Consequently, whereas NP demonstrates potential for enhancing flexural strength, its impact on compressive strength requires meticulous evaluation, especially in scenarios where early-age compressive strength is paramount.

5. Recommendations for future research

In future studies, the use of Nevşehir Stone powder in geopolymer mortars can be examined. In addition, in studies to be carried out as a substitute for cement, durability properties can be evaluated in more detail. Also, microstructure of samples can be assessed.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

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

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

Authors' Contributions

Demir M: Experimental Study, data collection

Yön Şahin M: Analysis and interpretation of data, preparation of draft, Revision

Karataş M: Conceptual design and Revision

[6] G. L. Golewski, "Green concrete based on quaternary binders with significant reduced of CO₂ missions," *Energies (Basel)*, 14 (15), 2021, doi: 10.3390/en14154558.

[7] M. Şahin Yön and M. Karataş, "Resistance to magnesium sulphate attack of binary and ternary cementless self-compacting alkali-activated mortar," *Journal of Building Engineering*, 95, 109988, 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.109988.

[8] M. Ş. Yön, B. Yön, M. Karataş, and A. Benli, "Sustainable use of boron waste and volcanic scoria in slag-based self-compacting alkali-activated mortars: fresh, mechanical and durability properties," *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 41, 101664, 2024, doi: 10.1016/j.scp.2024.101664.

[9] M. Ş. Yön, F. Arslan, M. Karatas, and A. Benli, "High-temperature and abrasion resistance of self-compacting mortars incorporating binary and ternary blends of silica fume and slag," *Construction and Building Materials*, 355, 129244, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129244.

[10] M. Mohabbi Yadollahi and M. Dener, "Investigation of elevated temperature on compressive strength and microstructure of alkali activated slag-based cements," *European Journal of Environmental and Civil*

- Engineering*, 25(5), 924-938, 2021, doi: 10.1080/19648189.2018.1557562.
- [11] M. Dener, M. Karatas, and M. Mohabbi, "High temperature resistance of self-compacting alkali activated slag/portland cement composite using lightweight aggregate," *Construction and Building Materials*, 290, 123250, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123250.
- [12] M. Dener, M. Karatas, and M. Mohabbi, "Sulfate resistance of alkali-activated slag/Portland cement mortar produced with lightweight pumice aggregate," *Construction and Building Materials*, 304, 124671, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124671.
- [13] E. Türk, M. Karataş, and M. Dener, "Rheological, mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing basalt powder and silica fume," *Construction and Building Materials*, 356, 129229, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129229.
- [14] A. M. Zeyad, A. H. Khan, and B. A. Tayeh, "Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers," *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (1), 806-813, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.021.
- [15] A. M. Zeyad, B. A. Tayeh, and M. O. Yusuf, "Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder based high strength concrete," *Construction and Building Materials*, 216, 314-324, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.026.
- [16] A. Azad, A. Saeedian, S. F. Mousavi, H. Karami, S. Farzin, and V. P. Singh, "Effect of zeolite and pumice powders on the environmental and physical characteristics of green concrete filters" *Construction and Building Materials*, 240, 117931, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117931.
- [17] A. S. Alqarni, "A comprehensive review on properties of sustainable concrete using volcanic pumice powder ash as a supplementary cementitious material," *Construction and Building Materials*, 323, 126533, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126533.
- [18] K. K. Al-Zboon and J. Al-Zouby, "Effect of volcanic tuff on the characteristics of cement mortar," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20 (5), 520-531, 2016, doi: 10.1080/19648189.2015.1053151.
- [19] A. C. Arı, "Nevşehir Taşlarıyla İnşa Edilen Tarihi Yapıların Restorasyonuna Yönelik Polyester Matris ve Taş Tozu Kullanılarak Üretilen Kompozit Harçlarda Tane Boyutunun Dayanımına Etkisinin Araştırılması", *Online Journal of Art & Design*, 12(2), 144-157, 2024.
- [20] "TSEN197-1pdf".
- [21] M. Karatas, A. Benli, and F. Arslan, "The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortars subjected to high temperatures," *Construction and Building Materials*, 265, 120300, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120300.
- [22] A. Benli, M. Karatas, and H. Anil Toprak, "Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, 239, 117895, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117895.
- [23] F. Arslan, A. Benli, and M. Karatas, "Effect of high temperature on the performance of self-compacting mortars produced with calcined kaolin and metakaolin," *Construction and Building Materials*, 256, 119497, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119497.
- [24] M. Karatas, A. Benli, and H. A. Toprak, "Effect of incorporation of raw vermiculite as partial sand replacement on the properties of self-compacting mortars at elevated temperature," *Construction and Building Materials*, 221, 163-176, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.077.
- [25] M. Karataş, A. Benli, and A. Ergin, "Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars," *Construction and Building Materials*, 150, 467-479, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.220.
- [26] A. Benli, "Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume," *Structural Concrete*, 20 (3), 1096-1108, 2019, doi: 10.1002/suco.201800302.
- [27] EFNARC, "EFNARC, (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems), The European guidelines for selfcompacting concrete: Specification, production and use, U.K, 2002," *Magazine of Concrete Research*, vol. 64, no. 5, pp. 401-409, 2002, doi: 10.1680/macr.10.00167.
- [28] M. Ş. Yön and M. Karataş, "Evaluation of the mechanical properties and durability of self-compacting alkali-activated mortar made from boron waste and granulated blast furnace slag," *Journal of Building Engineering*, 61, 105263, 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.105263.
- [29] K. Turk and S. Demirhan, "Effect of limestone powder on the rheological, mechanical and durability properties of ECC," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21 (9), 1151-1170, 2017, doi: 10.1080/19648189.2016.1150902.
- [30] M. Sarıdemir and S. Çelikten, "Investigation of fire and chemical effects on the properties of alkali-activated lightweight concretes produced with basaltic pumice aggregate," *Construction and Building Materials*, 260, 119969, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119969.
- [31] A. ASTM C348, "Flexural strength of hydraulic-cement mortars," *American Society for Testing and Material*, vol. 04, pp. 1-6, 2002.
- [32] ASTM C349, "Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (Using portions of prisms broken in flexure)," *ASTM International*, pp. 1-6, 2002.
- [33] S. Saraç, M. Karatas, and A. Benli, "The effect of dunite powder and silica fume on the viscosity, physico-mechanical properties and sulphate resistance of self-compacting mortars," *Construction and Building Materials*, 375, 130970, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130970.



Seyhan Barajı su kotunun belirlenmesi ve mevsimsel analizi: Uzaktan algılama teknikleriyle 30 yıllık bir çalışma

Determination and seasonal analysis of water levels in Seyhan Dam: A 30-year study using remote sensing techniques

Nihal Adıgüzel¹, Muhammed Furkan İnce², Arzu Özkaya^{3*}

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, nihaladgzl@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2317-0055>

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, incefurkan16@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9068-1729>

³ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, a.ozkaya@aybu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3983-8831>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 15 Kasım 2024
Revizyon 24 Ocak 2025
Kabul 28 Ocak 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

Seyhan Barajı, Rezervuar alan değişimi, Landsat verileri

Bu çalışmada, Adana ilinde bulunan Seyhan Barajı'nın 1990-2021 yılları arasındaki rezervuar alan değişimi, uzaktan algılama teknikleriyle detaylı bir şekilde incelenmiştir. Düzensiz yağış rejimi, tarıma dayalı göç, insan faaliyetlerindeki artış ve küresel ısınmanın buharlaşma oranlarını artırması, barajdaki su seviyelerinin düzenli olarak izlenmesini ve değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan yöntem, su yüzey alanlarının gerçeğe yakın bir biçimde tespit edilmesini sağlamıştır. Verilerin doğruluğu, korelasyon katsayısı (r), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve ortalama hata (OH) gibi istatistiksel kriterlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen ortalama değerler, genel olarak gerçek duruma yakın sonuçlar sunmuş, ancak belirli veri çiftlerinde sapmalar gözlemlenmiştir. Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ ve Landsat 8 OLI/TIRS verileri, DSİ ölçümleriyle karşılaştırıldığında sırasıyla 0.76, 0.83 ve 0.78 korelasyon değerleri elde edilmiştir. Özellikle Landsat 7 ETM+ verisi, diğerlerine kıyasla en düşük RMSE değerini sağlamıştır. Ancak, mevsimsel ve atmosferik faktörlerin yanı sıra veri setlerinin uzunluğunun da hata oranlarını etkileyebileceği belirtilmiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 15 November 2024
Received in revised form 24 January 2025
Accepted 28 January 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Seyhan Dam, Reservoir area change, Landsat data

In this study, the reservoir area changes of Seyhan Dam, located in Adana, were examined in detail using remote sensing techniques for the period between 1990 and 2021. Irregular precipitation patterns, migration driven by agriculture, increased human activities, and the impact of global warming on evaporation rates necessitate regular monitoring and assessment of water levels in the dam. The method used in this study enabled accurate detection of water surface areas. The accuracy of the data was evaluated using statistical criteria such as the correlation coefficient (r), root mean square error (RMSE), and average error (OH). The average values obtained generally provided results close to the real situation, though deviations were observed in specific data pairs. When compared with measurements from the State Hydraulic Works (DSI), the Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, and Landsat 8 OLI/TIRS data yielded correlation values of 0.76, 0.83, and 0.78, respectively. Notably, the Landsat 7 ETM+ data exhibited the lowest RMSE value compared to the others. However, it has been noted that seasonal and atmospheric factors, as well as the length of the data sets, may also influence the error rates.

Doi: 10.24012/dumf.1586135

* Sorumlu Yazar

Giriş

Su kaynakları, en küçük mikroorganizmadan en büyük canlı varlığa kadar tüm biyolojik yaşamın temel dayanağını oluşturduğundan ekosistemin vazgeçilmez unsurudur [1]. Günümüzde dünya nüfusunun hızla artması ve küresel ısınmaya bağlı olarak gözlenen iklim değişikliği su ihtiyacının her geçen gün artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle halihazırda sınırlı olan su kaynakları kalite ve nicelik bakımından risk altındadır [2]. İçme suyu temini, tarım, sanayi, enerji üretimi gibi birçok alanda hayati öneme sahip olan su kaynaklarının etkin bir şekilde yönetimi ve korunması, havza bazlı çalışmaların yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi doğrultusunda, ihtiyaç duyulduğunda güvenilir su temini ve elektrik üretimi sağlayan baraj yapılarının tasarımı ve inşası üzerinde kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir. Bu yapılar, suyun depolanmasını ve kontrollü kullanımını mümkün kılarak, toplumun su ve enerji gereksinimlerinin karşılanmasında kritik bir rol oynamaktadır [3]. Barajlara yönelik en ciddi tehditlerden biri, iklim değişikliği sebebiyle artan sıcaklıkların buharlaşmayı hızlandırmasıdır. Bunun sonucunda, baraj rezervuarlarındaki su seviyelerinde meydana gelen büyük değişimler, günümüzde önemli bir sorun haline gelmiştir [4]. Özellikle içme suyu ve tarım alanlarında su temini çalışmalarının dikkatle yürütülmesi ve havzayı besleyen su kaynaklarının sürekli olarak takip edilmesi gereklidir. Rezervuarların su seviyesindeki değişikliklerinin takip edilebilmesi için göl gözlem istasyonları (GGİ) kullanılmaktadır. Ancak bu gözlem istasyonlarının işleyişinde ekipman güvenliği ve yüksek maliyet gibi birçok sorunla karşılaşabilmektedir. Uzaktan algılama verilerinin coğrafi bilgi sistemleri ile temini ve bu verilerin rezervuardaki kot-alan-hacim grafikleriyle ilişkilendirilmesi sayesinde, GGİ'nin bulunmadığı bölgelerde bu yöntemler kullanılabilirken, GGİ'nin mevcut olduğu bölgelerde ise uzaktan algılama verilerinin doğruluk kontrolü sağlanabilmektedir [5].

Daha hızlı ve ekonomik veri elde edilmesini sağlayan yeni uzaktan algılama yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan uzaktan algılama teknolojileri ve coğrafi bilgi sistemlerinin hidrolojik çalışmalara entegrasyonu, veri erişimini kolaylaştırmakta ve analiz süreçlerini daha etkin hale getirmektedir. Bu teknolojiler, su kaynaklarının izlenmesi ve yönetiminde önemli katkılar sunmaktadır. Landsat, MODIS, ASTER ve Sentinel gibi çeşitli uydu sistemlerinden elde edilen görüntülerin analizi, yüzey formlarında meydana gelen değişimlerin tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu uydu verileri, coğrafi değişimlerin izlenmesi ve değerlendirilmesi açısından önemli bir araçtır [6]. Landsat görüntüleri, yüksek zamansal çözünürlüğü, küresel kapsamı ve açık erişim politikası sayesinde su kütlelerinin haritalanması ve analiz edilmesinde bilimsel topluluk tarafından geniş bir şekilde tanınmaktadır. Bu

erişilebilirlik, araştırmacılara yüksek veri maliyetleri olmadan kapsamlı çalışmalar yapma imkânı sağlamaktadır. 1996 yılında McFeeters, uydu görüntülerinde yüzey suyunun tespitini artırmak için Landsat verilerini kullanarak Normalleştirilmiş Fark Su Endeksi'ni (NDWI) sunmuştur [7]. Bu yöntem, suyun yeşil banttaki yansıtıcı özelliklerini ve yakın kızılötesi bantta suyun emilimini kullanarak su özelliklerini kara özelliklerinden izole etmeyi mümkün kılmaktadır. McFeeters'ın yaklaşımı, sonraki hidrolojik araştırmalar için temel oluşturmuştur. Çalışmalar, NDWI'nin, sadece temel su kütlelerinin haritalanması için değil, aynı zamanda rezervuar alanı ölçümü [8], sel izleme [9] ve sulak alan analizi [10] gibi daha karmaşık hidrolojik çalışmalar için nasıl uygulandığını da göstermektedir.

Bu çalışmada, uydu gözlemleri aracılığıyla elde edilen Seyhan Barajı alan verileri, kot-alan eğrileri kullanılarak yükseklik değerlerine dönüştürülmüştür. Hesaplanan yükseklik değerleri, DSİ'den temin edilen su seviyesi bilgileri ile karşılaştırılmıştır.

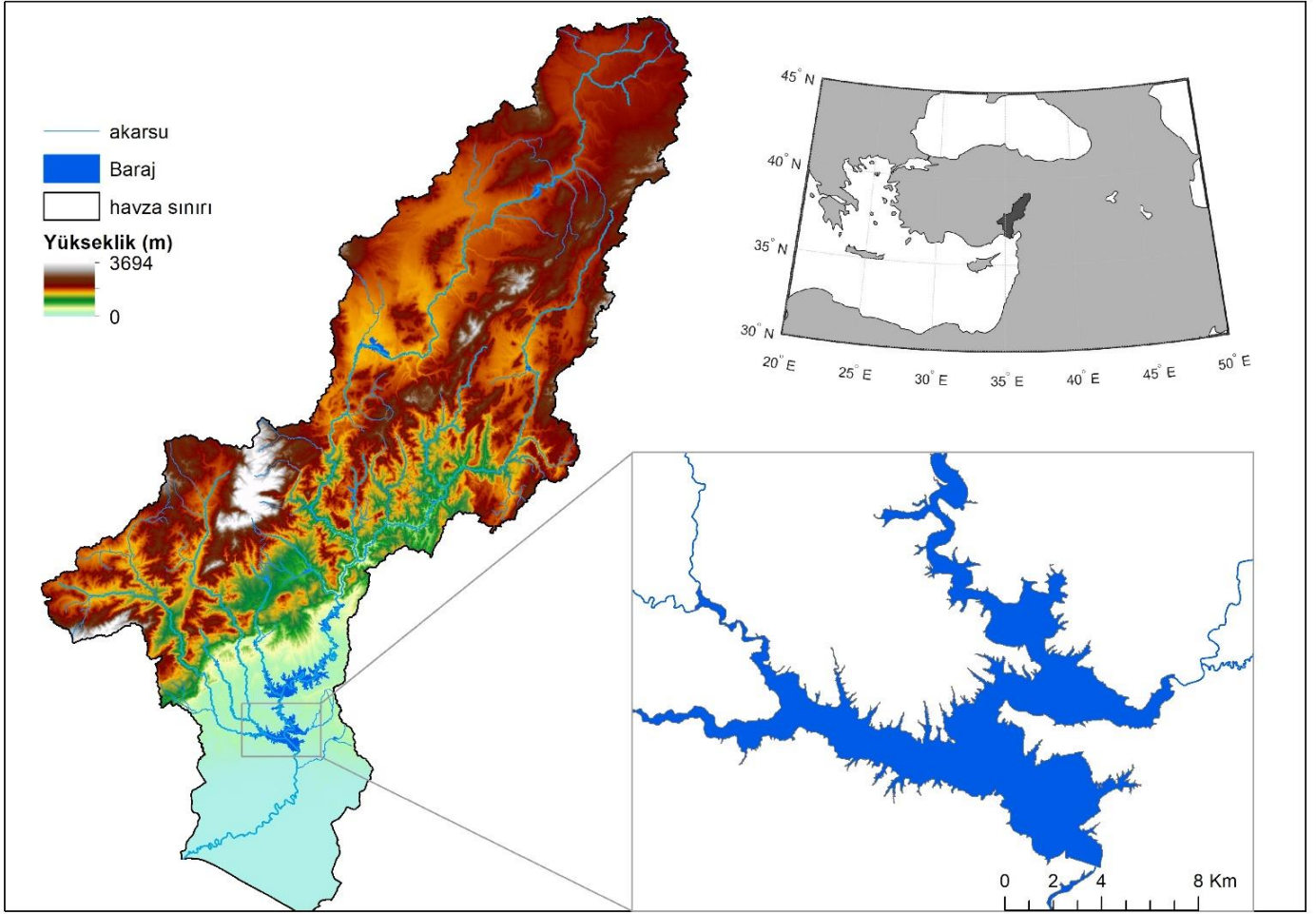
Materyal ve metot

Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Adana'nın 15 km uzağında Seyhan Nehri üzerinde kurulu 37°02'22"N enleminde 35°19'55"E boylamında bulunan Seyhan Barajı'dır (Şekil 1). 1956 yılında işletmeye açılan Seyhan Barajı'nın normal su seviyesi ve buna denk gelen alanı sırasıyla 67.50 m 64.96 km²'dir. Bu baraj içme suyu, sulama, enerji ve taşkın koruma gibi alanlarda faaliyet göstermektedir. Zamanti ve Göksu akarsularından beslenen Seyhan Nehri'nin sulama ve içme suyu faaliyetlerinde kullanımı baraj su seviyesi değişimlerine sebep olmaktadır [11]. İklim değişikliklerine bağlı olarak gelişen yağış rejimindeki düzensizlik, sıcaklık artışına bağlı buharlaşma ve son yıllarda Adana iline tarımsal faaliyetler nedeniyle artan göç gibi faktörler, su miktarının kesin bir şekilde belirlenmesini önemli hale getirmiştir. Bu sebeple, çalışma alanı Seyhan Barajı olarak belirlenmiştir.

Çalışma verileri

1972 yılından bu yana Landsat uyduları, ülkemiz de dahil olmak üzere dünya genelinde veri sağlamaya devam etmektedir. Çalışma alanında uzun süreli ve çok sayıda görüntü verisi içermesi nedeniyle, Landsat uydu verileri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 1990 ile 2021 yılları arasındaki Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ ve Landsat 8 OLI/TIRS (Tablo 1) uydu görüntülerinden yararlanılmıştır. Çalışmada, bulut filtrelemesi yapılarak 1990 Ocak tarihinden 2021 Aralık tarihine kadarki 31 yıllık veri geçmişini kapsayan bir araştırma yapılmıştır.



Şekil 1. Seyhan Havzasının konumu, havzanın sayısal yükseklik modeli üzerinde gösterimi ve çalışma alanı (Seyhan Barajı)

Tablo 1. Landsat Uyduları Özellikleri [14]

Tanım	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI/TIRS	Çözünürlük (m)
Ultra Mavi			B1	30
Mavi	B1	B1	B2	30
Yeşil	B2	B2	B3	30
Kırmızı	B3	B3	B4	30
Yakın Kızılötesi	B4	B4	B5	30
Kısa Dalga Kızılötesi 1	B5	B5	B6	30
Termal Kızılötesi	B6	B6	B10	30
Kısa Dalga Kızılötesi 1	B7	B7	B7	30

Metot

Google Earth Engine (GEE) platformu, geniş ölçekli uydu görüntüsü analizleri için güçlü bir araçtır. Bu çalışmada, NDWI hesaplamaları için belirli bir çalışma alanı GEE platformunda oluşturulmuştur. Çalışmanın ilk adımı, Landsat uydu görüntü veri setlerinin seçilmesidir. Landsat uydu görüntüleri, Amerika Birleşik Devletleri'nin NASA (National Aeronautics and Space Administration) ve USGS (United States Geological Survey) kurumları tarafından yürütülen

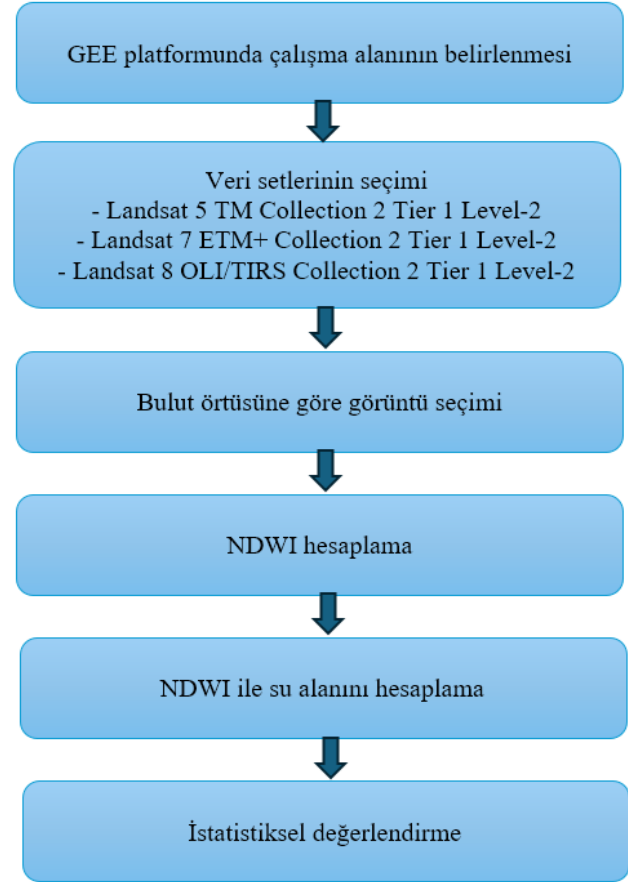
ortak bir iş birliği çerçevesinde üretilmektedir[12]. Bu doğrultuda, atmosferik düzeltme yapılmış ve yüksek geometrik doğruluğa sahip Collection 2 Tier 1 Level-2 veri setleri tercih edilmiştir. Landsat Collection 2 Level-2 verileri, USGS tarafından LEDAPS ve LaSRC algoritmaları kullanılarak atmosferik düzeltmeler uygulanmış yüzey yansımaya (surface reflectance) verileridir. Bu düzeltmeler, aerosol, su buharı ve bulut etkilerinin giderilmesi amacıyla MODIS iklim modeli verileri ile gerçekleştirilmiştir [13].

Çalışmada, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, ve Landsat 8 OLI/TIRS uydularına ait veri setleri kullanılmıştır. Seçilen veri setleri üzerinden görüntüler tarih aralığına ve çalışma alanına göre filtrelenmiş, ardından bulut örtüsüne göre sıralama yapılmıştır.

En düşük bulut oranına sahip olan görüntüler analiz için seçilmiştir. Bu aşamada bir ay içinde en az bulutluluk oranına sahip olan görüntü seçimi yapılmış ve bu güne denk gelen rezervuar kot değeri DSİ'den talep edilmiştir. Sonrasında, NDWI hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda, Landsat 5 TM ve 7 için SR_B2 (Yeşil) ve SR_B4 (NIR) bantları, Landsat 8 OLI/TIRS için ise SR_B3 (Yeşil) ve SR_B5 (NIR) bantları kullanılmıştır. NDWI değerleri, su alanlarının mekânsal dağılımını tespit etmek için kullanılmıştır. NDWI sonuçları üzerinden, çalışma alanındaki toplam su alanı hesaplanmış ve bu değerler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu analizler, su kütlelerinin zamansal ve mekânsal değişimlerini anlamada önemli bilgiler sağlamıştır. Çalışmanın akışı Şekil 2'de sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan Landsat uydu görüntülerine, ABD Jeolojik Araştırmalar Merkezi'nin (USGS) Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) platformu üzerinden erişilebilir. Bu çalışmada kullanılan GEE platformu, Landsat, Sentinel ve diğer uydu görüntü veri setlerinin doğrudan işlenmesine imkân tanıyan bulut tabanlı JavaScript programlama dilini kullanan bir platformdur [15]. Ayrıca, bu platform sadece NASA Landsat arşivlerine değil, aynı zamanda ESA ve diğer kaynaklardan gelen görüntülere de ücretsiz erişim sağlar. Yüksek performansı ve doğruluğu sayesinde yer bilimleri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [16], [17].

Landsat uydu verileriyle Seyhan Barajı'nı kapsayacak şekilde poligon koordinat noktaları belirlenerek çalışma alanı oluşturulmuştur. Landsat verileri, karasal alanda uzun süreli değişimleri gerek antropojenik faaliyetlerden gerekse iklim değişikliğinin etkilerini görebilmek için sıklıkla kullanılan kaynaklar arasında yer almaktadır [18]. Elde edilen veriler üzerinden temel kodlamalar sisteme girilerek, göletin zamana bağlı alan değişimleri bulut filtrelemesi uygulanarak elde edilmiştir. Bulut filtreleme, atmosferdeki sis, kar ve bulut gibi doğal etmenlerden kaynaklanan yanlış görselleştirmeyi engellemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu işlemler yapılırken literatürde de sıklıkla kullanılan [19] Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (Normalized Difference Water Index, NDWI) kullanılmıştır. NDWI hesaplamasında yakın kızılötesi ve yeşil bantlar kullanılmaktadır [7]. NDWI yöntemi, sulak ve karasal bölgeleri ayırmak için kullanılan etkili bir yöntemdir. NDWI formülü kullanılarak elde edilmiş su kütlesi içeren sıfırdan büyük değerler su kütlesinin olduğu alanları temsil ederken sıfırdan küçük çıkan değerler için ise sulak alanın dışındaki kuru bölgeleri temsil etmektedir (Tablo 2). Bu şekilde çalışma alanı içerisindeki ıslak ve kuru bölgeler birbirinden ayrılarak gölet alanı tespiti sağlanabilmektedir (Şekil 3). NDWI değeri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$NDWI = \frac{Yeşil\ bant - Kızılötesi\ bant}{Yeşil\ bant + Kızılötesi\ bant} \quad (1)$$

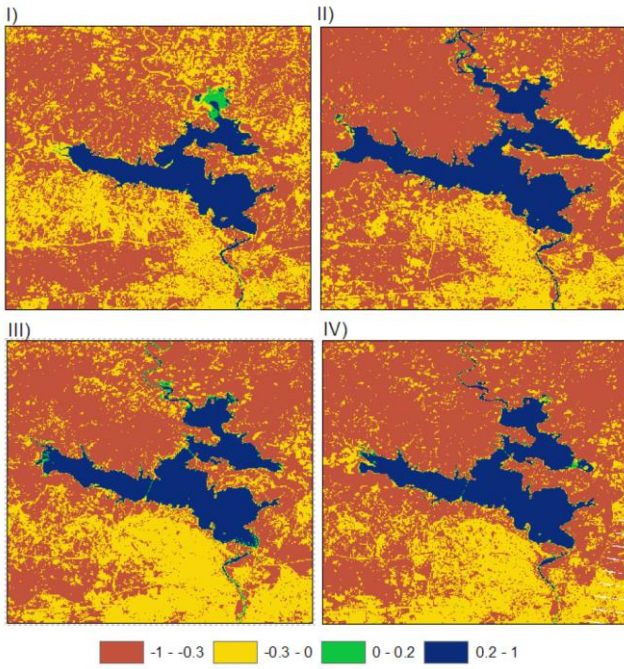


Şekil 2. Çalışmanın akış şeması

Yeşil bant ve kızılötesi değerleri B2 ve B4 (Tablo 1) bantlarının değerini ifade etmektedir. Bu yöntemle su görüntülerinin toplam alan değerleri elde edilmiştir.

Tablo 2. NDWI değerleri ve açıklamaları[20], [21]

NDWI Değeri	Açıklama
0.2 – 1	Su yüzeyi
0 – 0.2	nem
-0.3 – 0	Orta kuraklık, su içermeyen yüzeyler
-1 – -0.3	Kuraklık, su içermeyen yüzeyler



Şekil 3. Örnek NDWI Görüntüleri: I) 14.09.1990, II) 21.06.2000, III) 20.08.2010, IV) 08.09.2020

Çalışmanın devamında, uydu görüntülerinden elde edilen rezervuar alan değerleri, DSI'den temin edilen kot-alan grafiği kullanılarak su seviyesi değerlerine dönüştürülmüş sonrasında DSI'den temin edilen günlük baraj su seviyesi değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu amaç için istatistiksel yöntemler kullanılmıştır (Tablo 3).

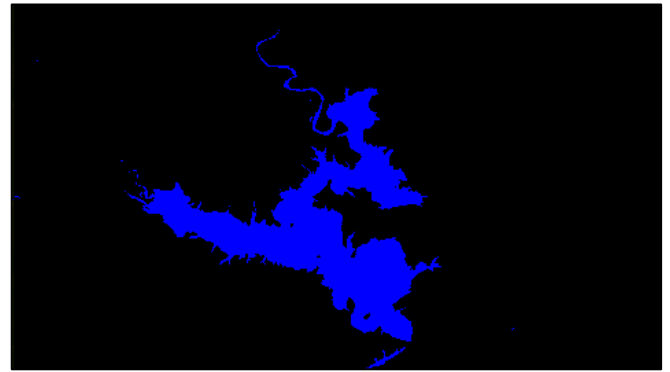
Tablo 1. İstatistiksel Değerlendirme Tablosu

Kriter	Denklem
Korelasyon katsayısı	$r = \frac{\Sigma(H_g - \bar{H}_g)(H_t - \bar{H}_t)}{\sqrt{\Sigma(H_g - \bar{H}_g)^2} \sqrt{\Sigma(H_t - \bar{H}_t)^2}}$
Kök Ortalama Kare Hatası (m)	$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(H_g - H_t)^2}{n}}$
Ortalama hata (m)	$OH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_g - H_t)$

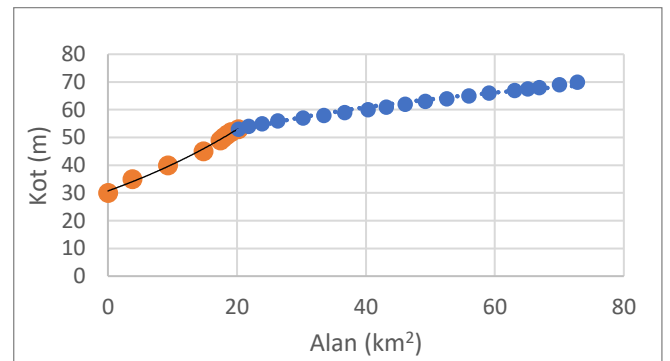
Tablo 3'de yer alan H_g , H_t ve n değişkenleri sırasıyla: gözlenmiş su seviyesi, kot alan grafiğinden okunmuş su seviyesi ve veri çiftlerinin sayısını ifade etmektedir. \bar{H}_g ve \bar{H}_t ise ortalama gözlenmiş su seviyesi ve grafik eğrisinden okunmuş ortalama su seviyesidir.

Bulgular ve tartışma

Yürütülen çalışmada, uzaktan algılama teknolojisi kullanılarak bulutluluk oranı en düşük olan görüntüler seçilmiştir. Buna göre 1990-2011 tarihleri arasında 175 adet Landsat 5 TM görüntüsü, 2011-2014 tarihleri arasında 23 adet Landsat 7 ETM+ görüntüsü ve 2014-2021 tarihleri arasında 83 adet Landsat 8 OLI/TIRS görüntüsü elde edilmiştir. NDWI yöntemi kullanılarak su maskesi oluşturulmuştur. Bu sayede, rezervuar alan değerleri elde edilmiştir. (Şekil 4). Landsat 7 ETM+ verisinin diğer iki uydu verisinden sayıca daha az olmasının temel nedeni, bu uydu sensöründen elde edilen görüntülerin bulutluluk oranlarının yüksek olmasıdır. Barajın su alan değerleri (km^2) elde edildikten sonra barajın kot-alan grafiğinden kot değerleri yani su seviyesi değerleri hesaplanmıştır. Kot-Alan grafiğindeki değerlerin daha doğru bir şekilde okunabilmesi için üs ve üstel olmak üzere iki denklemli kot-alan eğrisi oluşturulmuştur. Bu denklemler kullanılarak elde edilen alan değerlerinden kot (su seviyeleri) hesabı yapılmıştır (Şekil 5). Oluşturulan denklemlerin korelasyon katsayıları 0.99'dur.



Şekil 4. Seyhan Barajına ait NDWI Su Maskesi (02.02.1990)

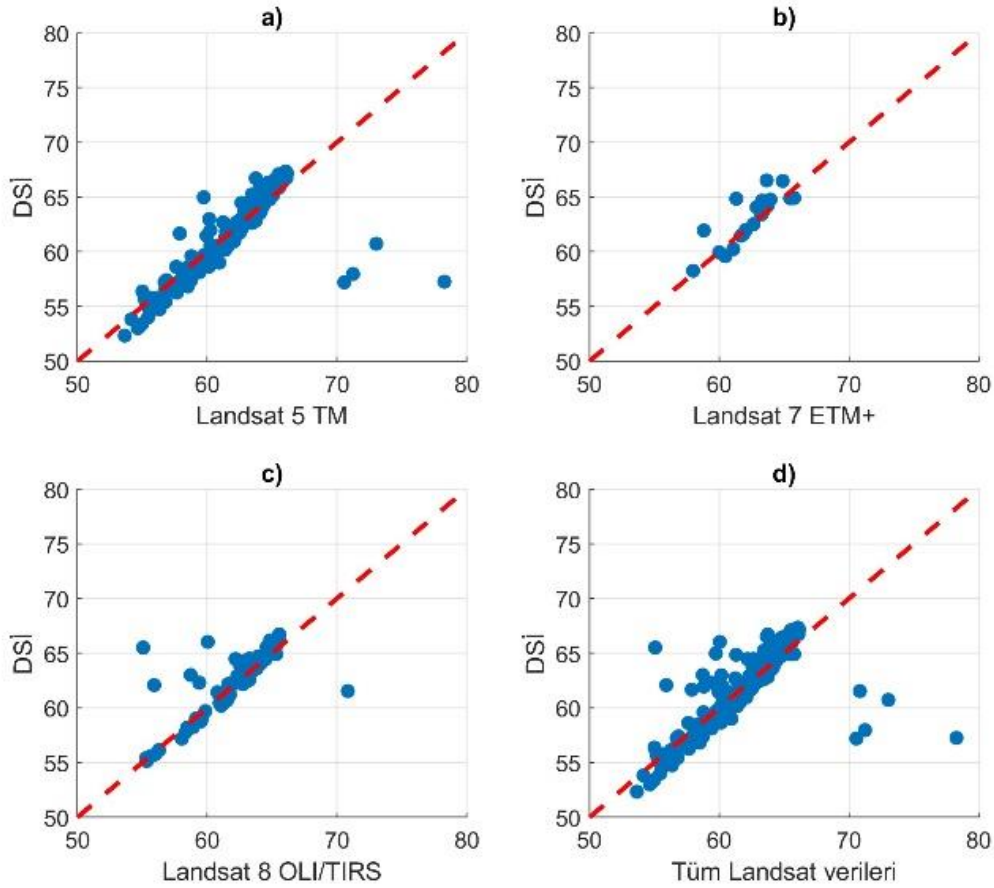


Şekil 5. İki Eğrili Kot-Alan Grafiği

Şekil 6 DSI (Devlet Su İşleri) ve Landsat verileri arasındaki kot (yükseklik) değerlerinin birbiriyle olan ilişkisini göstermektedir. Dört farklı panel, Landsat'ın farklı versiyonlarından (5 TM, 7 ETM+, 8 OLI/TIRS) alınan alan kot verileri ile DSI'nin sağladığı yalnız kot verilerini

göstermektedir. İstatistiksel değerlendirme kriterlerinin sonuçları da Tablo 4'te sunulmuştur. Buna göre Şekil 6 (a)'da Landsat 5 TM verisinin DSİ verileriyle orta derecede bir korelasyon ($r = 0.76$) sergilediği ve ölçüm hatası olarak RMSE'nin 2.55 m., ortalama hatanın ise 1.13 m. olduğu kaydedilmiştir. Bu değerler, Landsat 5 TM verisinin genel olarak DSİ verileriyle uyum sağladığını ortaya koymakta; ancak, dört noktada gözlenen sapmalar, belirli ölçümlerde farklılıkların bulunduğunu da göstermektedir. Şekil 6 (b)'de, Landsat 7 ETM+ verisi, DSİ ile 0.83 gibi daha yüksek bir korelasyon değeri göstermiş ve ölçüm hatası olarak 1.36 m. ile diğer verilere kıyasla daha düşük bir RMSE değeri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Landsat 7 ETM+ verisinin yükseklik ölçümleri konusunda daha güvenilir olduğunu gösterse de veri sayısının azlığı, bu bulguların genel geçerliliği konusunda dikkatli bir değerlendirme yapılmasını gerektirmektedir. Çünkü geniş veri setleri ile yapılan

analizler serinin performansına ilişkin daha doğru sonuçlar verecektir. Şekil 6 (c)'de, Landsat 8 OLI/TIRS verisi, DSİ verileriyle 0.78 korelasyon sergilemiş, RMSE değeri 1.99 m. ve ortalama hata ise 0.94 m. olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, verinin DSİ verileriyle oldukça uyumlu olduğunu ve yüksek ölçüm doğruluğu sağladığını vurgulamaktadır. Şekil 6 (d)'de ise, tüm Landsat verilerinin bir arada değerlendirilmesi sonucunda, DSİ verileriyle genel bir uyum ($r = 0.76$) ve ortalama RMSE değeri 2.32 m. olarak belirlenmiş; bu da veriler arası ölçüm farklılıklarının dikkate alınarak her bir serinin ayrı ayrı incelenmesinin önemini ortaya koymuştur. Çünkü Landsat verilerindeki teknolojik yenilikler, algılama kapasitesindeki artış ve çeşitlilik, birleştirilmiş veri setlerindeki sonuçların genel çerçevede değerlendirilmesini anlamsız kılmaktadır.



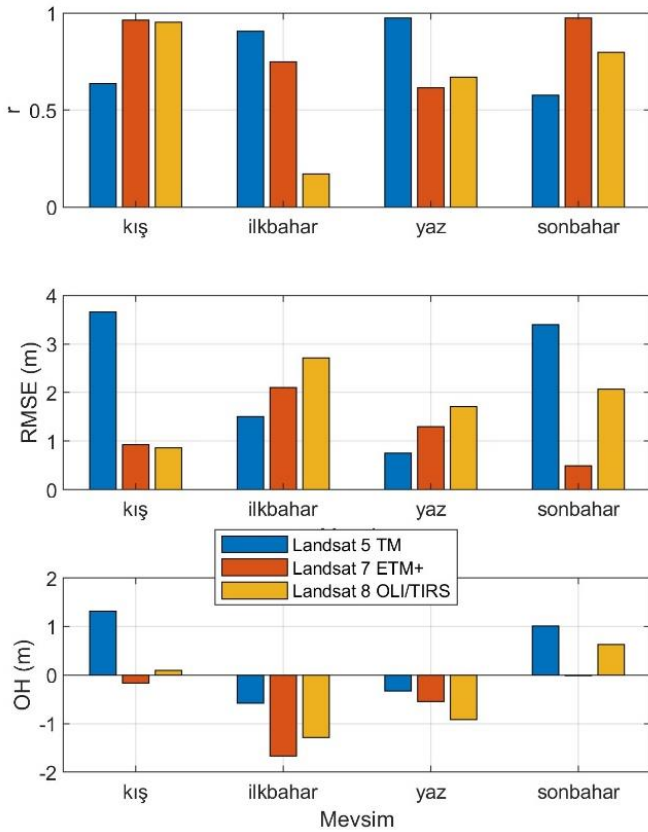
Şekil 6. Landsat verilerinin DSİ verileri ile karşılaştırılması (Kot (m)) (a) Landsat 5 TM, b) Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS ve d) tümü)

Tablo 2. İstatistiksel Analiz Sonuçları

	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI/TIRS	Tüm
r	0.76	0.83	0.78	0.76
RMSE (m)	2.55	1.36	1.99	2.32
OH (m)	1.13	0.96	0.94	1.06

Mevsimlerin veriler üzerindeki etkisini anlayabilmek için mevsimsel olarak da istatistiksel analizler yapılmıştır (Şekil 7). Landsat uydularına ait veriler kullanılarak oluşturulan bar grafikte, korelasyon katsayısı (r), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve ortalama hata (OH) metriklerinin dört farklı mevsim boyunca değişimi incelenmiştir. Şekil 7'de sunulan

üç Landsat verisinin mevsimsel performans değerlendirmelerine göre, kış mevsiminde Landsat 7 ve 8 serileri 0.9'un üzerinde yüksek korelasyon katsayıları ile öne çıkarken, Landsat 5 verisi daha düşük bir korelasyon sergilemiştir. İlkbahar mevsiminde Landsat 5, korelasyon değerlerinde yüksek bir artış gösterirken, Landsat 8 verisi düşük korelasyon ile dikkat çekmektedir. Yaz aylarında ise, Landsat 5 yüksek korelasyon ve düşük RMSE değerleri ile optimal performans sunmuştur. Sonbahar mevsiminde tüm seriler 0.5 üzerinde korelasyon değerleri vermiş, ancak RMSE açısından Landsat 7 verisi diğerlerine göre daha düşük hata payı ile en güvenilir ölçümleri gerçekleştirmiştir. İlkbahar ve yaz aylarında Landsat 7 ve 8 verilerinin negatif ortalama hata değerleri, bu seri değerlerinin gerçek değerlerden sistematik olarak daha düşük olduğunu işaret ederken, sonbahar aylarında Landsat 7 diğer verilere kıyasla neredeyse hatasız sonuç vermektedir.



Şekil 7. Landsat verisi mevsime bağlı istatistiksel analiz sonuçları

Mevsimsel olarak, ilkbahar döneminde her üç Landsat serisinde yüksek RMSE (>1.5 m.) ve OH (<0.5 m) değerleri gözlenmiştir. Bu durum, bitki örtüsünün yoğun olduğu ve yüksek yansıtma değerlerinin muhtemelen arttığı bir dönem olmasıyla ilişkilendirilebilir. Yaz aylarında ise OH değerlerinde belirgin düşüşler, yüzey yansımalarının daha homojen olması, atmosferik koşulların daha sabit olması gibi sebeplerden kaynaklanabilir. Bunun yanı sıra, Landsat uydularının sensör teknolojileri arasındaki farklılıklar da

ölçümlerin kalitesini ve hassasiyetini etkileyebilir. Veri sayısındaki bu farklılıklar ve çevresel faktörler, farklı hata paylarına yol açmış olabilir. Bu durum, geniş ve sürekli veri setlerinin mevsimsel analizlerdeki önemini vurgulamaktadır.

Çalışmada, belirli bir Landsat veri setinin, mevsimler ve tüm zamanlar gözetilerek, tüm değerlendirme kriterlerinde net bir üstünlük sağlayamadığı görülmüştür. Olmanson ve arkadaşları, 2013 ve 2014 yıllarına ait yaz aylarının görüntülerini kullanarak, Landsat 7 ve 8'in su berraklığı açısından güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında her iki sensörün de iyi performans gösterdiğini belirtmişler, ancak Landsat 8'in doğruluk açısından biraz daha üstün olduğunu vurgulamışlardır [22]. Çalışmamızda sunulan farklı zamanlarda farklı veri setlerinin doğruluğu ya da korelasyonu diğer bir çalışmada Landsat veri setlerinin tamamlayıcılığı ile ifade edilmiştir. Landsat 7 ve 8 uydularından elde edilen bitki indeksleri üzerine yapılan karşılaştırmalı analizde, her iki sensörden alınan veriler arasında yüksek düzeyde korelasyon olduğunu ve bu verilerin tamamlayıcı olarak kullanılma potansiyelini ortaya koymaktadır [23].

Sonuçlar

Tarıma bağlı göç, insan faaliyetlerindeki artış, küresel ısınmanın tetiklediği sıcaklık yükselmeleri, buharlaşmanın artması ve yağış miktarlarındaki azalmalar, su kaynaklarının sürekli izlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada Seyhan Barajı'nın 1990-2021 yılları arasındaki rezervuar alanları Landsat uydu verileri ile tespit edilmiş ve rezervuar su seviyeleri hesaplanmıştır. Hesaplanan su seviyeleri, gerçek su değerleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda uydu tabanlı rezervuar su seviyelerinin gerçeğe yakın değerler verdiği görülmüştür. Kış mevsiminde en yüksek korelasyon, Landsat 7 ETM+ ve Landsat 8 OLI/TIRS tarafından sağlanırken, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde en iyi performansı Landsat 5 TM veri seti göstermiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, herhangi bir veri setinin diğerlerinden sürekli olarak üstün olduğu sonucuna varılamamıştır. Ancak, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde negatif ortalama hata tüm veri setlerinde yaygın bir özellik olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, bazı veri setlerinde yüksek sapmalar gözlemlenmiştir. Atmosferik olaylar, hava fotoğrafının yanlış algılanması sonucu su maskesindeki görüntünün hatalı oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu durum ise bazı değerlerde sapmalar meydana getirebilmektedir. Landsat 7 ETM+ veri setindeki Scan Line Corrector (SLC) arızası bu çalışmada düzeltilmemiştir; ham Collection 2 Tier 1 Level-2 verileri kullanılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda SLC hatalarında düzeltme yapılması planlanmaktadır. Bu çalışmada yapılan analizler, Landsat uydularının özellikle su yüzeyi değişimlerinin izlenmesinde başarılı bir performans gösterdiğini ve DSİ ölçümleriyle tutarlı değerler sunduğunu ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, Landsat veri setlerinin, özellikle doğru kalibre edilmiş veri dönemlerinde, su kaynaklarının izlenmesi ve yönetimi için güçlü bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Yazarlar makalenin geliştirilmesine büyük katkı sağlayan hakemlere içtenlikle teşekkürlerini sunarlar. Bu çalışma Tübitak 2209-A 1919B012322830 nolu proje kapsamında tamamlanmıştır. Yazarlar DSİ 6. Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] D. Pimentel *vd.*, “Water Resources: Agricultural and Environmental Issues”, *BioScience*, c. 54, sy 10, ss. 909-918, Eki. 2004, doi: 10.1641/0006-3568(2004)054[0909:WRAAEI]2.0.CO;2.
- [2] R. Mendelsohn, W. D. Nordhaus, ve D. Shaw, “The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis”, *The American Economic Review*, c. 84, sy 4, ss. 753-771, 1994.
- [3] K. Zemlick, V. C. Tidwell, B. L. Roberts, ve C. R. Castillo, “Suitability Assessment of Non-Potable Water to Meet the Electricity Generation Demands in 2030”, *Journal of Contemporary Water Research & Education*, c. 151, sy 1, ss. 95-105, 2013, doi: 10.1111/j.1936-704X.2013.03155.x.
- [4] V. De Souza Dias, M. Pereira da Luz, G. M. Medero, ve D. Tarley Ferreira Nascimento, “An Overview of Hydropower Reservoirs in Brazil: Current Situation, Future Perspectives and Impacts of Climate Change”, *Water*, c. 10, sy 5, Art. sy 5, May. 2018, doi: 10.3390/w10050592.
- [5] M. A. Akgül ve M. Çetin, “Baraj gölü su kotunun Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılarak tahmin edilmesi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 9, sy 1, ss. 493-502, 2018.
- [6] M. Amani *vd.*, “Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, c. 13, ss. 5326-5350, Eyl. 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3021052.
- [7] S. K. McFEETERS, “The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features”, *International Journal of Remote Sensing*, c. 17, sy 7, ss. 1425-1432, May. 1996, doi: 10.1080/01431169608948714.
- [8] N. Avisse, A. Tilmant, M. F. Müller, ve H. Zhang, “Monitoring small reservoirs’ storage with satellite remote sensing in inaccessible areas”, *Hydrology and Earth System Sciences*, c. 21, sy 12, ss. 6445-6459, Ara. 2017, doi: 10.5194/hess-21-6445-2017.
- [9] K. R. Ahmed ve S. Akter, “Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, c. 8, ss. 168-181, Kas. 2017, doi: 10.1016/j.rsase.2017.08.010.
- [10] A. Ashok, H. P. Rani, ve K. V. Jayakumar, “Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, c. 23, s. 100547, Ağu. 2021, doi: 10.1016/j.rsase.2021.100547.
- [11] Ş. P. Güvel ve R. Yurtal, “Seyhan Baraj rezervuarında katı madde birikimi etkisinin incelenmesi”, *GUMMFD*, c. 35, sy 2, Art. sy 2, Ara. 2019, doi: 10.17341/gazimmfd.418702.
- [12] J. R. Irons, J. L. Dwyer, ve J. A. Barsi, “The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission”, *Remote Sensing of Environment*, c. 122, ss. 11-21, Tem. 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.08.026.
- [13] M. Bilal *vd.*, “A Simplified and Robust Surface Reflectance Estimation Method (SREM) for Use over Diverse Land Surfaces Using Multi-Sensor Data”, *Remote Sensing*, c. 11, sy 11, Art. sy 11, Oca. 2019, doi: 10.3390/rs11111344.
- [14] C. J. Crawford *vd.*, “The 50-year Landsat collection 2 archive”, *Science of Remote Sensing*, c. 8, s. 100103, Ara. 2023, doi: 10.1016/j.srs.2023.100103.
- [15] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, ve R. Moore, “Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone”, *Remote Sensing of Environment*, c. 202, ss. 18-27, Ara. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [16] N. A. Wahap ve H. Z. M. Shafri, “Utilization of Google Earth Engine (GEE) for land cover monitoring over Klang Valley, Malaysia”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, c. 540, sy 1, s. 012003, Tem. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/540/1/012003.
- [17] B. Feizizadeh, D. Omarzadeh, M. Kazemi Garajeh, T. Lakes, ve T. Blaschke, “Machine learning data-driven approaches for land use/cover mapping and trend analysis using Google Earth Engine”, *Journal of Environmental Planning and Management*, c. 66, sy 3, ss. 665-697, Şub. 2023, doi: 10.1080/09640568.2021.2001317.
- [18] X. Li *vd.*, “Monitoring high spatiotemporal water dynamics by fusing MODIS, Landsat, water occurrence data and DEM”, *Remote Sensing of Environment*, c. 265, s. 112680, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.rse.2021.112680.
- [19] M. Karaca, N. Yağmur, ve F. Balçık, “İstanbul Terkos Gölü zamansal değişiminin Google Earth Engine kullanılarak belirlenmesi”, *Geomatik*, c. 7, sy 3, ss. 235-242, Ara. 2022, doi: 10.29128/geomatik.975714.
- [20] A. Valero-Jorge, R. González-De Zayas, A. Alcántara-Martín, F. Álvarez-Taboada, F. Matos-Pupo, ve O. Brown-Manrique, “Water area and volume calculation of two reservoirs in Central Cuba using Remote Sensing Methods. A new perspective”, içinde *Revista de Teledetección*, Universitat Politècnica de València, Tem. 2022, ss. 71-87. doi: 10.4995/raet.2022.17770.
- [21] EOS, “Normalized Difference Water Index (NDWI)”, Normalized Difference Water Index (NDWI). Erişim: 23 Ekim 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/>
- [22] L. G. Olmanson, P. L. Brezonik, J. C. Finlay, ve M. E. Bauer, “Comparison of Landsat 8 and Landsat 7 for regional measurements of CDOM and water clarity in lakes”, *Remote Sensing of Environment*, c. 185, ss. 119-128, Kas. 2016, doi: 10.1016/j.rse.2016.01.007.
- [23] P. Li, L. Jiang, ve Z. Feng, “Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors”, *Remote Sensing*, c. 6, sy 1, Art. sy 1, Oca. 2014, doi: 10.3390/rs6010310.



Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevelerde Kapasite Tasarımı Yaklaşımının ve Deprem Performansının Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Capacity Design and Nonlinear Time History Analysis Approach to Seismic Performance of Eccentrically Braced Steel Frames

Alpay Işın^{1*}, Cüneyt Vatansever²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, isina@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9816-1399>

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, cuneyt.vatansever@itu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9954-925X>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 27 Kasım 2024
Revizyon 26 Şubat 2025
Kabul 2 Mart 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

*Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve,
Kapasite tasarımı,
Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz,
Deprem performans değerlendirilmesi,
Bağ kirişi,
Plastik mafsal ve doğrusal olmayan davranış*

ÖZ

Bu çalışma kapsamında, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY 2018)'de belirtilen boyutlandırma esaslarına uygun olarak tasarımı yapılan, her iki asal doğrultusunda yatay yüklerin süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı yedi katlı bir ofis binasının deprem performansı, zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların doğrusal olmayan davranışları için yığılı plastik davranış (plastik mafsal) modeli esas alınmıştır. Çalışmada, on bir farklı deprem yer hareketi kullanılarak toplam yirmi iki adet zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmede taban ve kat kesme kuvvetleri, görelî kat ötelenmeleri, çapraz ve kolonlarda oluşan iç kuvvet talepleri, bağ kirişlerindeki kesme kuvveti – yer değiştirme ve moment – dönme talepleri dikkate alınmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan yirmi iki adet analiz sonucu elde edilen taleplerin ortalama değerleri esas alınarak, TBDY 2018'de dış merkez çaprazlı çelik çerçeveler için öngörülen kapasite tasarımı yaklaşımının yeterliliği araştırılmış ve bina taşıyıcı sisteminin deprem performansı değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 November 2025
Received in revised form 26 February 2025
Accepted 2 March 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

*Eccentrically braced steel frame,
Capacity design
Nonlinear time history analysis,
Earthquake performance assessment,
Link beam,
Plastic hinge and plastic behavior*

Doi: 10.24012/dumf.1592049

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

In this study, the seismic performance of a seven-storey office building designed in accordance with the principles specified in the Turkish Seismic Code for Buildings-2018 (TSCB-2018) and resisting the lateral loads in both principal directions with highly ductile eccentrically braced steel frames is evaluated using nonlinear time history analysis method. The nonlinear behavior of the structural members is based on the lumped plastic behavior (plastic hinge) model. In the study, a total of twenty-two nonlinear time history analyses were performed using eleven different earthquake ground motions. Storey and floor shear forces, relative storey drifts, internal force demands on diagonals and columns, shear force - displacement and moment - rotation demands on tie beams were taken into account in the evaluation. Based on the average values of the demands obtained as a result of twenty-two nonlinear analyses, the adequacy of the capacity design approach prescribed in TSCB 2018 for eccentrically braced frames was investigated and seismic performance of the structural system was also assessed.

Giriş

Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler, yüksek enerji sönümlenme ve yatay yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Ayrıca, mimari olarak merkezi çaprazlı çerçevelere göre daha büyük geçiş alanı sağlamaları nedeniyle, çelik konstrüksiyon sistemlerin tasarımında tercih edilmektedir.

Bouwkamp ve diğerleri [1], kısa ve düşey bağ kirişli dışmerkez çaprazlı çelik numuneler üzerinde deneysel ve nümerik bir çalışma yürütmüşlerdir. Şekildeğiştirmelere bağlı olarak, rijitlik kaybı ve pekleşme etkisinin dikkate alındığı nümerik analizlerin sonuçlarının deney sonuçları ile uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Çevrimsel davranış eğrileri elde edilen kısa ve düşey bağ kirişlerinin yüksek enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğu ve kesme kuvveti etkileri altında gövde akma dayanımının iki katına kadar yük taşıyabildiği sonucuna ulaşmışlardır.

Caprili ve diğerleri [2], düşey ve yatay kısa bağ kirişli, dışmerkez çaprazlı, bir katlı ve tek açıklıklı iki adet çelik çerçeve numunede yatay yükler altında bağ kirişli davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmaya ek olarak, ilgili çerçevelere ait literatürdeki çalışmalara dayalı idealleştirilmiş analitik hesap modelleri oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada, tasarım için hesap kolaylığı sağlanması ve bağ kirişlerinin gerçek davranışına en uygun şekilde modellenmesi hedeflenmiştir.

Silva ve diğerleri [3], dinamik yükler altında basit bazı çelik çerçevelerin doğrusal olmayan davranışlarını yığılı plastisite (plastik mafsallı) yöntemini ile sayısal olarak incelemişlerdir. Sundukları sayısal örneklerle plastik mafsallı modelinin dinamik yükler altında uygulanabilirliğini göstermişlerdir.

Popov ve diğerleri [4], dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde bağ kirişlerinin boyutlandırılmasına ilişkin yapısal davranış iyileştirmeye yönelik araştırmalarda bulunmuşlardır. Farklı kat sayısına sahip analitik modelleri dinamik analiz yöntemini uygulayarak incelemişlerdir. Üst katlarda kullanılacak yüksek kapasiteli bağ kirişlerinin yapı davranışını olumsuz yönde etkilediğini ve kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda ekonomik olmayan sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir.

Bosco ve Rossi [5], kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda boyutlandırılan bir dışmerkez çaprazlı çelik yapıda hasar dağıtma kapasite katsayısı dağılımını incelemişlerdir. Kendi geliştirdikleri bu parametrenin yapıların sismik davranışına olan etkilerini araştırmışlardır. Dayanım fazlalığı katsayısı, hasar dağıtma kapasite katsayısı ve bağ kirişli plastik dönme değerleri arasında analitik bir ilişki tanımlamışlardır.

Koboevic ve David [6], kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda boyutlandırılan dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveli yüksek yapıların, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerle deprem yükleri altındaki davranışlarını irdelemişlerdir. Bu amaçla Kanada'da inşa edilecek farklı kat yüksekliklerindeki üç adet bina için sayısal analizler yürütmüşlerdir. Analizlerde tasarım spektrumu ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilen deprem yer hareketi kayıtları kullanılmıştır.

Durgun ve diğerleri [7], dışmerkez çaprazlı bir çelik perde üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini uygulayarak perdeye ait davranışını incelemişlerdir.

Çalışmada tasarım büyütmeye katsayısının ve kapasite tasarımı ilkelerinin yeterliliği araştırılmıştır.

Khan ve Bilal [8], farklı bağ kirişli uzunluklarına sahip benzer dışmerkez çaprazlı çelik yapılara ait yapısal analiz modelleri üzerinde 22 adet deprem yer hareketinin dikkate alındığı doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmişlerdir. Doğrusal olmayan kesit davranışını temsil eden plastik mafsallı yöntemini kullanmışlardır. Bağ kirişli uzunluğunun taşıyıcı sistem davranışını üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Büyük [9], doğrusal analiz yöntemi ile kapasite tasarımı ilkelerine göre boyutlandırılan dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveli çok katlı bir yapıyı deprem yer hareketi ivme kayıtları altında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemini uygulayarak incelemiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarını karşılaştırarak kapasite tasarımı ilkelerini değerlendirmiştir.

Esmaili [10], Kanada Deprem Yönetmeliği esas alınarak boyutlandırılan 4, 8 ve 14 katlı dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin deprem performansını incelemiştir. Doğrusal olmayan dinamik analizlerde, her bir yapı için ayrı ayrı ölçeklendirilen sekiz adet deprem yer hareketi ivme kaydı kullanmıştır.

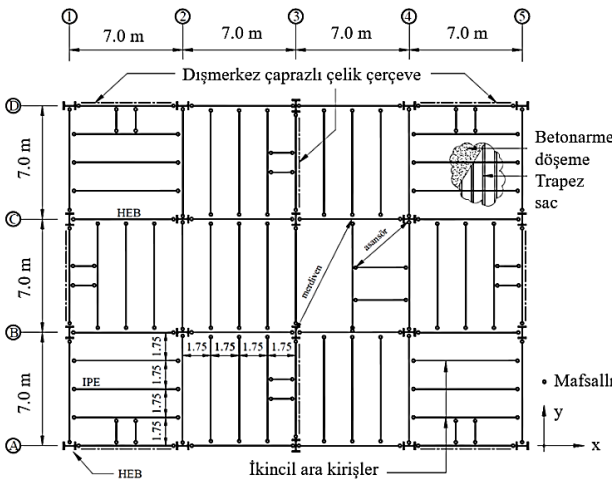
Biradar ve diğerleri [11], dayanıma göre tasarım ve performansa dayalı tasarım yöntemleri uygulayarak boyutlandırdıkları on katlı dışmerkez çaprazlı çelik çerçevenin, statik itme ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerini kullanarak deprem performansını değerlendirerek hesap yöntemlerini karşılaştırmışlardır.

Mortazavi ve diğerleri [12], farklı sayıda kat adedine sahip, değişken bağ kirişli özellikleri gösteren çeşitli dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin deprem performansları üzerine araştırmalarda bulunmuşlardır. Yapıların deprem performansları belirlenirken, hedef tepki spektrumuna göre ölçeklendirilen 40 adet deprem yer hareketi kaydı kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda dayanım fazlalığı, görece kat ötelemeleri ve kalıcı şekildeğiştirmeler gibi büyüklükler değerlendirilmiştir.

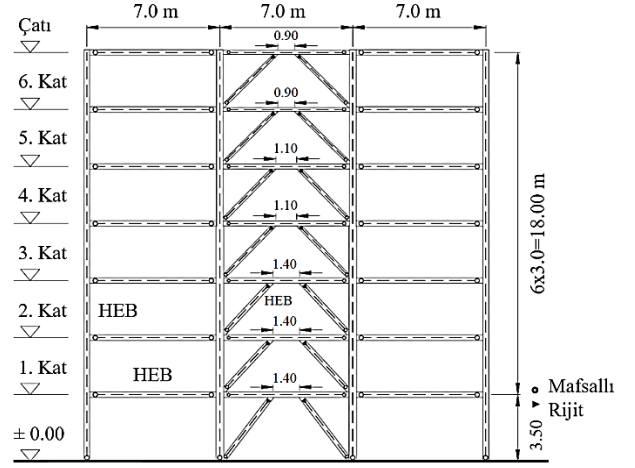
Bu çalışmada, her iki ana doğrultuda yatay yük taşıyıcı sistemi sünklük düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan ve tasarımı TBDY 2018 9.8 [13]'e uygun olarak gerçekleştirilen bir ofis binasının zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi uygulanarak deprem performansı değerlendirilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler (ZTADOA) için belirlenen 11 adet deprem yer hareketi TBDY 2018 2.5.2.1(b)'ye uygun olarak ölçeklendirilmiştir. TBDY 2018 5.7.2.1 uyarınca, bina taşıyıcı sisteminin asal eksenleri (X ve Y) göz önünde tutularak toplam 22 adet ZTADOA gerçekleştirilmiştir. İç kuvvet ve şekildeğiştirme talepleri, her bir analizden elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır. Bu talepler, taban ve kat kesme kuvvetleri, görece kat ötelemeleri, kolon ve çaprazların dayanımları, bağ kirişlerinde meydana gelen kesme kuvveti – yerdeğiştirme ve moment – dönme taleplerine ilişkin en büyük ortalama büyüklüklerdir. Elde edilen talepler doğrultusunda, TBDY 2018'de dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler (DMÇÇÇ) için öngörülen kapasite tasarım ilkeleri ve performans hedefleri değerlendirilmiştir.

Model Bina

Bu çalışma kapsamında, doğrusal olmayan analiz ve davranışa bağlı olarak değerlendirmeye konu olan bina, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) *Eğitim El Kitabı Açıklamalar ve Uygulama Örnekleri Kısım I-6*'da yer alan Örnek Ç-3 binasıdır, [14]. Planda 588 m² oturma alanına sahip söz konusu binanın, yedi katlı bir ofis binası olarak hizmet vermesi öngörülmüştür. Binanın her iki ana doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı sistemi süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerden oluşmaktadır. Kat döşemeleri, çelik kirişlere başlıklı çelik ankrajlar vasıtasıyla mesnetlenen trapez sac levhalar üzerindeki yerinde dökme betonarme döşeme sistemiyle oluşturulmuştur. Döşeme yüklerinin aktarıldığı, ana kirişlere mafsallı olarak bağlanan ikincil ara kirişler 1.75m ara ile teşkil edilmiştir. Yapı akslarına konumlandırılan ana çerçeve kirişlerinin kolonlara bağlantısı mafsallıdır. Çaprazlar, üst uçlarında bulunan bağ kirişlerine rijit, alt uçlarında bulunan kolon – kiriş birleşim bölgesine mafsallı olarak bağlanmaktadır. Kolonların temele bağlantısı her iki ana eksenlerinde mafsallı olarak teşkil edilmiştir. Yapıda, bağ kirişi kesitleri ve boyu (e) katlar arasında farklılık göstermektedir. Kesme kuvveti etkisinde plastik şekil değiştirme göstererek enerji sönmülmesi öngörülen bağ kirişlerinin boyları (e), başlangıç aşamasında yaklaşık olarak ($1.3M_p / V_p$) olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece tasarım aşamasında bağ kirişlerinin boylarının ($1.6M_p / V_p$) değerini aşması ve çok küçük boyların elde edilmesi kolaylıkla önlenmiştir. Yapıda bulunan kolon ve çaprazlar S355JR (EN 10025), kirişler S275JR (EN 10025) sınıfı malzemeye sahiptir. Binaya ait tipik kat planı Şekil 1'de, tipik sistem enkesiti (1 aksı çerçevesi) Şekil 2'de ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve elemanlarının enkesit profilleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Çelik konstrüksiyon, trapez sac, betonarme döşeme ve kaplama gibi zafı yükler normal katlarda 4.9 kN/m² ve çatı katında 4.0 kN/m² olarak dikkate alınmaktadır. Ayrıca, normal katlarda cephe duvar yükü 3 kN/m ve çatı katı parapet yükü 2.0 kN/m olmak üzere, çevre kirişlerine etkiyen düzgün yayılı yükler öngörülmüştür. Normal katlarda ve çatı katında kullanım amacı ile uyumlu hareketli yükler 2.0 kN/m²'dir [14]. Sismik kütle hesabında, TBDY 2018 Tablo 4.3 uyarınca binanın kullanım amacı ile uyumlu olacak şekilde, hareketli yük katılım katsayısı $n = 0.3$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Tipik kat planı [14].



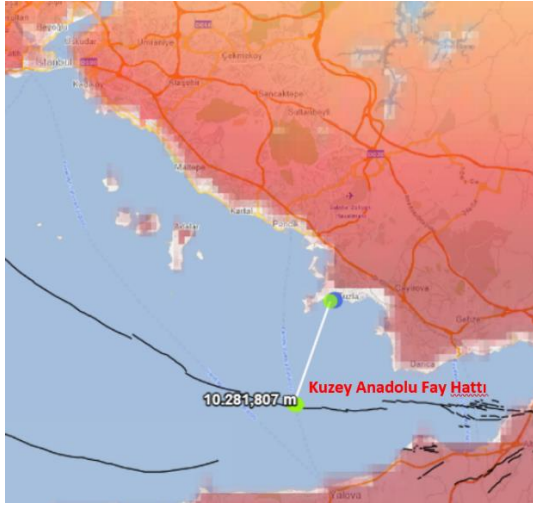
Şekil 2. Tipik sistem enkesiti (1 aksı çerçevesi) [14].

Tablo 1. Yatay yük taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların kesit bilgileri.

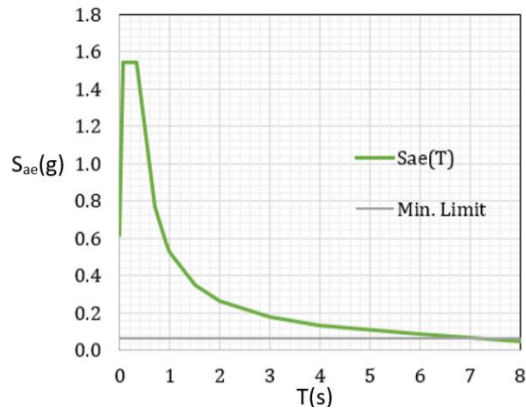
Kat	Kesitler		
	Kiriş	Çapraz	Kolon
7	HE200B	HE180B	HE360B
6	HE200B	HE180B	HE360B
5	HE240B	HE200B	HE360B
4	HE240B	HE200B	HE400B (3 aksı HE450B)
3	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)
2	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)
1	HE300B	HE240B	HE400B (3 aksı HE450B)

Depremsellik ve Performans Hedefleri

Çalışma konusu kapsamında incelenen dışmerkez çaprazlı çelik yapının ofis (işyeri) binası olarak hizmet vermesi öngörülmektedir. Binanın coğrafi konumu, İstanbul/Tuzla bölgesi içinde olmak üzere, enlem ve boylam değerleri sırasıyla, 40.8140 ve 29.2903 olarak seçilmiştir. Yapının diri faylara göre konumu Şekil 3'te gösterilmiştir. Binanın ZC yerel zemin sınıfı üzerine inşa edileceği varsayılmıştır. TBDY 2018 Tablo 3.1'e göre kullanım amacına uygun, Bina Kullanım Sınıfı (BKS), 3 ve Bina Önem Katsayısı (I), 1 olarak dikkate alınmıştır. Deprem Tasarım Sınıfı'nın (DTS) belirlenebilmesi amacıyla Türkiye Deprem Tehlike Haritaları [15] kullanılarak, 50 yılda aşılma olasılığı 10% olan deprem (DD-2) yer hareket düzeyine ait parametreler elde edilmiştir. Binanın konumu, zemin sınıfı ve deprem yer hareketi düzeyine bağlı olarak Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı (S_s) 1.286, 1.0 Saniye Periyot İçin Harita Spektral İvme Katsayısı (S_1) 0.351, Kısa Periyot Spektral İvme Katsayısı (S_{D5}) 1.543, 1.0 Saniye Periyot İçin Spektral İvme Katsayısı (S_{D1}) 0.526 ve Hedef Spektrum Köşe Periyotları (T_A ve T_B) sırası ile 0.068s ve 0.341s olarak elde edilmiştir. Deprem parametrelerine bağlı olarak elde edilen yatay elastik ivme spektrumu Şekil 4'te verilmiştir. TBDY 2018 Tablo 3.2 uyarınca Deprem Tasarım Sınıfı (DTS), 1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Bina'nın fay hattına göre konumu, [15].



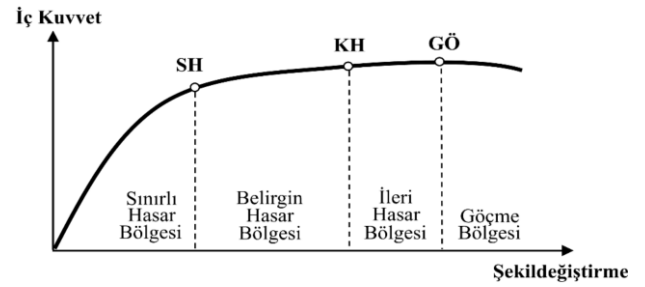
Şekil 4. Yatay elastik ivme spektrumu (hedef spektrum).

Binalar için Tablo 2'de tanımlanan deprem performans düzeyleri, TBDY 2018 3.4'te Kesintisiz Kullanım (KK), Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) olarak belirlenmiştir. TBDY 2018 Tablo 3.4(c) uyarınca, incelemeye konu olan binanın sağlaması gereken deprem performans hedefi, DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyi olarak belirlenmiştir. TBDY 2018 15.8.4 uyarınca, yatay yük taşıyıcı sistemi çelik olan bir binanın KH performans hedefini sağlayabilmesi için gerekli koşullar tanımlanmıştır. Yapının mevcut hali ile Kontrollü Hasar performans hedefini sağlayabilmesi için İleri Hasar bölgesine geçen taşıyıcı eleman bulunmamalıdır, [13].

Sünek elemanlar için kesit düzeyinde dört hasar bölgesi ve bu hasar bölgelerini belirleyen üç sınır değeri tanımlanmıştır. Şekildeğiştirme değerlerine bağlı olarak tanımlanan Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), Göçme Öncesi Hasar (GÖ) sınır değerleri; Sınırlı Hasar, Belirgin Hasar, İleri Hasar ve Göçme bölgelerini birbirinden ayırmaktadır. Sınırlı Hasar ilgili kesitte sınırlı miktarda elastik ötesi davranışı, İleri Hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlanmaktadır. Gevrek olarak hasar gören elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir. Taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan iç kuvvet ve şekildeğiştirmelere bağlı olarak meydana gelen hasar sınıfları Şekil 5'te gösterilmektedir, [13]. DMÇÇÇ elemanlarına ait şekildeğiştirme sınırları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 2. Bina performans düzeyleri [13].

Performans Düzeyi	Tanım
Kesintisiz Kullanım (KK)	Taşıyıcı sistem elemanlarında ihmal edilebilir ölçüde yapısal hasar
Sınırlı Hasar (SH)	Taşıyıcı sistem elemanlarında doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı, sınırlı düzeyde yapısal hasar
Kontrollü Hasar (KH)	Taşıyıcı sistem elemanlarında can güvenliğini sağlayacak düzeyde çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün yapısal hasar
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	Taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde hasarın meydana geldiği, binanın kısmen ya da tamamen göçmesinin önlenmesi



Şekil 5. Kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri [13].

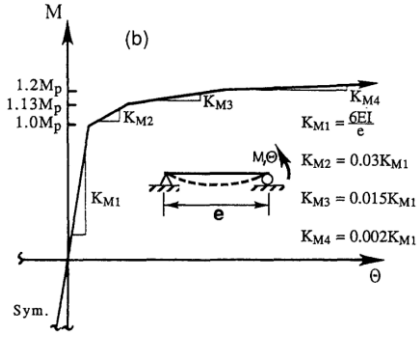
Tablo 3. DMÇÇÇ şekildeğiştirme sınırları [13].

Yapı Elemanı	Plastik Dönme Sınırları [rad]		
	SH	KH	GÖ
Kısa Bağ Kirişi $e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$	0.005	0.12	0.15
Kolon-Çapraz-BKDKKB $P/P_c < 0.2$	$10\theta_y$	$60\theta_y$	$90\theta_y$
Kolon-Çapraz-BKDKKB $0.2 < P/P_c < 0.5$	$1.5(A^*)\theta_y$	$9(A^*)\theta_y$	$13.5(A^*)\theta_y$

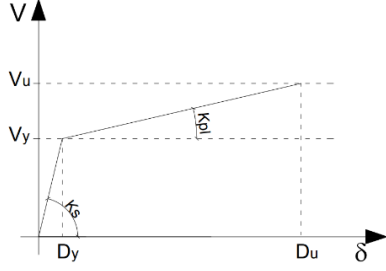
$$*A = (1 - 1.66P/P_c)$$

Bina Taşıyıcı Sisteminin Hesap Modeli

Model binanın taşıyıcı sisteminin, doğrusal analizleri için ETABS [16], zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerinin (ZTADOA) gerçekleştirilebilmesi için ise Perform 3D [17] yapısal analiz programlarından yararlanılmıştır. Her iki analiz türü için de ayrı ayrı olmak üzere, sonlu elemanlar yönteminin esas alındığı üç boyutlu yapısal analiz modelleri oluşturulmuştur. Kolon, çapraz ve kirişler, her iki ucundaki düğüm noktaları altı serbestlik dereceli olan çubuk elemanlar olarak modellenmiştir. Yalnızca doğrusal analiz modelinde dikkate alınan betonarme döşeme plağı sınırlı ve benzer büyüklükteki dört düğüm noktasına sahip ve her düğüm noktası altı serbestlik dereceli olan kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kat düzlemleri içinde bulunan elemanlarda meydana gelen eksenel yük taleplerinin elde edilebilmesi için döşeme plağı yalnızca doğrusal analiz modeline dahil edilmiş ve rijit



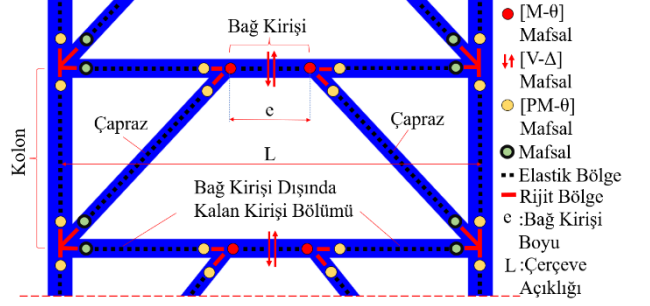
Şekil 9. Plastik mafsall davranışı, eğilme momenti- dönme [23].



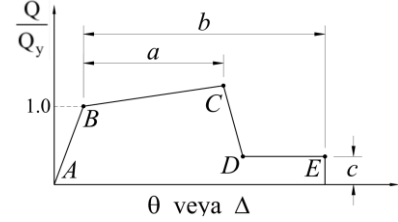
Şekil 10. Kesme kuvveti etkisinde doğrusal olmayan plastik mafsall davranış modeli [26].

Bu çalışma kapsamında incelenen binanın taşıyıcı sistem elemanlarında, deprem etkileri altında meydana gelmesi beklenen olası elastik ötesi davranışlar, plastik mafsall davranış modeli ile temsil edilmiştir. Perform 3D bilgisayar yazılımı kullanılarak, bağ kirişlerinde meydana gelmesi beklenen olası elastik ötesi davranışları temsil etmek üzere bağ kirişi uçlarında eğilme momenti-dönme plastik mafsall ve bağ kirişi orta bölgesinde kesme-yerdeğiştirme plastik mafsall tanımlanmıştır (Şekil 7). Bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarında da olası plastik şekildeğiştirme durumları için; kolon alt-üst uçlarında, düşey çapraz üst uçlarında ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölgesinin (BKDKKB) bağ kirişine bağlanan uçlarında aksel yük taleplerine bağlı olarak eğilme momenti-dönme mafsall tanımlanmıştır. Ayrıca, analizlerde ikinci mertebeye etkileri de dikkate alınmıştır. Perform 3D bilgisayar yazılımında, bağ kirişleri için eğilme momenti – dönme plastik mafsalları *momenthinge*, *rotationtypeinelasticcomponent* olarak ve kesme – yerdeğiştirme plastik mafsalları da *shearhinge*, *displacementtypeinelasticcomponent* olarak tanımlanmıştır. Elemanlar için öngörülen plastik davranış modelleri, *framemembercompoundcomponent* olarak çubuk elemanların ilgili uçlarında konumlandırılmıştır. Matematik modelde kullanılan plastik mafsallar, tipik bir kat çerçevesi esas alınarak Şekil 11’de gösterilmiştir. Mevcut çalışmalar doğrultusunda Perform 3D bilgisayar yazılımında tanımlanan genelleştirilmiş tipik eğilme momenti / kuvvet – dönme / yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 12’de verilmiştir. İlgili şekildeki a, b ve c davranış modeli değişkenleri, her bir taşıyıcı sistem bileşeni için Tablo 4’te sunulmuştur. Q ve Qy sırasıyla, bileşenin genelleştirilmiş iç kuvvetini ve genelleştirilmiş beklenen dayanımını; θ/Δ genelleştirilmiş dönme / yerdeğiştirme değerlerini göstermektedir. Bağ kirişi kayma dayanımı $Q_y=V_p$, Denk. (1 ve 2), kolon, çapraz ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü için $Q_y=M_p$, Denk. (5 ve 6) esas alınarak hesaplanmaktadır,[13]. Bağ kirişi elemanları için eğilme ve kayma rijitlikleri sırasıyla Denk. (3 ve 4), bağ

kirişleri için akma dönmesi Denk. (5), kolon, çapraz, bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü için akma dönmesi Denk. (7) kullanılarak hesaplanmaktadır, [13]. Şekil 12’de belirtilen pekleşmenin dikkate alındığı en büyük dönme / yerdeğiştirme noktasında (C), $V_u/V_p=1.5$ ve $M_u/M_p=1.2$ ’dir. $P/P_n > 0.5$ olan çerçeve elemanlarında sünek davranışa (plastik şekildeğiştirmeye) izin verilmemiştir. Eğilme momenti, kesme kuvveti ve aksel kuvvet için beklenen dayanımların hesabında; malzeme sınıflarının beklenen akma ve çekme dayanımları, karakteristik dayanımlar olarak esas alınmıştır.



Şekil 11. Plastik mafsall yerleşimi ve davranış tipleri.



Şekil 12. Genelleştirilmiş eğilme momenti/kuvvet - dönme/yerdeğiştirme ilişkisi.

$$V_p = 0.6 * F_y * A_w \quad (1)$$

$$A_w = (h - 2 * t_f) * t_w \quad (2)$$

$$K_b = \frac{12 * E * I}{e^3} \quad (3)$$

$$K_s = \frac{G * A_w}{e} \quad (4)$$

$$\theta_y = \frac{V_p}{\frac{K_b * K_s}{K_b + K_s} * e} \quad (5)$$

$$M_p = 1.18 * W_p * F_y * \left[1 - \frac{|P|}{P_n} \right] \leq W_p * F_y \quad (6)$$

$$\theta_y = \frac{W_p * F_y * \ell}{6 * E * I} * \left[1 - \frac{|P|}{P_n} \right] \quad (7)$$

Tablo 4. Davranış modeli değişkenleri.

Yapı Elemanı	Plastik Dönme Açısı [rad]		Artık Dayanım Oranı
	a	b	
Kısa Bağ Kirişi $e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$	0.14	0.16	0.8
Kolon-Çapraz- BKDKKB $P/P_c < 0.2$	$60\theta_y$	$110\theta_y$	0.6
Kolon-Çapraz- BKDKKB $0.2 < P/P_c < 0.5$	$9(A^*)\theta_y$	$17(A^*)\theta_y$	0.2

$$*A = (1 - 1.66P/P_c)$$

Deprem Yer Hareketi İvme Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Bu çalışma kapsamında deprem etkileri altında doğrusal olmayan yapısal davranışın incelenebilmesi amacıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz (ZTADOA) yönteminden yararlanılmıştır. Bu analiz yönteminin uygulanabilmesi için uygun deprem yer hareketlerine ait ivme kayıtlarının belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre, TBDY 2018 2.5.1.3 uyarınca, her bir deprem kaydı takımında birbirine dik ana doğrultuları temsil eden ikişer adet gerçek deprem yer hareketi ivme kaydı olmak üzere, 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı seçilmiştir. Bu kayıtlar seçilirken, tasarıma esas deprem yer hareketi ile uyumlu olacak şekilde; faylanma mekanizmaları, faya uzaklık, yerel zemin şartları ve deprem büyüklüğü gibi değişkenler dikkate alınmıştır.

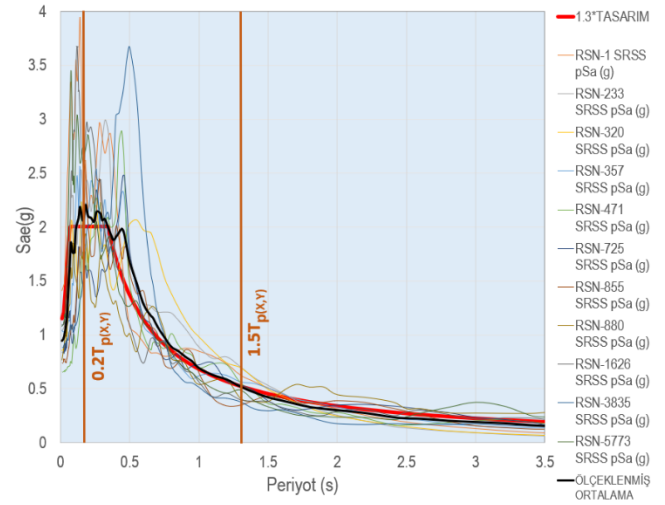
Deprem yer hareketi ivme kayıtları, PEER - (*Pasific Earthquake Engineering Research Center*) ivme kayıtları kütüphanesi kullanılarak temin edilmiştir, [28]. Seçilen deprem yer hareketi ivme kayıtları ve özellikleri Tablo 5'te verilmiştir. Deprem yer hareketi ivme kayıtları seçilirken aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır:

- Bina Kuzey Anadolu fay hattına yaklaşık 10 km uzaklıktadır (Şekil 3). Kuzey Anadolu fay hattının faylanma mekanizması doğrultu atımlıdır. Binanın faya uzaklığı ve Kuzey Anadolu fay hattı davranışı ile uyumlu olarak 9 adet doğrultu atımlı kayıt ve farklı faylanma mekanizmasını da dikkate alabilmek için 2 adet ters kırık deprem yer hareketi ivme kaydı seçilmiştir.
- Binanın bulunduğu konuma ait zemin sınıfı (ZC) ile uyumlu olarak, deprem yer hareketi ivme kayıtları seçilirken zemin için üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı, (V_{s30}) 360-760m/sn aralığı esas alınarak sınırlandırılmıştır.
- Tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu olarak, kayıtların filtrelenmesi ve seçiminde kullanılan deprem büyüklüğü aralığı 5.5 – 8.0 olarak belirlenmiştir.

Yukarıdaki kriterler ile uyumlu deprem yer hareketi ivme kayıtlarının seçimi sonrası, söz konusu kayıtlar, bina taşıyıcı sisteminin analizi için uygun hale getirilebilmesi amacıyla, TBDY 2018 2.5.2.1(b)'de belirtilen koşullar esas alınarak ölçeklendirilmiştir. Basit ölçeklendirme yapılırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Her bir deprem yer hareketi kaydı için, ana yatay doğrultulardaki ivme bileşenleri, karelerinin toplamının karekökü (SRSS) yöntemi uygulanarak birleştirilir ve bileşke yatay elastik ivme spektrumları oluşturulur.
- Her bir deprem ivme kaydına ait bileşke yatay elastik ivme spektrumları kullanılarak ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumu elde edilir.
- Elde edilen ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumuna ait genliklerin, hakim modal titreşim periyodunun fonksiyonu olarak hesaplanan $0.2T - 1.5T$ zaman aralığındaki tasarım spektrumu genliklerinin 1.3 katından az olmaması gerekmektedir, [13]. Her bir deprem ivme kaydı için belirtilen koşulu sağlayan ölçek faktörleri elde edilir.

Bu çalışma kapsamında, ölçeklendirilmiş ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumu, yukarıda belirtilen koşullar altında PEER [28] ölçeklendirme modülü kullanılarak elde edilmiştir. Her bir deprem kaydı takımına ait hesaplanan ölçek faktörleri Tablo 5'te ve her bir deprem kaydına ait ölçeklendirilmiş yatay elastik ivme spektrumu, 1.3 katsayısı ile büyütülmüş yatay elastik tasarım spektrumu ve ölçeklendirilmiş ortalama bileşke yatay elastik ivme spektrumu Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Ölçeklendirilmiş yatay elastik ivme spektrumları, bileşke spektrum ve hedef spektrum.

Tablo 5. Deprem kayıtları ve özellikleri.

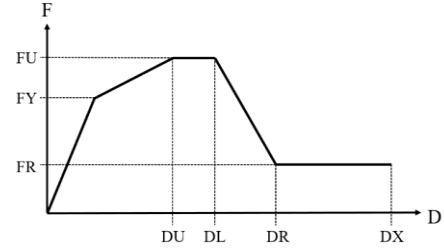
NO	Deprem Adı	PEER RSN	Ölçek Faktörü	Büyüklük	Faylanma Mekanizması	V_{s30} (m/s)	Kayıt Süresi (sn)
EQ1	Helena_Montana-01	1	6.10	6	doğrultu atımlı	593	50.930
EQ2	Mammoth Lakes-02	233	4.23	5.69	doğrultu atımlı	382	29.995
EQ3	Mammoth Lakes-10	320	3.84	5.34	doğrultu atımlı	382	40.000
EQ4	Coalinga-01	357	5.57	6.36	ters kırık	565	59.990
EQ5	Morgan Hill	471	6.13	6.19	doğrultu atımlı	544	28.365
EQ6	Superstition Hills-02	725	1.49	6.54	doğrultu atımlı	317	22.300
EQ7	Landers	855	4.38	7.28	doğrultu atımlı	367	40.000
EQ8	Landers	880	4.19	7.28	doğrultu atımlı	355	99.815
EQ9	Sitka_Alaska	1626	8.26	7.68	doğrultu atımlı	650	55.095
EQ10	Denali_Alaska	3835	7.26	7.9	doğrultu atımlı	428	83.595
EQ11	Iwate_Japan	5773	3.82	6.9	ters kırık	531	60.000

Analiz Yöntemi

Çalışma kapsamında, bina taşıyıcı sisteminin deprem etkileri altında doğrusal olmayan davranışı zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi (ZTADOA) kullanılarak araştırılmıştır. Analizlerde, 11 adet deprem yer hareketi kaydı, TBDY 2018 5.7.2.1 uyarınca, 22 adet analiz gerçekleştirilecek şekilde uygulanmıştır. Analiz ve değerlendirmelerde dikkate alınan varsayımlar aşağıda sıralanmıştır.

- Kolon, kiriş ve çapraz elemanlar, Model Bina bölümünde yapılan açıklamalara ve özelliklere sahip çubuk elemanlar olarak modellenmiştir.
- Döşeme plakları analiz modeline dahil edilmemiş ve kat düzlemlerinde rijit diyafram tanımı uygulanmıştır.
- Bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümü elemanlarında aksel yük talepleri düğüm noktası denge denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.
- Sonlu elemanlar hesap modelindeki çubuk elemanların doğrusal olmayan davranışları, pekleşme etkilerinin dikkate alındığı plastik mafsalsal modelleri ile temsil edilmektedir.
- Plastik mafsallara ait genelleştirilmiş iskelet eğrileri (Şekil 12) Perform 3D bilgisayar yazılımında, *trilinearshapofrelationship* ve *strengthloss* seçenekleri dikkate alınarak beş adet doğrudan oluşan *inelastichinge* olarak modellenmiştir (Şekil 14).
- Plastik mafsallarda, tekrarlı yükler altında çevrimsel dayanım azalması (*cyclicdegradation*) davranışı terk edilmiştir.
- Elastik ötesi davranış göstermeyen elemanlarda, talep/kapasite değerlerinin hesaplanabilmesi amacıyla kesit ve malzeme bilgileri ile uyumlu aksel yük – moment bileşik etkilerini içeren *P-M2-M3StrengthSectionSteel* tanımı yapılmıştır.
- Dinamik analizlerde dikkate alınan sismik kütle, zafî ağırlıklarla birlikte binanın kullanım amacına uygun olarak belirlenen hareketli yüklerin belirli oranda katılımı ile belirlenmektedir.
- Yapı kullanım amacı ile uyumlu olarak hareketli yük katılım katsayısı n , 0.3 olarak dikkate alınmıştır.
- Her bir ölçeklendirilmiş deprem yer hareketi ivme kaydına ait analizlerin başlangıç adımı, yapı sisteminin sismik ağırlığı altında P- δ etkilerinin dikkate alındığı şekil değiştirmiş taşıyıcı sistemden oluşmaktadır.
- Düşey deprem etkisi, TBDY 2018 4.4.3.2'ye uygun olarak $E_a^{(Z)} \approx (2/3)S_{DS}G$ şeklinde dikkate alınmıştır.
- Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde kütle ve rijitlikle orantılı Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanılmıştır. Rayleigh sönüm oranı hakim doğal titreşim periyotları aralığında %2 olarak dikkate alınmıştır.
- Kolon, çapraz ve BKDKKB için hesaplarda dikkate alınan burkulma katsayısı $K=1.0$ 'dir.

- İncelenen yapının, mevcut durum deprem performansı belirlenirken, malzeme karakteristik dayanımları, mevcut malzeme dayanımları olarak dikkate alınmıştır.



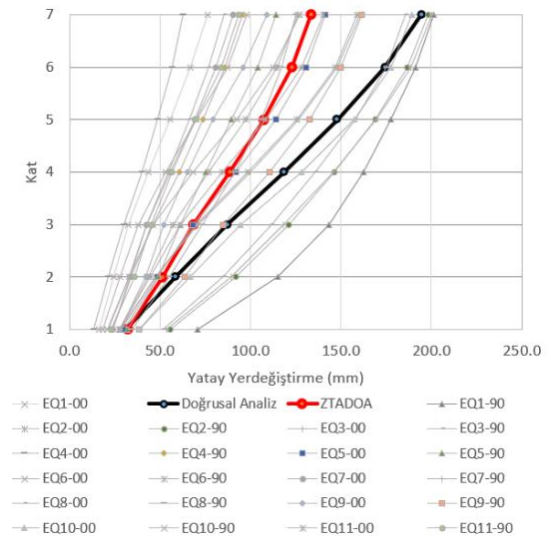
Şekil 14. Plastik mafsalsal iskelet eğrisi, [17].

Deprem Performansının Değerlendirilmesi

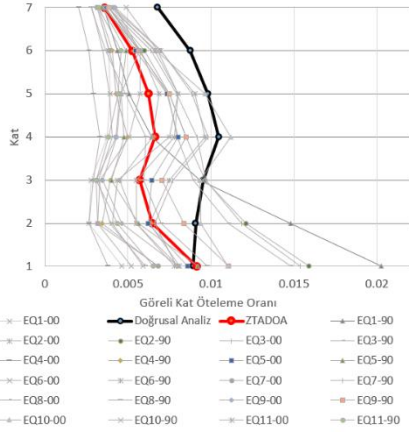
Ölçeklendirilen 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı etkisinde ZTADOA gerçekleştirilerek elemanlara ait en büyük deprem talepleri elde edilmiştir. Her bir deprem kaydı için elde edilen en büyük deprem talepleri; görel kat öteleme oranları, kat kesme kuvvetleri, deprem yükü oranı ve tasarım büyütme katsayıları, bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarının iç kuvvetleri ve bağ kirişi kesme kuvveti-yerdeğiştirme ile eğilme momenti-dönme davranışları olarak elde edilmiştir. Değerlendirmeye esas şekildeğiştirme ve iç kuvvet talepleri de, yapılan 22 adet analiz her birinden elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen talepler, TBDY 2018'de sünellik düzeyi yüksek DMÇÇÇ için öngörülen kapasite tasarım ilkeleri doğrultusunda verilen koşullar göz önünde bulundurularak da değerlendirilmiştir.

ZTADOA sonucu en büyük mutlak değerlerinin ortalaması olarak elde edilen kat yerdeğiştirme değerleri ve görel kat öteleme oranları sırasıyla, Şekil 15'te ve Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekil 15 incelendiğinde, ZTADOA sonucunda elde edilen ortalama-en büyük kat yerdeğiştirme değerlerinin doğrusal hesap yöntemi ile hesaplanan değerlerden daha küçük olarak elde edildiği, benzer durumun Şekil 16'da görel kat ötelemeleri için de gerçekleştiği görülmektedir.



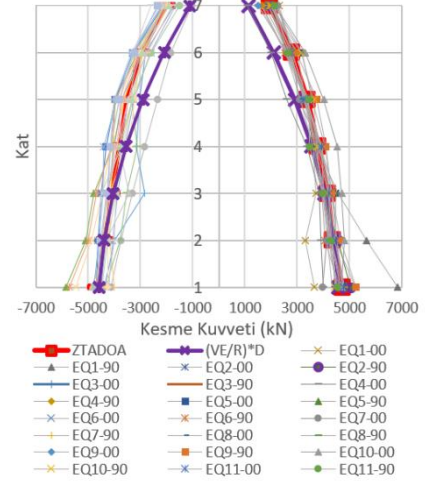
Şekil 15. En büyük mutlak değerler olarak kat yerdeğiştirmeleri ve ortalama değerler.



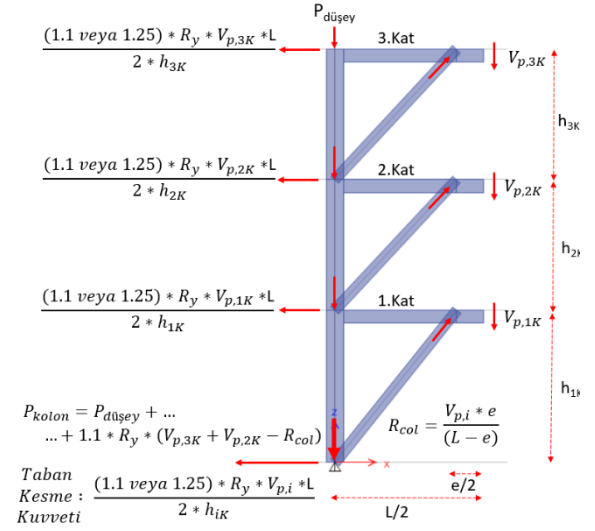
Şekil 16. En büyük mutlak değerler olarak görel kat öteleme oranları ve ortalama değerler.

Doğrusal analiz ve ZTADOA sonucunda elde edilen kat kesme kuvvetleri Şekil 17’de gösterilmektedir. Taşıyıcı sistemin akma durumuna karşı gelen taban kesme kuvveti, tasarım taban kesme kuvvetinin (V_E / R) dayanım fazlalığı katsayısı D ile çarpılarak büyütülmesi şeklinde elde edilebilmektedir. ZTADOA sonucunda elde edilen taban kesme kuvvetinin tasarım taban kesme kuvvetine oranı 2.58 olarak hesaplanmaktadır. Dayanım fazlalığı katsayısı D ’nin dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler için 2.50 olarak verildiği düşünüldüğünde bu katsayının, tüm bağ kirişlerinin plastikleştiği göz önüne alındığında (akma durumu), uygun bir değer olarak belirlendiği anlaşılmaktadır. Mekanizma durumuna ilişkin meydana gelmesi beklenen kat kesme kuvvetleri, taban kesme kuvveti ve kolonlarda meydana gelen iç kuvvet talepleri tipik bir DMÇÇÇ üzerinde gösterilmiştir (Şekil 18). Şekil 19’da mekanizma durumuna bağlı olarak tasarım büyütme katsayıları ile elde edilen kat kesme kuvvetlerinin ZTADOA yöntemiyle elde edilen kat kesme kuvvetlerine oranı sunulmuştur. Kesme kuvveti etkisinde artarak ilerleyen kayma şekilleştirmeleri nedeniyle, bağ kirişlerinin kesme kuvveti dayanımları, beklenen akma gerilmesi ve pekleşme göz önünde tutulduğunda, modelleme aşamasında dikkate alındığı gibi, $V_u = 1.5V_p$ değerine ulaşabilmektedir. Bu durumda Şekil 19 incelendiğinde, $1.25R_y$ ($R_y = 1.3$) ile büyütülen V_p değerlerinin, bağ kirişinin plastikleşmesine karşı gelen yükleme durumunu daha tutarlı bir şekilde temsil ettiği görülmektedir. Ancak bu durumun, özellikle kat sayısının üçten fazla olduğu dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin kolonları için oldukça emniyetli bir tasarım anlamına geleceği düşünülmelidir. Bu durumda en alt kattaki kolon için mekanizma durumuna karşı gelen eksenel kuvvetin, en az üç katın dikkate alınması halinde, $P_{kolon} = 1.1R_y (V_{p,2} + V_{p,3} - R_{col})$ şeklinde hesaplanması uygun görünmektedir. TBDY 2018’de, dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveleri oluşturan çaprazların gerekli dayanımlarının hesabı için ise, bağ kirişlerinin plastikleşmesine neden olan yüklemenin $1.25R_y$ katı ve kirişlerin betonarme döşemeler ile birlikte kompozit olarak çalıştığı BKDKKB elemanları için de $1.1R_y$ katı ile büyütülmesi öngörülmektedir. Buna göre, bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarının boyutlandırılmasında esas alınacak iç kuvvetlerin güvenli bir

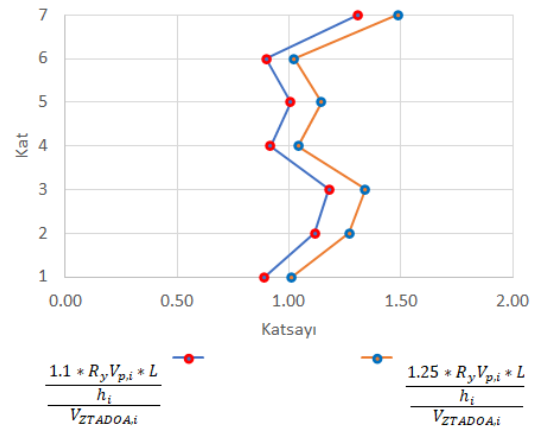
yaklaşıklıkta tahmin edilebilmesi bakımından kapasite tasarımı ilkelerine uygun olarak öngörülen tasarım büyütme katsayılarının yeterli yaklaşıklık sağladığı görülmektedir.



Şekil 17. Ortalama ve en büyük kat kesme kuvvetleri.



Şekil 18. Tipik bir DMÇÇÇ için mekanizma durumunda kat kesme kuvvetleri ve kolon eksenel kuvvet talepleri.



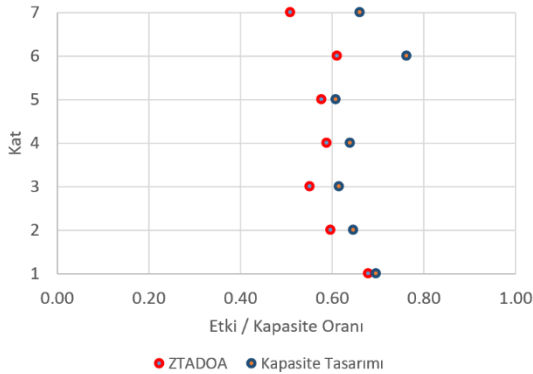
Şekil 19. Kat kesme kuvveti oranları ve tasarım büyütme katsayıları.

Yukarıdaki şekillerde yer alan R_y beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını, $V_{p,i}$ i ’inci katın bağ kirişinin plastik kesme kuvveti dayanımını, h_i

kat yüksekliğini, L çerçeve açıklığını, $V_{ZTADOA,i}$ ZTADOA sonucu elde edilen kat kesme kuvvetini, $P_{düşey}$ kolonda düşey yüklerden oluşan eksenel kuvveti ve P_{kolon} mekanizma durumunda toplam kolon eksenel kuvvetini göstermektedir.

Bağ Kirişi Dışında Kalan Kiriş Bölümü (BKDKKB)

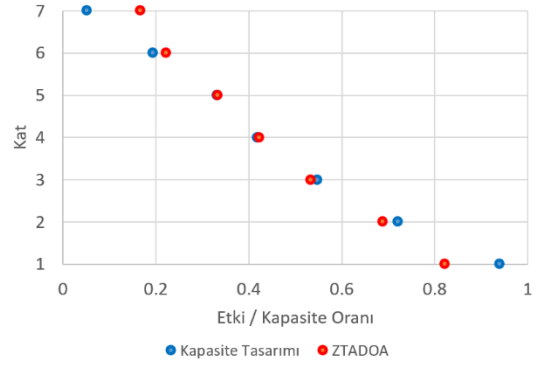
Bağ kirişlerinin dışında kalan kiriş bölümlerinin etki/kapasite oranları, ZTADOA sonucu elde edilen eğilme momenti istemleri ile düğüm noktası denge denklemleri kullanılarak elde edilen eksenel kuvvetlerin etkileşim denklemi $(P/P_c + (8/9)M/M_c)$ yardımıyla birleştirilmesi suretiyle hesaplanmıştır. Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde bağ kirişlerinin dışında kalan kiriş bölümleri için, eksenel yük ve eğilme momenti etkisine bağlı olarak tanımlanan plastik mafsallarda elastik ötesi davranış gözlemlenmemiştir. Şekil 20, ZTADOA sonuçlarının en büyük mutlak değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen etki/kapasite oranları ile kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda hesaplanan etki/kapasite oranlarının dağılımını göstermektedir. Boyutlandırma aşamasında deprem talepleri, kapasite tasarımı ilkelerine uygun olarak, kirişlerin döşeme plağı ile birlikte kompozit olarak çalıştığı varsayıldığında, $(1.1R_y V_p / V_E)$ oranı ile büyütülen iç kuvvetlerden oluşmaktadır. ZTADOA modelinde döşeme plağının etkisi göz önüne alınmamasına rağmen, elde edilen etki/kapasite oranlarının kat hizaları boyunca dağılımları arasında iyi düzeyde bir uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 20. BKDKKB için etki/kapasite oranlarının dağılımı.

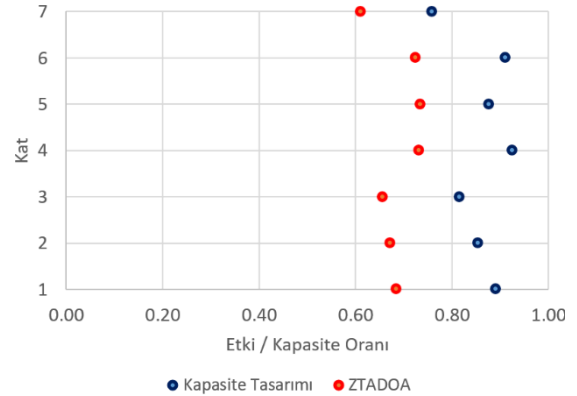
Kolon ve Çapraz Elemanlar

ZTADOA sonuçlarına göre dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveleri oluşturan tüm kolon ve düşey çapraz elemanlarda eksenel yükün ve eğilme momentinin bileşik etkisinde meydana gelen şekildeğiştirmelerin elastik bölge içinde kaldığı görülmüştür. Şekil 21, ZTADOA ile elde edilen en elverişsiz etkiler altındaki kolonlar için en büyük mutlak değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen etki/kapasite oranları ile kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda hesaplanan etki/kapasite oranlarının dağılımlarını kat düzeyinde göstermektedir. Elde edilen etki/kapasite oranlarının bina yüksekliği boyunca belirli bir uyum içinde olduğu gözlenmektedir.



Şekil 21. Kolonlarda etki/kapasite oranlarının dağılımı.

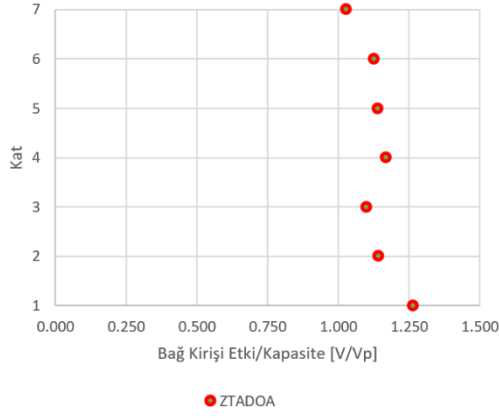
Çapraz elemanlar için hesaplanan ortalama-en büyük etki/kapasite oranlarının dağılımı, her bir kattaki en elverişsiz sonuçlara göre doğrusal ve doğrusal olmayan analizler için Şekil 22'de gösterilmektedir. Şekil 22 incelendiğinde, kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda en elverişsiz durumdaki düşey çaprazlar için, eksenel kuvvet ve eğilme momentinin bileşik etkisi altında hesaplanan iç kuvvet taleplerinin, ZTADOA sonucunda elde edilen iç kuvvet taleplerine oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda, doğrusal analiz sonucunda elde edilen deprem taleplerinin $(1.25R_y V_p / V_E)$ katsayısı ile büyütülmesi güvenli tarafta kalan bir yaklaşım sağlamaktadır.



Şekil 22. Çaprazlarda etki/kapasite oranlarının dağılımı.

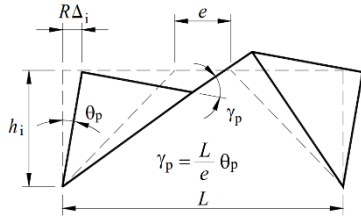
Bağ Kirişleri

Bağ kirişleri TBDY 2018 9.8.2 uyarınca, kesme kuvveti etkisinde plastik şekildeğiştirme gösterecek şekilde ($V_n = V_p$) kısa bağ kirişleri olarak boyutlandırılmıştır. Bağ kirişlerinin uzunlukları ve enkesitleri katlar arasında farklılık göstermektedir. ZTADOA sonucunda en elverişsiz durumdaki bağ kirişlerinin enkesitlerinde meydana gelen ortalama-en büyük kesme kuvveti taleplerinin, plastik kesme kuvveti kapasitelerine oranı Şekil 23'te gösterilmektedir. Tüm katlarda bulunan bağ kirişleri, plastik kesme kuvveti kapasitelerine ulaşmıştır. Kısa bağ kirişlerinde kesme kuvveti etkisinde gerçekleşen elastik ötesi davranışın (kayma şekildeğiştirmeleri), TBDY 2018'de kısa bağ kirişleri için öngörülen $(e < 1.6M_p / V_p)$ uzunluk sınırı ifadesi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

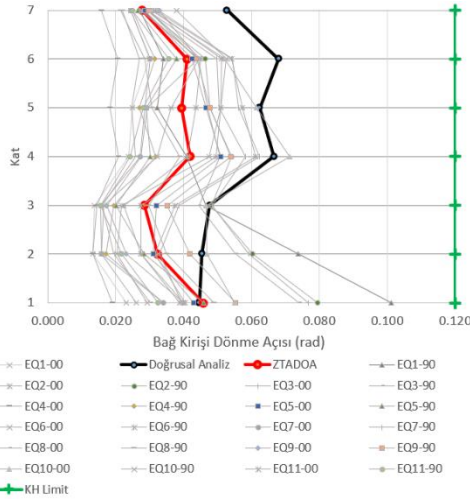


Şekil 23. Bağ kirişi kesme kuvveti talepleri / plastik kesme kuvveti kapasitesi dağılımı.

Bağ kirişi dönme açıları görel kat ötelemesi oranlarına bağlı olarak hesaplanmıştır (Şekil 24), [13]. Şekil 25, bağ kirişlerinde meydana gelen ortalama-en büyük dönme açılarının katlara göre dağılımını göstermektedir. Kısa bağ kirişleri için tasarımda dikkate alınan bağ kirişi dönme açısı sınır değeri 0.08 radyandır. Kontrollü Hasar (KH) şekildeğiştirme sınırı olarak verilen plastik dönme değeri 0.12 radyandır, [13]. Hiç bir katta KH sınır değerinin aşılmadığı görülmektedir.

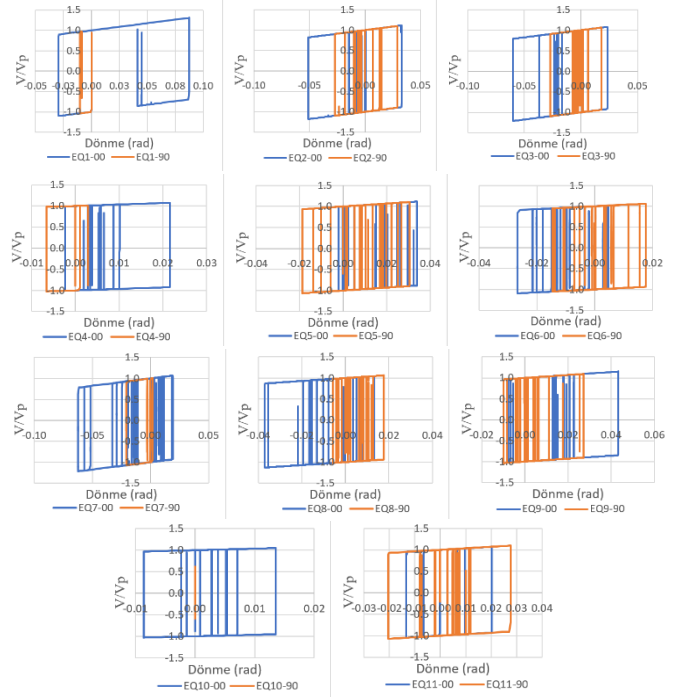


Şekil 24. Bağ kirişi dönme açısı, [13].



Şekil 25. Bağ kirişlerinin dönme açıları dağılımı.

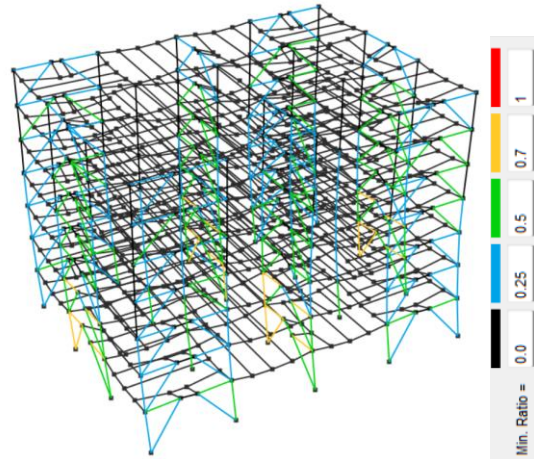
Tipik bir bağ kirişi için kesme kuvveti-dönme eğrileri Şekil 26'da gösterilmektedir. Burada 3 aksı üzerindeki, A ve B aksları arasında bulunan 1.kat bağ kirişinin 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı altında, plastik mafsalsal davranışı sergilenmiştir. İlgili bağ kirişinde en büyük şekildeğiştirme, EQ1-00 (RSN1_HELENA.A_A-HMC180) deprem kaydı altında 123mm, buna karşı gelen bağ kirişi dönme açısı 0.088 radyan ve kesme kuvveti değeri $1.3 \cdot V_p$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 26. 3 aksı üzerindeki A ve B aksları arasında kalan 1. kat bağ kirişi plastik mafsalsal elde edilen kesme kuvveti-dönme eğrileri.

Bina Taşıyıcı Sisteminin Performansı

ZTADOA yöntemi ile hesaplanan en elverişsiz değerlerin ortalamaları esas alındığında; bağ kirişi dışında kalan taşıyıcı sistem elemanlarının elastik bölge sınırları içerisinde kaldığı, sadece bağ kirişlerinin plastik davranış gösterdiği ve hiçbir elemanın ileri hasar düzeyinde bulunmadığı belirlenmiştir. Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların uç birleşimlerinin ve eklerinin yeterli kapasiteye sahip olduğu varsayımına bağlı olarak, incelenen binanın DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde normal performans hedefi olan Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyini sağladığı görülmüştür. Taşıyıcı sistem elemanlarına ait *P-M2-M3StrengthSectionSteel* ve *inelastichinge* tanımlarının EQ1-00 (RSN1_HELENA.A_A-HMC180) deprem kaydı altında elemanlar için elde edilen talep/kapasite oranları Şekil 27'de sunulmuştur.



Şekil 27 EQ1-00 deprem kaydı altında taşıyıcı sistem elemanlarında talep/kapasite dağılımı, [17].

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, TBDY 2018’de belirtilen kapasite tasarım ilkelerine uygun olarak boyutlandırılan, her iki asal doğrultusunda yatay yüklerin süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı yedi katlı bir ofis binasının ZTADOA yöntemi ile deprem performansı irdelenmiştir. Basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilen 11 adet deprem yer hareketi ivme kayıt takımı kullanılarak toplam 22 adet ZTADOA gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların en büyük mutlak değerlerinin ortalaması esas alınarak TBDY 2018’de öngörülen kapasite tasarımı yaklaşımının yeterliliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- 1- Bina taşıyıcı sisteminin doğrusal olmayan davranışı, tasarım prensibi ile uyumlu olarak, sadece bağ kirişlerinin plastik şekil değiştirme göstermesi ile gerçekleşmiştir.
- 2- Tasarımda öngörüldüğü gibi, plastik şekil değiştirmeler kesme kuvveti etkisinde meydana gelmiştir.
- 3- Bağ kirişi dışında kalan çerçeve elemanlarında oluşan şekil değiştirmeler elastik bölge içinde kalmıştır.
- 4- Bağ kirişleri kesme etkileri altında performans hedeflerini sağlayacak yeterli şekil değiştirme kapasitesine sahiptir. Boyutlandırma esaslarına göre hesaplanan en büyük bağ kirişi dönme açısı 0.07 radyan iken, ZTADOA ile hesaplanan en elverişsiz bağ kirişi dönme açısı 0.05 radyan olarak elde edilmiştir.
- 5- Bağ kirişleri enkesitinde oluşan ortalama-en büyük kesme kuvveti etkisi birinci katta ve $1.26V_p$ ’dir.
- 6- Bağ kirişi dışında kalan DMÇÇÇ elemanlarının boyutlandırılmasında, bağ kirişinin plastikleşmesine neden olan yüklemenin pekleşmeli beklenen malzeme dayanımı katsayıları ile büyütülmesi esasına dayalı kullanılan $(1.1R_y V_p / V_E)$ ve $(1.25R_y V_p / V_E)$ büyütme katsayıları, ZTADOA sonucu elde edilen ortalama-en büyük iç kuvvetler ile uyumludur.
- 7- Bağ kirişlerinin yapı yüksekliği boyunca herhangi bir katta bir yığılma göstermeksizin üniforma yakın bir şekilde plastikleştiği gözlenmiştir.
- 8- Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların hiç birinde ileri hasar düzeyi gözlenmemiştir. Buna göre birleşim ve eklerin yeterli dayanıma sahip olduğu varsayıldığında, TBDY 2018 15.8.4 uyarınca, bina taşıyıcı sisteminin mevcut çelik yapılar için DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde normal performans hedefi olarak tanımlanan Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyini sağladığı görülmektedir.

Böylece, süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerin tasarımında TBDY 2018’e göre uygulanan kapasite tasarımı esaslarının, elastik bölge içinde kalması

istenilen elemanların boyutlandırılması için gerekli olan deprem taleplerinin belirlenmesinde, yeterli düzeyde bir yaklaşıklık sağladığı görülmektedir.

Semboller

A_w	: Gövde enkesit alanı, $(h-2t_f)t_w$,
DU	: En büyük dayanım anında şekil değiştirme,
DL	: Dayanım kaybı başladığı andaki şekil değiştirme,
DR	: Dayanım kaybı sonundaki şekil değiştirme,
DX	: En büyük şekil değiştirme,
e	: Bağ kirişi boyu,
E	: Yapı çeliği elastisite modülü,
FU	: En büyük dayanım değeri,
F_x	: X Doğrultusu deprem taban kesme kuvveti,
F_y	: Y Doğrultusu deprem taban kesme kuvveti,
F_y	: Yapı çeliği karakteristik akma gerilmesi,
FY	: Elastik dayanımın son değeri,
FR	: Dayanımın azaldığı durumdaki son değer,
h	: Enkesit yüksekliği,
K	: Burkulma katsayısı,
K_e	: Toplam bağ kirişi rijitliği,
K_b	: Bağ kirişi elemanı için eğilme rijitliği,
K_s	: Bağ kirişi elemanı için kayma rijitliği,
ℓ	: Çubuk eleman hesap boyu,
L	: Çerçeve hesap açıklığı,
M	: Eğilme momenti etkisi,
M_p	: Plastik eğilme momenti,
n	: hareketli yük katsayısı,
P	: Eksenel kuvvet etkisi,
P_c	: Eksenel basınç kuvveti dayanımı,
P_n	: Karakteristik eksenel akma kuvveti dayanımı,
Q	: Genelleştirilmiş iç kuvvet,
Q_y	: Genelleştirilmiş beklenen dayanım,
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_y	: Olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı,
T	: Doğal titreşim periyodu,

T_A	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyot,
T_B	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyot,
T_x	: X Doğrultusu hakim doğal titreşim periyodu,
T_y	: Y Doğrultusu hakim doğal titreşim periyodu,
V	: Kesme kuvveti etkisi,
V_e	: Deprem etkilerinden oluşan tasarım kesme kuvveti
V_n	: Karakteristik kesme kuvveti dayanımı,
V_p	: Plastik kesme kuvveti dayanımı,
W_p	: Plastik mukavemet momenti,
Δ	: Yerdeğiştirme,
θ	: Dönme,
θ_y	: Kesitte akma dönmesi,

Kaynaklar

- [1] Bouwkamp, J., Vetr, M. G. and Ghamari, A., "An analytical model for inelastic cyclic response of eccentrically braced frame with vertical link (V-EBF)", *Case Studies in Structural Engineering*, vol. 6, pp. 31-44, May. 2016.
- [2] Caprili, S., Mussini, N. and Salvatore, W., "Experimental and numerical assessment of EBF structures with shear links", *Steel and Composite Structures*, vol. 28, no. 2, pp. 123-138, Nov. 2018.
- [3] Silva, A. R. D. *et al.*, "Refined Elastoplastic Analysis of Plane Steel Frames Under Extreme Dynamic Loading", in *Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE2013*, Pirenópolis, GO, BRAZIL, 2013, pp. 2-18.
- [4] Popov, E. P., Ricles, J. M. and Kasai, K., "Methodology for optimum EBF link design", in *Proc. Earthquake Engineering Tenth World Conference*, Balkema, Rotterdam, 1992, pp. 3983-3988.
- [5] Bosco, M., Rossi, P.P., "Seismic behavior of eccentrically braced frames", *Engineering Structures*, Vol.31, pp. 664-674, 2009.
- [6] Kobojevic, S. and David, S.O., "Design and Seismic Behaviour of Taller Eccentrically Braced Frames", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 37, pp. 195-208, 2010.
- [7] Durgun, Y. ve diğ., "Dışmerkez Çaprazlı Bir Çelik Perdenin Deprem Performansının Doğrusal Olmayan Dinamik Hesap Yöntemi İle Değerlendirilmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 19, no. 6, pp. 266-274, 2013.
- [8] Khan, N. A., and Bilal, A., "Seismic performance evaluation of eccentrically braced steel frame buildings", *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 41, no. 6, pp. 1121-1131, Dec, 2023.
- [9] Büyük, M.S., "Dışmerkez Çaprazlı Çelik Çerçevesi Çok Katlı Bir Yapının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Müh. İstanbul Teknik Üniv., İstanbul, Türkiye, 2022.
- [10] Esmaili, M. R., "Seismic Performance of Eccentrically Braced Frames Designed According to Canadian Seismic Provisions", M.Sc. thesis, Dept. Building, Civil and Env. Eng., Concordia Univ., Montreal, Canada, 2015.
- [11] Biradar, B.B., *et al.*, "Seismic Evaluation of Eccentric Brace Frame Designed by Force-Based Design and Performance-Based Plastic Design Methods", in *Lecture Notes in Civil Engineering Proc. of 17th Symposium on Earthquake Engineering (Vol.2)*, Vol. 330, pp. 393-407, 2023.
- [12] Mortazavi, P., *et al.*, "Seismic Performance Assessment of Steel EBFs with Conventional Replaceable Yielding Links Designed with ASCE 7-16", *J. Struct. Eng.* ASCE, Vol. 150, no. 5, pp. 1-18, 2024, DOI: 10.1061/JSENDH.STENG-13093
- [13] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [14] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) Eğitim El Kitabı Açıklamalar ve Uygulama Örnekleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2018.
- [15] Türkiye Deprem Tehlike Haritaları, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018. "https://tdth.afad.gov.tr"
- [16] ETABS (ver. 21.0.1) [Computer Software], "Integrated software for structural analysis and design program", Computers and Structures Inc., Berkely, California.
- [17] Perform 3D (ver. 8.1.0) [Computer Software], "Nonlinear Analysis and Performance Assessment of 3D Structures", Computers and Structures Inc., Berkely, California.
- [18] Gilbertson, M. F., "Two nonlinear beams with definitions of ductility", *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 95, no. 2, pp. 137-157, 1966.
- [19] Chen, P. F. and Powel, G. H., "Generalized plastic hinge concepts for 3D beam-column elements.", *EERC Report No. 82-20*, Earthquake Eng. Res. Cntr., Univ of California, Berkeley, 1982.
- [20] Roader, C. W. and Popov, E. P., "Inelastic behavior of eccentric braced steel frames under cyclic loadings", *EERC Report No. 77-18*, Earthquake Eng. Res. Cntr., Univ of California, Berkeley, 1977.
- [21] Kasai, K. and Popov, E. P., "General behavior of WF steel shear link beams." *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 112, no. 2, pp. 362-382, 1986.
- [22] Ricles, J. M. and Popov, E.P., "Composite action in eccentrically braced steel frames." *J. Struct. Eng.* ASCE, Vol. 115, no. 8, pp. 2046-2066, 1989.

- [23] Ricles, J. M. and Popov, E.P., "Inelastic link element for EBF seismic analysis.", *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 120, no. 2, 1994.
- [24] Ramadan, T., and Ghobarah, A., "Analytical model for shear-link behavior." *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 121, no. 11, pp. 1574-1580, 1995.
- [25] Richards, P.W., "Testing protocol for short links in eccentrically braced frames.", *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 132, no. 8, pp. 1183-1191, 2006.
- [26] Badalassi, *et al.*, "Influence of steel mechanical properties on EBF seismic behavior.", *Bull. Earthquake Eng.*, Vol. 11, pp. 2249-2285, 2013.
- [27] Badalassi, *et al.*, "Influence of variability of material mechanical properties on seismic performance of steel and steel-concrete composite structures.", *Bull. Earthquake Eng.*, Vol. 15, no. 4, pp. 1559-1607, 2017.
- [28] PEER Strong Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, California, 2017. "<https://ngawest2.berkeley.edu/>"



A Parametric Study on the Design of Multi-Storey Steel Buildings

Bartu DURAN^{1*}, Güliz BAYRAMOĞLU², Sibel GÜREL³

¹ Istanbul Technical University, Civil Engineering Department, bartu.duran20@gmail.com, Orcid No: 0009-0008-4183-3451

² Istanbul Technical University, Civil Engineering Department, guliz.bayramoglu2@itu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-0921-7380

³ Istanbul Technical University, Civil Engineering Department, gurelsibe@itu.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3750-6366

ARTICLE INFO

Article history:

Received 02 December 2024

Received in revised form 18 February 2025

Accepted 18 February 2025

Available online 26 March 2025

Keywords:

*Multi-story steel buildings,
horizontal loads, top displacement,
inter story drift, moment frame,
concentrically braced frame*

ABSTRACT

Buildings must withstand external loads by presenting limited displacements in order to ensure safety, stability, and functionality. This study focuses on the horizontal load bearing systems of multi-story steel buildings in consideration of lateral displacements. Seven different horizontal load-bearing systems were designed for an eleven-story steel building located in Bursa. The analysis of structures was performed applying same seismic parameter and capacity limits for all. The design procedure was conducted in accordance with current regulations of "Design, Calculation and Construction of Steel Structures-2016" and "Turkish Building Earthquake Code-2018". Fundamental model designed as moment resistant frames in both principal directions. Subsequently, vertical concentric braces were then added in six different configurations, varying in stiffness and layout, to explain their effect on lateral displacements. All models were designed as high ductile according to linear capacity-based analysis method. In this way, progress in horizontal displacement performances of the building under seismic and wind loads was examined using different vertical bracing systems and locations.

Doi: 10.24012/dumf.1594726

* Corresponding author

Introduction

Analysis methods and design criteria of structural systems evolve and improve continually. Despite of rapid change on design criteria, the fundamental goal of design remains same as to construct safe shelters for humanity. Throughout their lifespan, buildings are subjected to a various of external loads. These loads can be classified into two main categories those that act in vertical direction and those that act horizontally. Therefore, building must withstand not only vertical forces induced by gravity and variable loads but also lateral forces due to wind or seismicity. Lateral forces are quite critical for buildings because they can induce secondary stresses and lateral deformations, potentially leading to instability and collapse.

Earthquakes occur when stress accumulated along geological faults exceeds the strength of rocks, causing a sudden rupture and release of energy in the form of seismic waves. Seismic waves induce ground motion and energy carried by them is absorbed by buildings via deformations due to displacements. Excessive displacements due to earthquake causes uneven stresses, compromising structural integrity and potentially causing premature failure that prevents the building from reaching its intended performance level. Deformations and displacements should be limited

taking account of their primary effects on strength and secondary effects on stability of structure. While excessive lateral displacement can compromise structural integrity under ultimate conditions. It can also cause several problems under service loads, from failure of mechanical equipment, to loss of function of non-structural elements, to negative effects on human psychology.

Almost every design code including Turkish Building Earthquake Code-2018 (TBDY-2018) limits lateral displacements and joint rotations in structures proposing some inter story drift limits [1]. But there is no precise value to limit top displacement of the structure under wind loads. As Design, Calculation and Construction of Steel Structures-2016 (ÇYTHYEDY-2016) states that in chapter 15.3 that in order to prevent damage to non-structural elements of the building, under wind loads, and to prevent their function from being adversely affected, horizontal displacements must be limited. The horizontal displacement limits of the structure may vary depending on the type of building and the type of cladding and partitions [2]. As indicated by Lawrence G. Griffis once damage thresholds are determined from tests or estimated, it remains only to establish an appropriate limit for different building components [3]. This study examines horizontal load bearing systems of multi-storey steel buildings such as vertical concentric

braces to limit horizontal displacements. It elucidates the relationship between layout of vertical braces within overall structural system and horizontal displacement. In this context, a reference model consisted of moment resistant frames was used at first. Structural elements were designed using LRFD load combinations specified in ÇYTHYEDY-2016. For service load combinations, the serviceability limit state combinations used according to ÇYTHE-2016 Section 9. Furthermore, structural system elements are designed to withstand their strengths at mechanism state of loading. Ignoring horizontal displacements, it was designed within the limits of capacity. Then, attempts were made to reduce horizontal displacements by increasing the stiffness of the columns and beams separately. As result of these attempts, inadequacy of the structural system to carry horizontal loads was demonstrated and the importance of vertical stability braces was emphasized. Later, six different vertical brace layouts were assigned for the same building to determine the most appropriate layout under seismic and wind loads.

Horizontal Displacement Limits for Tall Buildings

Several codes interest with lateral displacement limits for structural systems in case of both seismic and wind loading. Seismic design codes usually restrict inter-storey drifts while limit values are given for top lateral displacement under wind loading by considering mostly serviceability limit state. As per 4.9.1 clause of TBDY-2018 inter storey drifts and effective drifts obtained from non-reduced seismic loads are restricted obeying to equation 4.34b [1].

$$\lambda \times \frac{\delta_{imax}}{h_i} < 0.016\kappa \quad (1)$$

$$\delta_{lim} = \delta_{imax} \leq \frac{0.016\kappa \times h_i}{\lambda} \quad (2)$$

Because structure is made of steel κ is selected as 0.5 and λ is calculated as follow.

$$\lambda = \frac{S_{ae}(T)^{(DD-3)}}{S_{ae}(T)^{(DD-2)}} = \frac{0.0358}{0.0882} \cong 0.4058 \quad (3)$$

$$\delta_{lim} = \frac{0.008 \times 3800}{0.4058} = 74.91\text{mm} \quad (4)$$

In this study, a single limit value for all floors has been reached in terms of inter storey displacement limit since the floor height in the building is the same and 3800 mm.

As stated in the book of Tall Building Structures Analysis and Design “If a tall flexible structure is subjected to lateral or torsional deflections under the action of fluctuating wind loads, the resulting oscillatory movements can induce a wide range of responses in the building’s occupants, ranging from mild discomfort to acute nausea” [4]. In case of wind loading, commonly used limits for top lateral displacement vary between 1/400 and 1/600 of the total building height, depending on the building type, facade cladding type, and material but the most common one is $H/500$ as mentioned in AISC 360-22 [5].

Structural systems for resisting lateral loads encompass a range of options, including moment resistant frames with varying ductility levels and braced frames. Ductility is a behaviour defined as the ability to undergo significant plastic

deformation in structural members before failure. This enables buildings to absorb energy and redistribute stresses among sections of structural members, and is crucial for structural safety and design flexibility. But it is clear that the higher ductility leads the larger deformations.

Structural Analysis and Design Methods

In this study, an eleven-storey steel building was designed respect to provisions of TBDY-2018 [1] and ÇYTHYEDY-2016 [2]. The computer program, ETABS was utilized as addition to hand calculations [6]. Dead loads were obtained from material catalogues and TS-498 [7]. Wind loads are obtained from TS EN 1991-1-4 [8]. Seismic loads were calculated by modal analysis method and base shear force was increased respect to “Equivalent Earthquake Load Method”.

Definition of Designed Building

The structure, which will be constructed as a residential building in Bursa, has eleven floors, each 3.8 metres high. There are seven openings of 7 meters in both principal direction at every floor level. Therefore, the overall height reaches 41.8 meters, and the plan dimensions are 49 meters. The composite deck supported by secondary beams is the same in all floors, and in all models. IPE270 secondary beams designed as simple beams, divide 7 meters opening into three equal parts.

The floors of the structure were composite deck supported by secondary beams. HEB profiles were used for columns, HEA profiles for beams and IPE profiles for secondary beams although dimensions of the elements were modified to design within capacity limits on every model basis. Members of concentric braces were formed by TUBO sections. As per ÇYTHYEDY-2016 Section 6.2 secondary effects of non-linearity were taken consideration by reducing moments of inertia of sections [2].

As per Table 3.1 of TBDY-2018, this building is classified as Type 3 according to purpose of use and it belongs to Class 4 according to height classification [1]. Seismic data in the site area with a ground class of Z_c was obtained through the AFAD interface [9]. In accordance with Table 3.4 of TBDY-2018, the building was designed considering strength, and taking account [DD-2] earthquake and [KH] damage level [1].

Base Model with Special Moment Frames

Special Moment Frames of the base model have HEB cruciform column sections. Because frames resist horizontal forces in both principal directions, all beam to column connections are fully moment-resisting connections. Section dimensions were selected to satisfy all SMF requirements except the limitation of lateral displacements and joint rotations.

The reason these moment frames are called special systems, is because of additional limitations. They are detailed to the high-energy absorption capacity in other words high ductility, and achieve superior behaviour during strong earthquakes. Inelastic behaviour is accommodated by plastic hinges in beams at beam-column joints as well as at column bases [10]. TBDY-2018 allows the design of high-ductile frames if requirements are met, such as preserved connection

rotation limit (0.04 rad) and strong column weak beam capacity [1]. In addition, because of column buckling is not a ductile phenomenon, columns are expected to remain stable under maximum compression and tension forces [11]. Design codes prefer different alternatives to capture these forces. TBDY-2018 uses overstrength factor to consider these effects, so column axial capacity is controlled with axial forces that produced by amplified earthquake forces. After the initial design, it is observed that section sizes are controlled by $1.2G+Q+0.2S+E_d^{(H)}+0.3E_d^{(Z)}$ load combinations, then the section dimensions are increased disregarding difficulties on the arrangements of details. In this context, first increasing column dimensions then beam dimensions separately were utilized to limit lateral displacements in wind and seismic cases. Because loading and geometry of structure are same in both principal direction, analysis results for them were nearly identical. Therefore, the study was carried out on X-direction displacements. In case of seismic loading, relationship of inter storey drift and column section are presented in Table 1 and Figure 1.

Table 1. Inter storey drift versus column moment of inertia.

Cruciform Column Profile	Beam Profile	Inertia Moment of Column [cm ⁴]	Δ_{ix} [mm]	Δ_{lim} [mm]
HE450B	HE300A	91703	214.6	74.91
HE500B		119918	198.3	
HE550B		149139	186.0	
HE600B		183810	175.5	
HE700B		271578	155.7	
HE800B		374396	144.2	
HE900B		510407	128.0	
HE1000B		661685	115.3	

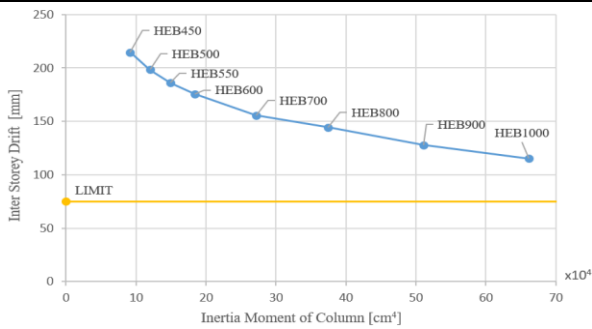


Figure 1. Relationship between column moment of inertia and inter storey drift.

Table 2 presents effects of change in beam sections on floor displacement. In case of seismic loading, relationship of inter storey displacement and beam section is shown in Figure 2.

Table 2. Inter storey drift versus beam moment of inertia.

Beam Profile	Cruciform Column Profile	Inertia Moment of Beam [cm ⁴]	Δ_{ix} [mm]	Δ_{lim} [mm]
HE300A	HE450B	18260	214.6	74.91
HE340A		27690	152.9	
HE360A		33090	133.1	
HE400A		45231	105.1	
HE450A		63720	83.9	
HE500A		86970	69.9	
HE550A		111900	60.9	
HE600A		141200	54.1	

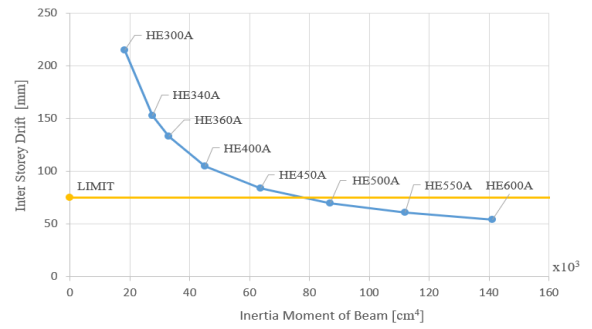


Figure 2. Relationship between beam moment of inertia and inter storey drift.

In case of wind loading, relationship of top lateral displacement with column sections are presented in Table 3 and Figure 3.

Table 3. Top displacement versus column moment of inertia.

Cruciform Column Profile	Beam Profile	Inertia Moment of Column [cm ⁴]	Δ_{ix} [mm]
HE450B	HE300A	91703	93.4
HE500B		119918	88.6
HE550B		149139	84.9
HE600B		183810	81.7
HE700B		271578	75.7
HE800B		374396	70.7
HE900B		510407	65.9
HE1000B		661685	61.9

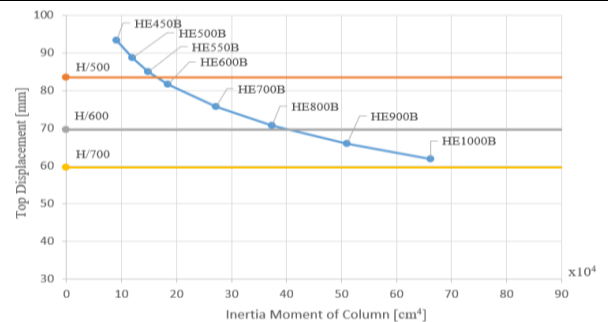


Figure 3. Relationship between column moment of inertia and top displacement.

In case of wind loading, relationship of top lateral displacement with beam sections are presented in Table 4 and Figure 4.

Table 4. Top displacement versus beam moment of inertia.

Beam Profile	Cruciform Column Profile	Inertia Moment of Beam [cm ⁴]	Δ_{ix} [mm]
HE300A	HE450B	18260	93.4
HE340A		27690	64.9
HE360A		33090	56.0
HE400A		45231	43.7
HE450A		63720	34.1
HE500A		86970	27.8
HE550A		111900	24.0
HE600A		141200	21.1

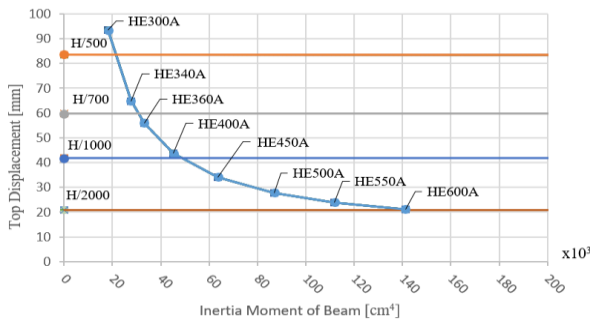


Figure 4. Relationship of beam moment of inertia and top displacement.

Inspections indicated that even though strong column weak beam principle was ignored, base model that designed with special moment frames did not succeed to remain under lateral displacement limit with reasonable sections. The top lateral displacement in seismic loading grows to impractical values as 5-20 times of the top displacement observed in wind loading. It is deduced that vertical braces supporting the building against lateral loads is compulsory for an economic design even the building is not so tall. Therefore, following models are constructed with vertical concentric braces.

Models with Concentric Braced Frames (CBF)

As can be seen from the first model, special moment frames are not economically feasible to limit displacement in high-rise buildings. As, the initial design, it is found that section sizes are controlled by $1.2G+Q+0.2S+DE_d^{(H)}+0.3E_d^{(Z)}$ load combinations. The following models have vertical concentric braces and the most reasonable bracing layout among the structural system is investigated.

Vertical bracing prevents horizontal displacements of frame and uses diagonal members having an angle from horizontal axis. These diagonal members carry axial and shear forces and they connect to beams and columns at their ends. Diagonal bracing is commonly found in three configurations: concentric X-bracing, V-bracing and inverted V-bracing. Of these, concentric X-bracing is the most commonly used option due to its efficiency and balanced resistance to two-way lateral forces. In order to ideal seismic behaviour, they must be designed as having appropriate strength and ductility [12]. CBFs typically have limited ductility compared to moment resistant frames. Because any instability occurrence (buckling) does not permit the diagonal compression members to reach their strength capacity. The direct load transfer mechanism of concentric braced members limits horizontal displacements effectively and offers stiffer frames.

Brace fracture is preferred failure initial failure mode, but it does not in itself trigger immediate collapse [13]. So, diagonal braces are designed as preserved members and until the intended behaviour of the system occurs, all other bearing members must retain their capacities. Tension and compression capacities of diagonal members directly affect design sizes of other components (columns and beams). Therefore, in order to capture lateral displacement and brace layout relation, all columns and beams are designed with LRFD load combinations at capacity limit. The change in the weight of the structure is recorded as dependent variable.

In models with concentric braced frames, bracing layout was same in both principal directions. However, only the vertical braces resisted to horizontal force in the direction X while the braces and planar frame with I section columns worked together against horizontal force in the direction Y. Therefore, lower displacements were observed in the direction Y. Bracing layout of six different models are presented below. In models from the first to the fourth, vertical braces are situated at outer faces or facades of the building, while in the fifth and sixth models braces are at the inner axes to model a stiffer core. Vertical bracing layouts are shown with the elevation views and braced axis names are given below.

Table 5. Braced axes names

Model Number	Braced Axis Name
Model 1	A, H,1,22
Model 2	A, H,1,22
Model 3	A, H,1,22
Model 4	A, H,1,22
Model 5	C, F,7,16
Model 6	C, F,7,16

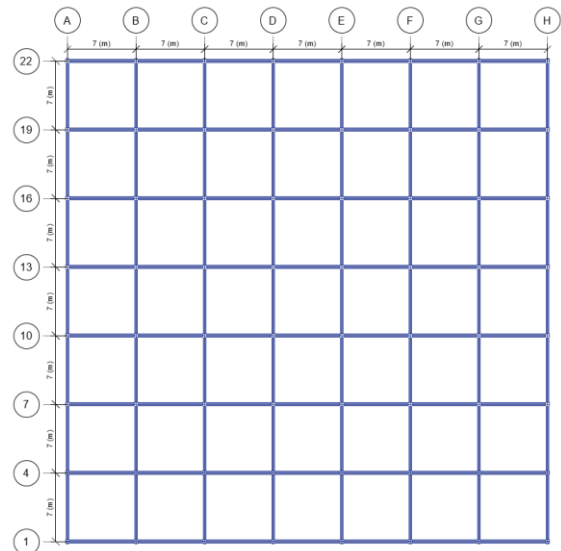


Figure 5. Grid plan of structure.

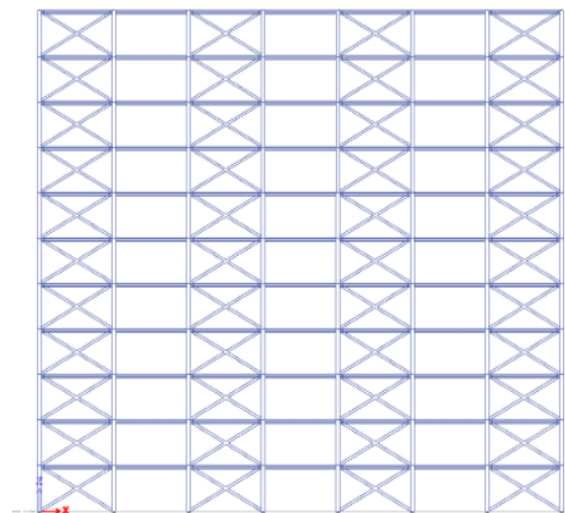


Figure 6. Elevation view of braced axes model 1.

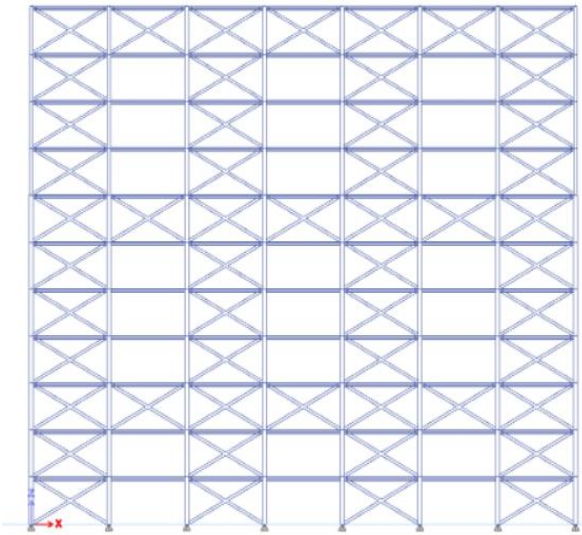


Figure 7. Elevation view of braced axes model 2

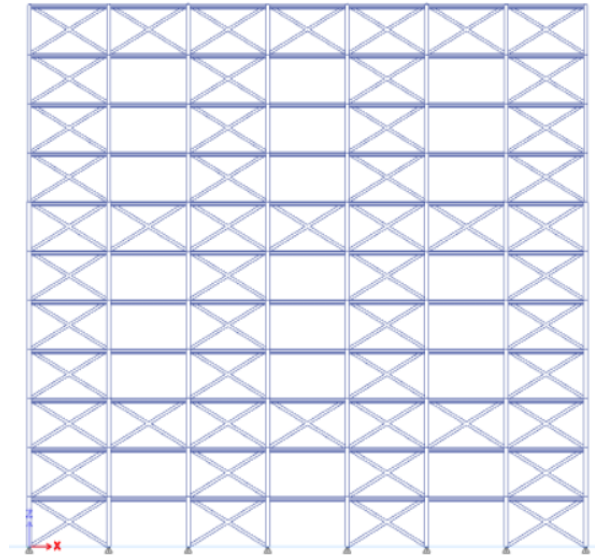


Figure 10. Elevation view of braced axes in model 5

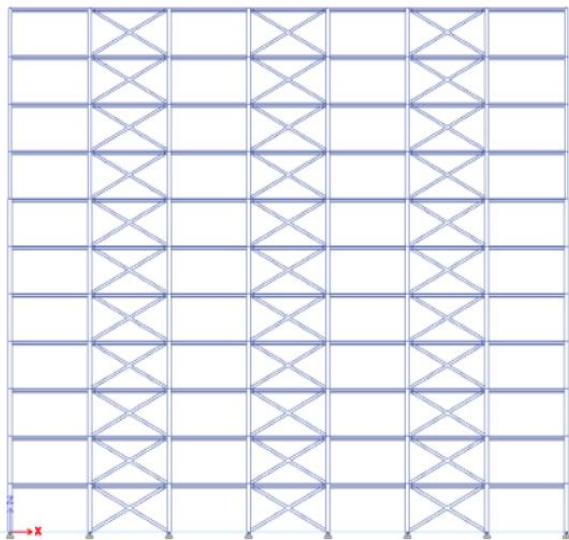


Figure 8. Elevation view of braced axes model 3

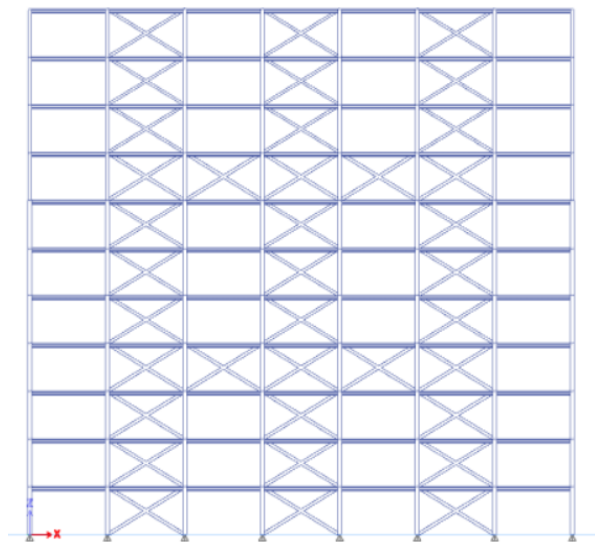


Figure 11. Elevation view of braced axes in model 6.

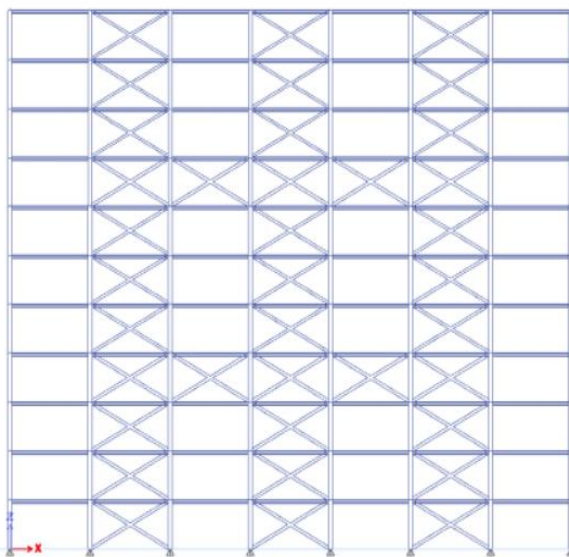


Figure 9. Elevation view of braced axes model 4

In the case of seismic loading, comparison of the models in terms of structural weight and lateral displacements is given in Figure 12 (as X-direction) and Figure 13 (as Y-direction).

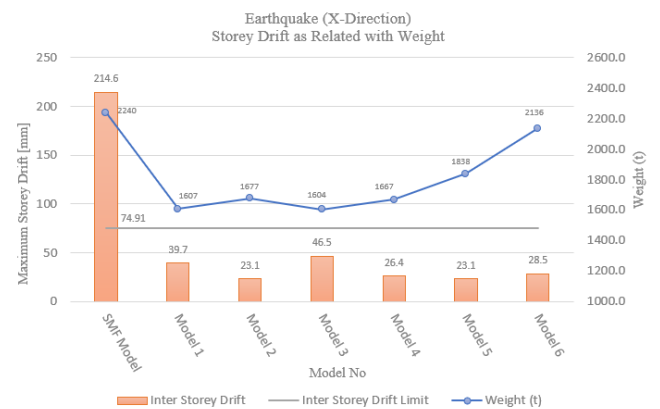


Figure 12. Comparison of models considering by earthquake loads in X-direction

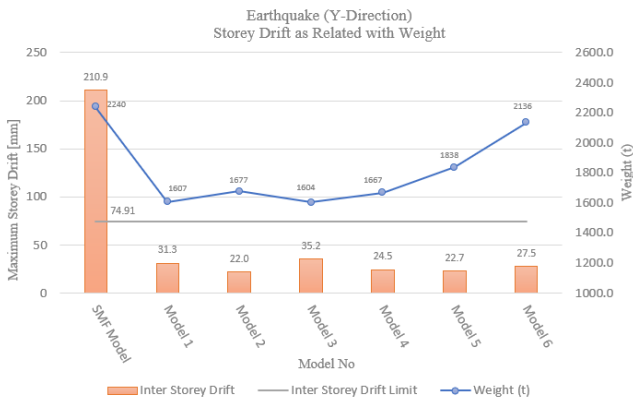


Figure 13. Comparison of models considering by earthquake loads in Y-direction

In the case of wind loading, comparison of the models in terms of structural weight and lateral displacements is given in Figure 14 (as X-direction) and Figure 15 (as Y-direction).

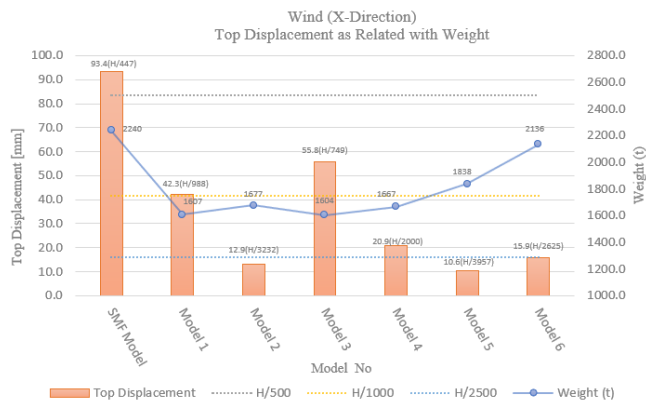


Figure 14. Comparison of models considering by wind loads in X-direction

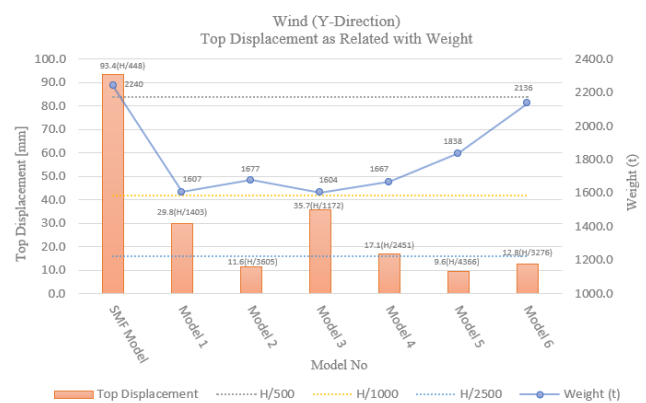


Figure 15. Comparison of models considering by wind loads in Y-direction

Finally, Figure 16 and Figure 17 present comparisons of top lateral displacements produced by seismic load and wind load for models with braced frames.

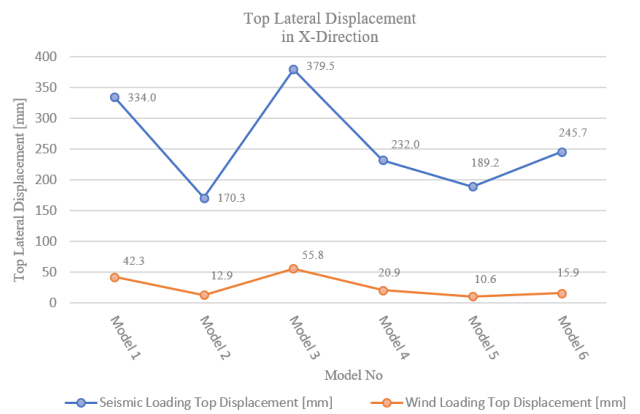


Figure 16. Comparison of X direction top displacements in seismic and wind loading.

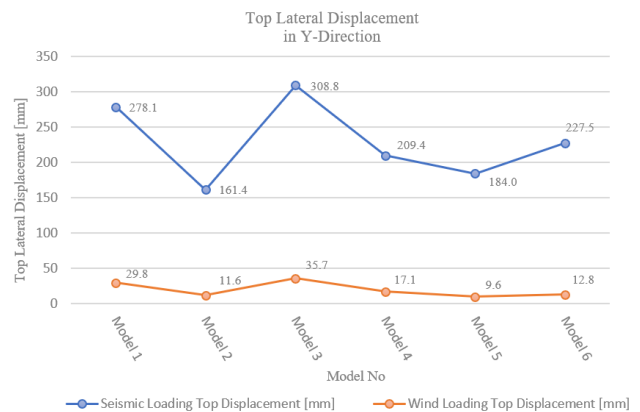


Figure 17. Comparison of Y direction top displacements in seismic and wind loading.

Conclusions

Under horizontal loadings such as earthquake and wind, multi-storey steel buildings produce severe lateral displacements. Horizontal displacements induced by wind loading is much smaller than inter storey drifts observed in earthquake at floor levels, in which weights concentrate. Structural analysis and design of the model with special frames proved that increasing beam rigidity have significant effect on limiting lateral displacements compared to increasing column rigidity. However, it can be seen that use of moment-resistant frames do not assure to limited displacements and is not an economical solution when strong column-weak beam principle is applied in design. Structural system of high-rise buildings requires vertical braces evidently under horizontal earthquake loads. Lateral displacements reduce if vertical braces continue along intermediate floors in the load direction, even though these additional braces cause a slight increase in weight. Despite of, Model 4 was 3.9 percent heavier than Model 3 its maximum storey drift produced by seismic load in the direction X was 43.2 percent less than Model 3. Reduction percentage of maximum storey drift was 30.4 percent in the direction Y. When the performances of Model 1 and Model 3 are compared, it is deduced that bracing at the outer spans is an optimum choice. Maximum storey drift of Model 1 was 14.6 percent less than ones of Model 3 in the direction X seismic loading even though their weights are nearly same.

It is also observed that use of vertical braces in the outer axes or facades has an advantage relative to use them in inner axes. Here, it should be remembered that studied building is symmetric and regular in plane. Therefore, torsional effects of earthquake on structural system are not observed. Use of vertical braces in the inner axes in a way that they build a rigid core, could be necessary if planar irregularities and torsional effects exist. Although they limit horizontal displacements, they can also cause over-designed members and increase in gravitational loads depending on earthquake design provisions.

Results of wind loading support the advantages of continuous braces along intermediate floors. Despite being 4.4 percent heavier, Model 2 exhibited 69.5 percent less wind-induced top displacement in the X direction compared to Model 1. In case of Y- direction wind loading, Model 2 performed better than Model 1 with the less top displacement of 61.1 percent. Nevertheless, effect of bracing on lateral top displacement is not significant in wind loading as much as in seismic loading. Earthquake loading governs the design of multi-storey buildings in the context of limited lateral displacements.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

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

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

References

- [1] Turkish Building Earthquake Code, TBDY-2018, 2018.
- [2] Design, Calculation and Construction of Steel Structures-2016, ÇYTHYEDY,2016
- [3] G. L. Griffis, "Serviceability Limit States Under Wind Load", *Engineering Journal*, vol. 30, no. 1, pp.1-16, Mar, 1993, DOI: 10.62913/engj.v30i1.606.
- [4] B. S. Smith, Alex Coull, "Design Criteria" in *Tall Building Structures Analysis and Design*, United States: John Wiley & Sons, Inc.,1991, ch.2, sec. 2.5, pp. 13.
- [5] Specification for Structural Steel Buildings. ANSI/AISC 360-22, 2022.
- [6] ETABS (ver. 21.0.1) [Computer Software], "Integrated software for structural analysis and design program", Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
- [7] Design Loads for Buildings, TS-498, 2021.
- [8] Actions on Structures – Part 1-4: General Actions- Wind Actions, TS EN 1991-1-4, 2007.
- [9] Turkey Earthquake Hazard Maps, Disaster and Emergency Management Presidency,2018. "<https://tdth.afad.gov.tr/>"
- [10] R. Hamburger, J. Malley, "Seismic Design of Steel Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers" in *NHRP Seismic Design Technical Brief No. 2*, Gaithersburg, MD, USA, 2016. DOI: 10.6028/nist.gcr.16-917-41
- [11] M. Bruneau, C. M. Uang, R. Sabelli, "Design of Ductile Moment Resisting Frames" in *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw Hill Professional, 1998, ch. 8, pp. 352.
- [12] M. Bruneau, C. M. Uang, R. Sabelli, "Design of Ductile Concentrically Braced Frames" in *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw Hill Professional, 1998, ch. 9, pp. 503.
- [13] R. Sabelli, C. W. Roeder, J. F. Hajjar, "Seismic Design of Steel Special Concentrically Braced Frames Systems: A Guide for Practicing Engineers" in *NHRP Seismic Design Technical Brief No. 8*, Gaithersburg, MD, USA, 2013.



Eğrisel Savaklarda Kret Yüksekliğinin ve Savak Uzunluğunun Su Yüzü Profiline Etkisi

Effect of Crest Height and Weir Length on Water Surface Profile in Curvilinear Weirs

Eralp Öbek^{1*}, M. Emin Emiroğlu²

¹ Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, eralpobek@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7207-7812>

² İstanbul Gelişim Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, memiroglu@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3603-0274>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 17 Ocak 2025
Revizyon 15 Şubat 2025
Kabul 3 Mart 2025
Online 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

Su yüzü profili, Eğrisel savak, Akım çizgisi, Debi

Savaklar, hidrolik mühendisliğinde suyun akışını kontrol etmek, akımı düzenlemek ve debi ölçümleri yapmak amacıyla yaygın olarak kullanılırlar. Bu çalışmada, deney kanalına yerleştirilen eğrisel savaklar üzerindeki akımın su yüzü profili hassas ölçümlerle belirlenmiştir. Su yüzü ölçümleri için memba bölgesinde beş adet, savak kreti üzerinde on bir adet ve mansap bölgesinde ise yedi adet ölçüm noktası belirlenmiştir. Böylece belirlenen okuma noktaları ile akımın farklı bölgelerdeki davranışı daha hassas bir şekilde gözlemlenmiş ve su yüzü profilinin daha doğru analiz edilmesine imkân sağlanmıştır. Farklı akım koşulları ve farklı savak geometrileri için gerçekleştirilen deneylerde su yüzü profilinde oluşan değişimin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, savak uzunluğundaki ve savak yüksekliğindeki değişimlerin su yüzü profilinde oluşturduğu değişimler deneysel olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca, savak yüksekliğinin artması ile birlikte su yüzü profili eğriliklerinin de arttığı belirlenmiştir. Genel olarak, debinin artması ile birlikte (nap yükündeki artışla) su yüzünün eğriliği daha belirgin hale gelmiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 17 January 2025
Received in revised form 15 February 2025
Accepted 3 March 2025
Available online 26 March 2025

Keywords:

Water surface profile, Curvilinear weir, Streamline, Discharge

Weirs are widely used in hydraulic engineering to control the flow of water, regulate the flow and make flow measurements. In this study, the water surface profile of the flow over the curvilinear weirs placed in the experimental channel was determined by precise measurements. For the water surface measurements, five measurement points in the upstream area, eleven measurement points on the weir crest and seven measurement points in the downstream area were determined. Thus, the behavior of the flow in different regions was observed more precisely with the determined reading points and the water surface profile was analyzed more accurately. The experiments carried out for different flow conditions and different weir geometries aimed to determine the changes in the water surface profile. In the study, the changes in the water surface profile caused by changes in weir length and weir height were experimentally observed. It was also determined that the curvature of the water surface profile increased with the increase in weir height. In general, the curvature of the water surface became more pronounced with increasing flow rate (increase in nappe load).

Doi: 10.24012/dumf.1621235

* Sorumlu Yazar

1. Giriş

Savaklar, bir akarsu enkesiti boyunca akım akım hızı, su seviyesi, debisi, enerji seviyeleri ve akım türü gibi akım özelliklerini değiştirmek amacıyla inşa edilen hidrolik yapılardır. Hidrolik alanında savaklar; suyun güvenli tahliyesini sağlamak, debi ölçümü yapmak, su seviyesini kontrol etmek ve taşkın riskini azaltmak gibi geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Su mühendisliğinde savaklar, literatürde boyutsuz akım derinliğine (h/L) göre dört gruba ayrılmıştır, burada, h =savağın memba bölgesinde kretten ölçülen akım derinliği; L =savak uzunluğunu ifade etmektedir [1-3]. Bu gruplar, uzun başlıklı savaklar ($0 < h/L \leq 0.1$), geniş başlıklı savaklar ($0.1 < h/L \leq 0.4$), kısa başlıklı savaklar ($0.4 < h/L \leq 2$) ve keskin kenarlı savaklar ($h/L > 2$) olarak isimlendirilir [1-3]. Eğrisel savaklarda, su yüzeyinin akım doğrultusunda izlediği yolun (akım çizgilerinin) eğrisel bir yörüngeyi takip etmesi, savak türünün belirlenmesinde etkin olmaktadır. Bu eğrisel yapı, akımın karakteristik özelliklerini doğrudan etkilediği için, h/L oranına bağlı olarak geniş başlıklı savak kategorisinde değerlendirilmesine rağmen, akım çizgilerinin düz olmaması ve daha yüksek debi katsayısı değerlerine sahip olması nedeniyle söz konusu gruptan ayrı tutulmaktadır [4]. Yine eğri savaklar üzerindeki akışın, irrotasyonel olduğu, yani akışın herhangi bir noktada dönme hareketi ya da girdap oluşturmadığı, çevrimsiz olduğu kabul edilmektedir [5].

Literatürde, suyun savak yapısı üzerinden geçişi sırasında oluşan akımın özelliklerinin ve su yüzeyi profillerinin belirlenmesine yönelik çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, farklı savak türleri ve akım koşulları için su yüzü profillerinin davranışlarının incelenmesi amaçlanmış ve özellikle savakların hidrolik performansını anlamak ve optimize etmek amacıyla değerli veriler sunulmuştur [4-9]. Ramamurthy vd. [10], geniş başlıklı savaklarda, memba köşesinin yuvarlatılmasının akım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hager ve Schwalt [2], geniş başlıklı savakların akım özelliklerinin incelenmesi amacıyla deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, savağın memba yüzünün yuvarlatılması durumunda, keskin kenarlı savaklara göre daha yüksek debi katsayısı değerlerinin elde edildiğini ve su yüzü profilinin daha yumuşak bir geçiş yaptığını belirlemişlerdir. Azimi ve Rajaratnam [3] sivri ve yuvarlatılmış memba yüzüne sahip savakların üzerindeki akım özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmalarda kullanılan savaklarda, genel olarak memba ve mansap uç kısımları akıma dik olacak şekilde konumlandırılmıştır. Eğimli memba yüzeyi, rüsubat ve sediment birikiminde azalmaya katkı sağladığı ve böylece debi katsayısını artırdığı belirlenmiştir. Benzer şekilde eğimli mansap yüzeyi olması durumunda yüksek akım hızlarında oyulma oluşumunun önemli derecede azaltıldığı bulunmuştur. Araştırmacılar bu bulgular dâhilinde, trapez geniş başlıklı savakların incelenmesine yönelmişlerdir [11]. Örneğin Goodarzi vd. [12], farklı memba yüzü eğimlerine sahip dikdörtgen geniş başlıklı savaklar üzerine laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Eğimleri 90° (düz) ile 10° arasında değişen sekiz farklı savak konfigürasyonu ile memba yüzü eğiminin debi katsayısı ve su yüzü profili üzerindeki değişimini incelemişlerdir. Yukarıda da belirtildiği üzere, savak performansını optimize etmek için savak geometrisinde değişiklikler yapmak, araştırmacıların

ana hedefi olmuştur. Bu çabalar sonucunda, kısa veya dar başlıklı savakların, geniş ve uzun başlıklı savaklara kıyasla daha yüksek debi katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca daha kararlı taşma modeli (yani akımın, savak üzerinden geçişi sırasında suyun dalgalanmasının daha az olduğu ve böylece daha düzenli bir akış deseni oluşturduğu) gibi bazı avantajlara da sahip olduğu görülmüştür [13, 14]. Kısa ve dar başlıklı savaklar; ogee, dairesel başlıklı ve hidrofoil savaklar olmak üzere üç farklı türde sınıflandırılmıştır [14]. Bos [13], diğer araştırmacıların deneysel bulgularını derlemiş ve dairesel başlıklı savakların debi katsayısını belirlemek için bir dizi deneyler yürütmüştür. Amerika Birleşik Devletleri İslah Bürosu (USBR) [15] ve Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği (USACE) [16], ogee profilinin tasarımı için prosedürler sunmuşlardır. Ramamurthy ve Vo [5], belirli bir boyutsuz savak yüksekliği aralığında, dairesel başlıklı savakların memba ve mansap eğim açılarının debi katsayısı ve akım karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Memba eğimi açısının, dairesel savaklarda debi katsayısı üzerinde bir değişiklik meydana getirmediğini belirtmişlerdir. Oksal vd. [4], dairesel başlıklı savak akımlarının sayısal analizini yapmışlardır. Araştırmacılar dairesel savakların etrafındaki akımın hız alanını, basınç dağılımını, akım çizgilerini ve hız vektörlerini, ANSYS Fluent yazılımını kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Dönmez ve Lekesiz [17], silindir savakların akım karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar dört farklı çap için silindir savakların debi katsayısının savak geometrisindeki değişim ile olan ilişkisini incelemişlerdir. Şimşek vd. [8], eğrisel geniş başlıklı savakların üzerindeki akımı, ANSYS Fluent yazılımı ile analiz etmişlerdir. Üç farklı türbülans modeli kullanarak kesit boyunca akım hızlarını ve su yüzü profillerini belirlemişler ve elde ettikleri bulgular ile literatür karşılaştırması yapmışlardır.

Bu çalışmada, bir açık kanala yerleştirilmiş eliptik eğri şekline sahip savaklar üzerindeki su yüzü profili değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, elektromanyetik debimetre kullanılarak dört farklı debi için yapılmıştır. Dört farklı eliptik eğri savak için su yüzü profili üzerinde toplam yirmi üç farklı okuma noktası seçilerek anlamlı deneyler gerçekleştirilmiştir.

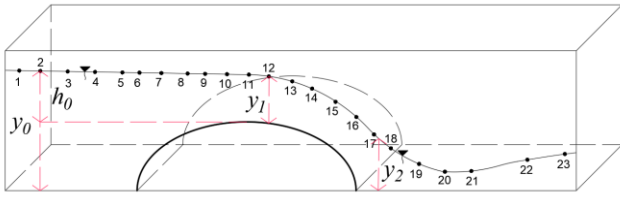
2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarında bulunan 12 m uzunluğunda, 0.40 m genişliğinde ve 0.50 m yüksekliğindeki, yan duvarları cam ve tabanı paslanmaz çelikten imal edilen deney kanalında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde; 0.80, 1.00 ve 1.25 m yüksekliğine ve 0.32, 0.42 ve 0.53 m uzunluğuna sahip, galvanizli sac malzemeden imal edilmiş savaklar kullanılmıştır. Deneyler, $q=0.00235-0.0358 \text{ m}^3/\text{s.m}$ aralığındaki dört farklı birim debi dikkate alınarak, batmamış akım koşulunda yürütülmüştür. Kanaldaki akımın debisi, Krohne marka elektromanyetik debimetre ile ölçülmüştür. Debimetrenin doğruluğu $\pm 0.50 \text{ L/s}$ 'dir. Kanal tabanının eğimi sabittir ve $S=0.001$ eğim değerine sahiptir. Savak, kanal başlangıcından 6.50 m uzağa yerleştirilmiştir. Kanalın 5.50 metre uzağından başlayarak, savak girişine kadar (mimba bölgesi) altı, savak kesitinde on bir ve savağın mansap

ucundan itibaren kanal çıkışına doğru 1 m mesafede altı farklı okuma noktaları belirlenmiş ve okuma noktaları kanal ekseninde alınmıştır. Bu noktalarındaki akım yükseklikleri dijital limnometre ile okunmuştur (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Deney kanalı görünümü



Şekil 2. Savak üzerinde okunan su seviyelerinin sembolik gösterimi

Şekil 1, bir deney kanalına yerleştirilmiş olan eliptik eğri şekline sahip savak yapısı etrafında oluşan akımın deneysel olarak incelenmesi sırasında kaydedilmiş bir görüntüdür. Şekil 2’de gösterilen okuma noktalarından sırasıyla su seviyeleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Sırasıyla, h_0 memba nap yüksekliğini, y_0 memba su yüksekliğini, y_1 savak tepesi (eğrisel savak kreti boyunca en yüksek kret yüksekliğinin olduğu nokta) üzerindeki su yüksekliğini ve y_2 mansaptaki su yüksekliğini ifade etmektedir. Bu derinlikler, savak yapısı etrafındaki akımın incelenmesinde önemli bir rol üstlenmektedirler.

3. Bulgular ve Tartışma

Deneysel çalışma kapsamında, dört farklı debi değeri için savak profilleri üzerinde yirmi üç noktada su seviyesi okumaları yapılmıştır (Şekil 2). Deneylerden elde edilen bulgular, Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’e bakıldığında,

memba su derinliği (y), dört farklı değer aralığında gösterilmektedir.

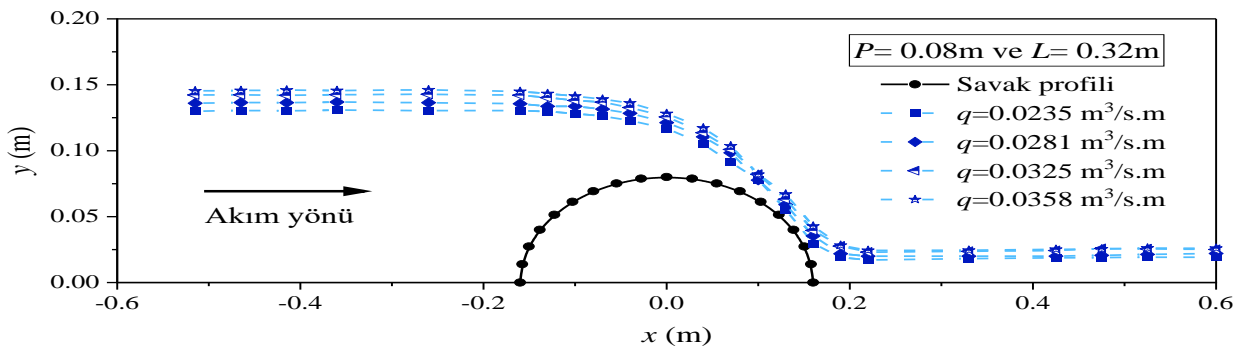
Buradaki değerler yukarıdan aşağıya doğru, sırasıyla $q=0.0235 - 0.0281 - 0.0325$ ve $0.0358 \text{ m}^3/\text{s.m}$ debi değerleri için okunan su seviyesi değerleridir. Su seviyesi değerleri belirlenirken, yüzey geriliminin etkisini en aza indirebilmek adına membada ölçülen su derinliğinin (savak kreti referans alınarak) 0.03 m ’den büyük olmasına dikkat edilmiş ve aynı zamanda düşük yüksekliklerde savağın çalışmasının incelenmesi için de düşük debi değerleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca, toplamda yapılan 16 deney dizisi için, su yüzü profilleri Şekil 3 - 4 - 5 - 6’da gösterilmiştir. Deneyler sırasında okuma hassasiyeti, $\pm\%0.05$ olarak belirtilmiştir.

Tablo 1. Test edilen savakların geometrik özellikleri ve elde edilen akım karakteristikleri

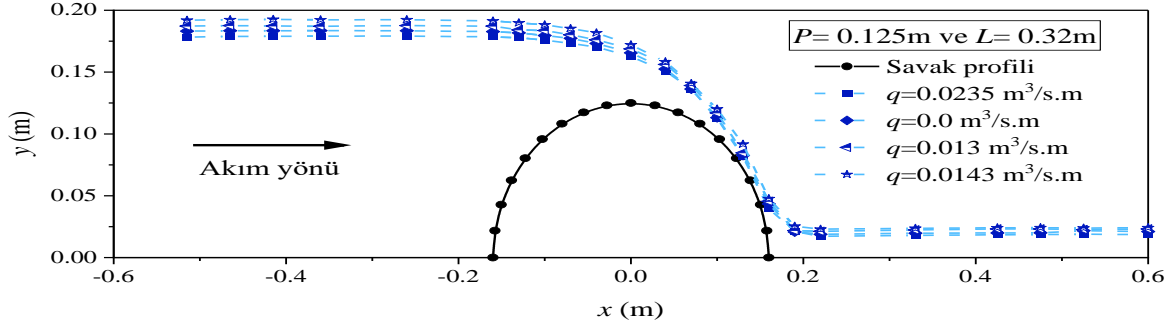
Savak Yüksekliği P (m)	Savak Uzunluğu L (m)	Memba - mansap su derinlikleri $y_0 - y_2$ (m)
0.08	0.32	0.12995-0.01921
		0.13596-0.02209
		0.14231-0.02513
		0.14535-0.02603
0.125	0.32	0.17827-0.01857
		0.18309-0.02102
		0.18723-0.02312
		0.19199-0.02418
0.08	0.53	0.13045-0.01944
		0.13940-0.02274
		0.14264-0.02407
		0.14699-0.02613
0.125	0.53	0.17779-0.01612
		0.18270-0.01716
		0.19038-0.02160
		0.19768-0.02420

3.1. Su Yüzü Profilleri

Şekil 3, 4, 5 ve 6’da, farklı birim debiler için x eksenindeki akım derinlikleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, farklı P ve L değerlerine sahip savaklarda oluşan akım profillerinin nasıl değiştiği gözlemlenmektedir. Bu sayede, savak geometrisinin akım üzerindeki etkisi net bir şekilde anlaşılmaktadır.

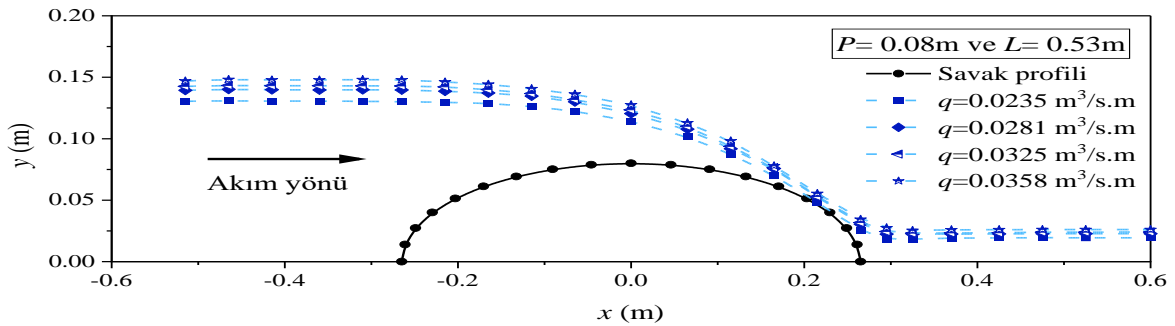


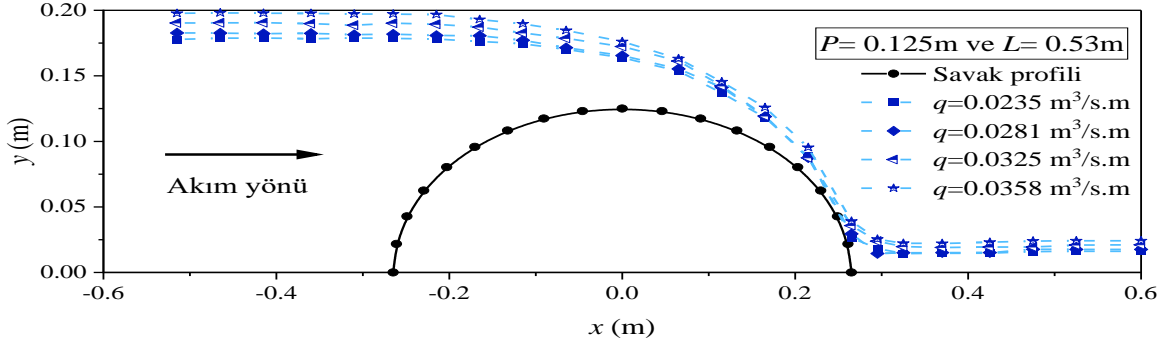
Şekil 3. $P= 0.8 \text{ m}$ ve $L= 0.32 \text{ m}$ olan savaklarda su yüzü profilleri

Şekil 4. $P= 0.125$ m ve $L= 0.32$ m olan savaklarda su yüzü profilleri

Savaklarla ilgili bir fazlı akım (sadece su olması, hava ve sedimentin olmaması durumu) testlerinin yürütülmesi sırasında ölçek etkilerinden korunmak amacıyla bazı sınırlandırmalar mevcuttur. Tam türbülanslı akımın ($Re = \frac{V \times R}{\nu} > 500$, burada Re =Reynolds sayısı, V =Ortalama akış hızı, R =Hidrolik yarıçap ve ν =Suyun kinematik viskozitesini ifade eder) ve yüzeysel gerilim kuvvetlerinin etkilerini azaltmak amacıyla We sayısının 100'den yüksek ve kret üzerindeki akım derinliğinin 30 mm'den fazla olmasına dikkat edilmiştir [18]. Kanal memba bölümünde, her iki savak için de su yükseklikleri aynı seviyelerde ölçülmüştür. Yine savağın memba ucunda, genel olarak su yükseklikleri artan debi değerleri ile birlikte, 0.125'ten 0.150'e kadar çıkmıştır. Savak kreti üzerindeki su seviyeleri, iki şekil için de benzer şekilde değişmektedir. Bu durum savak uzunluğundaki değişimin, kanal girişinden, savak tepesine (savak orta noktası) kadar olan kesitte, su yüzü profili üzerinde önemli bir etki oluşturmayacağını ifade etmektedir. Ancak, savak tepesinden savağın mansap ucuna kadar olan kesitte, savak uzunluğu 0.53 m olan savakta, mansap ucundaki su yükseklikleri yaklaşık olarak 0.025-0.035 m arasında değişirken, savak uzunluğu 0.32 m olan savak için bu değer aralığı, yaklaşık olarak 0.03-0.045 m olarak okunmuştur. Yine x ekseninde 0.10 m referans olarak seçildiğinde (savağın mansap bölgesindeki değişimi incelemek amacıyla), Şekil 3'te yaklaşık olarak 0.075-0.08 m olarak görülen su yüksekliği değerleri, Şekil 5'te 0.085-0.100 m olarak okunmuştur. Yani, savak uzunluğundaki değişim, savağın tepesinden mansap ucuna kadar olan kesitte, savak üzerinden geçen su yüzünde bir değişikliğe sebep olmaktadır. Özellikle düşük savak uzunluğu için çizilen Şekil 3'te, bahsedilen kesitte kalan su yüksekliklerinin düşüş hızı daha fazladır.

Mansap ucu ile kanal çıkışı arasında ise, savak uzunluğundaki değişimin, gözle görülür bir etkisinin olmadığı açıktır. Savak uzunluğu sabit iken savak yüksekliğindeki değişimin su yüzü profili üzerindeki etkisini ifade etmek amacıyla, Şekil 5 ve 6 arasında karşılaştırma yapılabilir. Bu iki akımın su seviyelerini, kanal girişi-savak memba ucu; savak memba ucu-savak tepesi; savak tepesi- savak mansap ucu ve savak mansap ucu- kanal çıkışı şeklinde parçalara ayırarak gözlemlemek işimizi kolaylaştırmaktadır. Kanal girişinden, memba ucuna kadar olan kısımda savak yüksekliğinin artması ile birlikte memba bölgesinde daha fazla su birikmektedir. Şekil 5'te 0.13-0.15m arasında değişen su seviyeleri, Şekil 6'da 0.175-0.20 arasındadır. Eğer bu su seviyelerinin ölçüm noktası başlangıcını, savak tepesi (referans düzlemi) olarak alırsak, bu durumda su yükseklikleri her iki savak için de 0.05-0.07 arasında değişmektedir. Yani savak yüksekliği, su seviyesinde bir değişim meydana getirmemektedir. Şekil 5 ve 6'da, savağın memba ucundan, savak tepesine kadar olan kesit için, 0.08 m yüksekliğinde savakta, savak tepesi üzerinde okunan su yüksekliği 0.120-0.135 m aralığında olup, 0.125 m yüksekliğindeki savaklarda bu değer aralığı, 0.165-0.180 m civarında ölçülmüştür. Benzer şekilde, savak tepesini referans olarak aldığımızda, bu durum her iki savak için de, savak tepesi üzerinde ortalama 0.05 m bir su seviyesinin ölçüldüğünü göstermektedir. Yani savak yüksekliğindeki bir değişimin, tıpkı Şekil 3 ve 5 arasındaki karşılaştırmada olduğu gibi savak tepesinden önceki kısımda bir değişiklik göstermediğini belirtmek mümkündür. Savak tepesinden savak mansap ucuna kadar olan kesite bakıldığında, öncelikle savak ucunda, her iki savak için de 0.025-0.035 m arasında bir su seviyesi okuması yapıldığı görülmektedir.

Şekil 5. $P= 0.08$ m ve $L= 0.53$ m olan savaklarda su yüzü profilleri

Şekil 6. $P=0.125$ m ve $L=0.53$ m olan savaklarda su yüzü profilleri

Şekil 5 ve 6'da x ekseninde 0.10 m referans alınırsa, 0.08 m yüksekliğindeki savak için, 0.085-0.10 m arasında değişen seviye; 0.125 m yüksekliğindeki savakta, 0.135-0.150 m arasında değişmektedir. 0.10 m'ye karşılık gelen y değeri her iki şekilde başlangıç olarak seçilirse, su seviyelerinin yaklaşık olarak eşit olduğu görülmüştür. Yani, savak yüksekliğindeki değişim, savak üzerindeki herhangi bir noktada su seviyeleri üzerine gözle görülür bir etkide bulunmamaktadır. Şekil 7 ve Şekil 8'de geometrileri verilen savakların deneysel görünümü verilmiştir.

Şekil 7. $P=0.08$ m ve $L=0.53$ m olan savak için yapılan deney

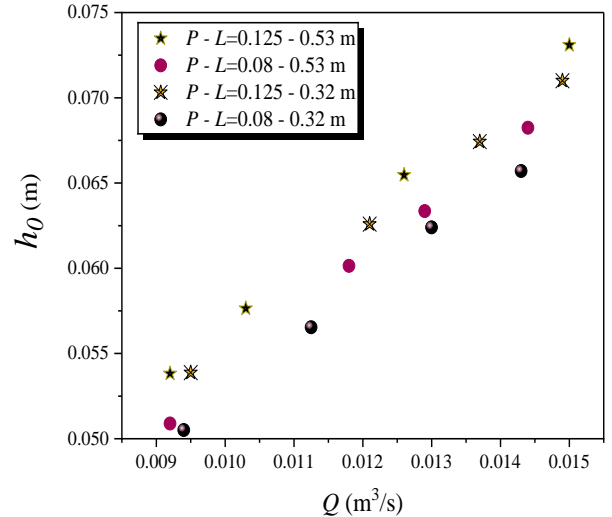
Ancak savak yüksekliğinin artması ile birlikte su yüzü profilinin eğriliği de artmaktadır. Kanal çıkışına kadar olan kesit incelendiğinde, savak yüksekliğinin mansap su seviyesi üzerinde gözle görülür bir etkisi olmamaktadır. Buna ilaveten, artan debi ile birlikte, Şekil 5 ve 6'da görüldüğü üzere, su seviyelerinde bir artış meydana gelmektedir.

Şekil 3, Şekil 4 ve 6 ile mukayese edildiğinde, öncelikle savak yüksekliği aynı olduğunda (Şekil 4 ve 6 için), su yüksekliklerinin, ilk ölçüm istasyonlarında sabit bir değerde başladığını (0.18-0.20 m) ve savak tepesindeki ölçüm istasyonunda da aynı değerlerin okunduğu belirtilmelidir (0.160-0.175 m). Ama dikkat edilmesi gereken nokta, yaklaşık olarak 0.2 m'lik bir su seviyesi düşüşünün Şekil 4'te 0.160 m yatay mesafede gerçekleşirken; Şekil 6'da ise 0.265 m yatay mesafede gerçekleştiğidir. Yani, su yüzü profiline bakıldığında, savak yüksekliği aynı iken, savak uzunluğu azaldığında savak memba bölgesindeki su yüzü düşüş hızının daha fazla olduğu ifade edilebilir. Yine benzer şekilde, savak tepesinden savak mansap ucuna kadar olan kesitte, aynı miktarda bir su seviyesi düşüşü olmasına

rağmen, 0.32 m uzunluğuna sahip savakta bu düşüş daha hızlı gerçekleşmiştir. Her bir şekil için, savak tepesi üzerindeki su yüzü profili, tepenin sağ kesitinde, sol kesitine göre daha eğriseldir, yani ölçüm noktalarında okunan su seviyesi düşüşleri savağın mansap ucuna doğru daha şiddetlidir. Bu da kritik derinliğin savak tepesi ile mansap ucu arasındaki bir noktada olduğunu kanıtlamaktadır. Yukarıda da ifade edildiği üzere, savak uzunluğu arttıkça, su yüzünün eğriliğinin daha az olması, kritik derinliğin savak mansap ucuna daha da yaklaştığına işaret edebilir.

Şekil 8. $P=0.125$ ve $L=0.32$ m olan savak için yapılan deney

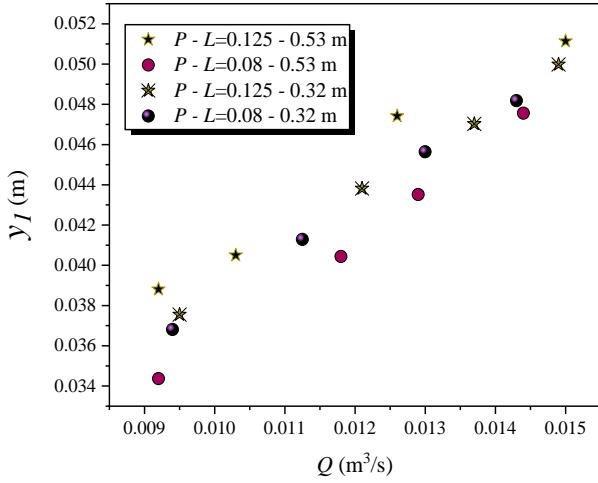
Şekil 2'de savak yapısı etrafındaki akımın incelenmesi sırasında bazı noktaların daha fazla önem taşıdığı belirtilmişti. Bir savak yapısının, akım ölçümü için kullanılması için bazı değerlerin bilinmesi gereklidir.

Şekil 9. h_o ile Q arasındaki ilişki

Örneğin debi katsayısı (C_d), her bir savak türü için farklı değerler almaktadır ve savak üzerindeki akım incelenirken debi katsayısı değerinin belirlenmesi mutlaka gereklidir. Bu nedenle, h_0 memba nap yüksekliği değerinin detaylı olarak incelenmesi gereklidir. Şekil 9, memba nap yüksekliğinin, debi ile olan değişimini incelemek amacıyla çizilmiştir.

Şekil 9'a bakıldığında, dört farklı savak türü için de debinin artması ile birlikte memba nap yükseklikleri artmakta ve bu artış oranı neredeyse eşit olmaktadır. Savak kreti üzerinden okunan bu değerler, savak yüksekliği arttıkça membada biriken suyun arttığını göstermektedir. Aynı zamanda, sabit bir savak yüksekliğinde, savak uzunluğu arttıkça, membada biriken su artmaktadır. Yani, savağın gerçek uzunluğu ne kadar fazla ise membadaki su yükünün o kadar fazla olacağı sonucuna ulaşılabılır.

Şekil 10, dört farklı savak türü için, savak tepesi üzerindeki akım derinliğinin debi ile olan değişimini gösterir.

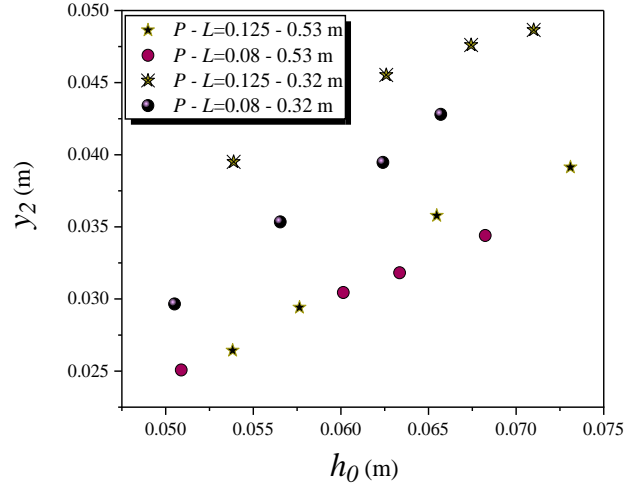


Şekil 10. y_1 ile Q arasındaki ilişki

Şekil 10'a göre, debinin artması ile birlikte savak tepesi üzerindeki akım derinliğinin arttığı açıktır. Mevcut çalışma aralığında, savak yüksekliğindeki artışın, savak tepesi üzerindeki derinliği arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, savak uzunluğuna göre savak tepesindeki değişim incelendiğinde, 0.08 m yüksekliğine sahip savaklarda, akım hızına göre uzunluğun etkisi değişmektedir. Düşük nap yükseklikleri için 0.32m uzunluğa sahip savaklarda, y_1 derinliği daha fazla iken, nap yüksekliği arttıkça 0.53 m uzunluğa sahip savakların daha yüksek bir tepe noktası derinliğine (y_1) sahip olacağı ifade edilebilir. 0.125 m yüksekliğe sahip savaklarda ise, bu durum genel olarak tüm nap yükseklikleri için, uzun olan savağın daha büyük y_1 değerine sahip olduğunu göstermektedir.

Mansaptaki su derinliğinin, memba nap yüksekliğine göre olan değişimini incelemek amacıyla Şekil 11 çizilmiştir. Mansap su seviyesi, bir akımın serbest akım (batmamış akım) veya batık akım durumunda oluşunu belirler. Yapılan tüm deneyler serbest akım koşulunda, yani mansap su yüksekliğinin,

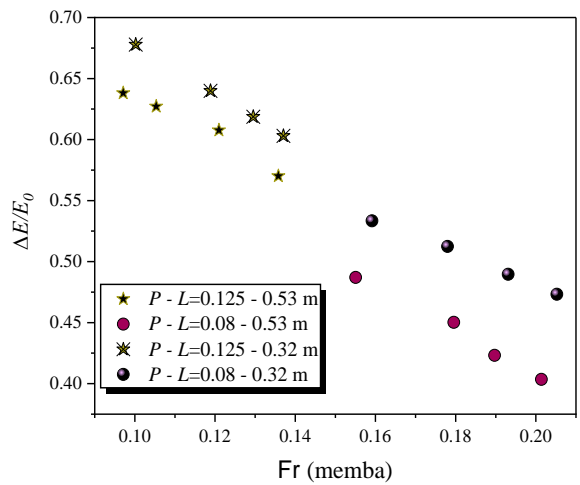
membadaki su seviyesini etkilemediği durum için yapılmıştır.



Şekil 11. y_2 ile h_0 arasındaki ilişki

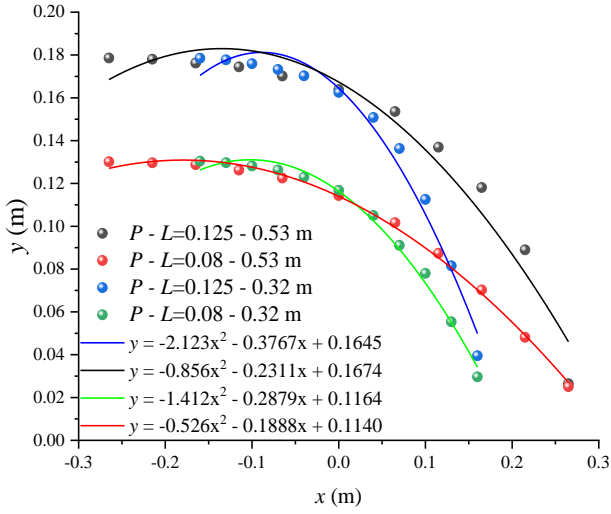
Şekil 11'deki verilerin eğilimine dayanarak, memba su seviyesindeki artışın, mansap su seviyesini de artırdığı sonucuna ulaşılabılır. En büyük mansap su derinlikleri, 0.32 m uzunluğa sahip savaklarda okunmuştur ki bu durum, savak uzunluğunun azalmasının mansaptaki su seviyesinde bir artışa sebep olacağını belirtmektedir. Buna ilaveten, Şekil 11'deki memba derinliklerine göre (küçük debi değerleri için), savak yüksekliği büyük olan 0.125 m savaklar için mansap ucundaki su seviyesi değerleri daha büyüktür. Lakin söz konusu grafikteki verilerin eğilimi, daha büyük memba su seviyesi değerleri için, düşük savak uzunluklarında, mansaptaki su derinliğinin daha fazla olacağı çıkarımında bulunmamıza olanak sağlamaktadır.

Akım hızlarının, savak etrafındaki akımın karakteristiklerini nasıl etkilediğini incelemek adına Şekil 12 verilmiştir. Şekil 12, dört farklı savak için, enerji kayıplarının membadaki Froude sayısı ile ilişkisini göstermektedir.



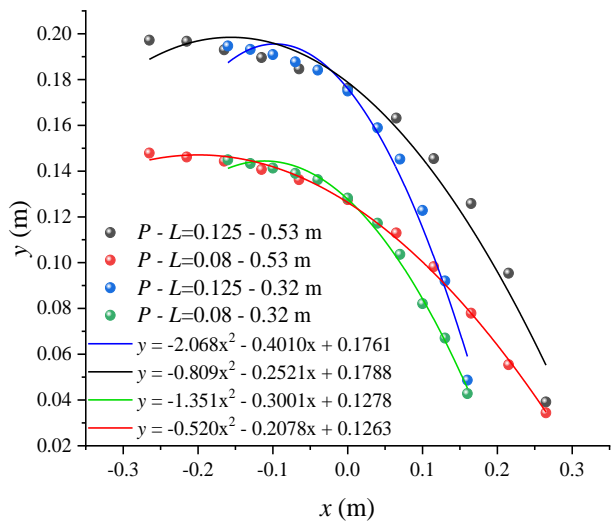
Şekil 12. Boyutsuz enerji kaybı ile Froude arasındaki ilişki

Froude sayısının artması ile birlikte enerji kayıpları azalmaktadır. Düşük debilerde, sabit bir Froude sayısı değeri ve savak yüksekliği için, savak uzunluğunun azalması ile daha büyük enerji kayıpları meydana gelmektedir.



Şekil 13. $q = 0.0235 \text{ m}^3/\text{s.m}$ debi değeri için savak üzerindeki su seviyelerinin değişimi

Şekil 13'te $q = 0.0235 \text{ m}^3/\text{s.m}$ değerindeki bir akımın, savak kesiti üzerinden geçerken oluşturduğu su yüzü profili sunulmuştur. Şekil 13'e göre, savak memba ucunda aynı seviyelerde başlayan su seviyesi değerleri aynı savak yükseklikleri için, savak uzunluğuna bağlı olarak değişen eğrilikler ile savak boyunca ilerlemektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, savak yüksekliği sabit iken, savak uzunluğunun azalması ile, akımın eğriliği artmaktadır ve parabol daralma eğilimi göstermektedir. Ayrıca savak uzunluğu sabit iken, artan savak yüksekliği ile beraber akımın eğriliği de artmaktadır.



Şekil 14. $q = 0.0358 \text{ m}^3/\text{s.m}$ debi değeri için savak üzerindeki su seviyelerinin değişimi

Şekil 14'te ise $q = 0.0358 \text{ m}^3/\text{s.m}$ değerindeki bir akımın, savak kesiti üzerinden geçerken oluşturduğu su yüzü profili sunulmuştur. Şekil 14'e bakıldığında, tıpkı şekil 13'teki ifadeler çıkarılabilir. Ancak, Şekil 13 ve 14 arasındaki en büyük fark, artan debi değeri ile beraber akımın eğriliğinin azalma eğiliminde olduğu sonucudur.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, eliptik eğri şekline sahip savakların etrafındaki akımın incelenmesi ve su yüzü profillerinin belirlenmesi amacıyla bir dizi deneyler yürütülmüştür. Bu amaç doğrultusunda, seçilen iki savak yüksekliği (0.080 ve 0.125 m) ve iki savak uzunluğu (0.32 ve 0.53 m) için savaklar imal edilmiştir. Deney kanalına yerleştirilmiş olan bu savak yapıları kullanılarak dört farklı debi değeri için (0.0235, 0.0281, 0.0325 ve 0.0358 $\text{m}^3/\text{s.m}$) deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada; savak uzunluğundaki değişimin su yüzü profili üzerinde etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Özellikle düşük savak uzunluğu için, savak kretinden mansap ucuna kadar olan kesitte kalan su yüksekliklerinin düşüş hızının daha fazla olduğu gözlenmiştir. Savak yüksekliğinin artması ile birlikte su yüzü profilinin eğriliğinin arttığı belirlenmiştir. Genel olarak, debinin artması ile birlikte, nap yüklerinde artışlarla birlikte daha eğrisel bir su yüzü profili meydana gelmiştir.

Sembol Listesi

ΔE = Boyutsuz enerji kaybı (-)

E_0 = Membadaki enerji yüksekliği (L)

Fr = Froude sayısı (-)

h = Membada savak kreti üzerindeki su derinliği [L]

h_0 = Membda nap yüksekliği (L)

L = Savak uzunluğu (L)

P = Savak yüksekliği (L)

q = Birim debi (L^2T^{-1})

Q = Debi (L^3T^{-1})

Re = Reynolds sayısı (-)

S = Eğim (-)

We = Weber sayısı (-)

x = Yataydaki ölçüm noktalarının konumu (L)

y = Membda su yüksekliği (L)

y_1 = Savak tepesi üzerindeki su yüksekliği (L)

y_2 = Mansap su yüksekliği (L)

Kaynaklar

- [1] N. S. Govinda Rao and D. Muralidhar, "Discharge characteristics of weirs of finite crest width," *Houille Blanche*, no. 5, pp. 537–545, 1963.
- [2] W. H. Hager and M. Schwalt, "Broad-Crested Weir," *J.Irrigat. Eng.*, vol. 120 no. 1, pp.13-26, 1994
- [3] A.H. Azimi, N. Rajaratnam, "Discharge characteristics of weirs of finite crest length," *J. Hydraul. Eng.*, vol.135, no. 12, pp. 1081–1085, 2009.
- [4] N. G. Soydan Oksal, M. S. Aköz, and O. Simsek, "Experimental analysis of flow characteristics over hydrofoil weirs," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 79, 2021.
- [5] A.S. Ramamurthy, N.-D. Vo, "Characteristics of circular-crested weir," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 119, pp. 1055–1062, 1993.
- [6] E. D. Atlas, M. A. Kizilaslan, and E. Demirel, "Experimental investigation of turbulent flow upstream of the broad-crested weir," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 455–461, 2020.
- [7] M. Ilkentapar, A. A. Oner, "Geniş Başlıklı Savak Etrafındaki Akımın İncelenmesi." *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.*, vol. 6, no. 2, pp. 615–626, 2017.
- [8] O. Şimşek, M. S. Aköz and V. Gümüş, "Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel Ve Teorik Analizi," *Çukurova Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Derg.*, vol. 26, no. 2, pp. 47-55, 2011.
- [9] M. C. Yıldız and A. Yarar, "Geniş başlıklı savaklardaki savak yüklerinin deneysel ve sayısal olarak modellenmesi," *Konya J. Eng. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 164–174, 2020,
- [10] B. S. Amruthur Ramamurthy, U. S. Tim, M. V J Rao, and A. Member, "Characteristics of Square-Edged and Round-Nosed Broad-Crested Weirs," *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 114, no. 1, pp. 61–73, 1988.
- [11] M. R. Madadi, A. Hosseinzadeh Dalir, and D. Farsadizadeh, "Investigation of flow characteristics above trapezoidal broad-crested weirs," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 38, pp. 139–148, 2014.
- [12] E. Goodarzi, J. Farhoudi, and N. Shokri, "Flow characteristics of rectangular broad-crested weirs with sloped upstream face," *J. Hydrol. Hydromechanics*, vol. 60, no. 2, pp. 87–100, 2012.
- [13] M.G. Bos, "Discharge Measurement Structures," *International Institute for Land Reclamation and Improvement, ILRI*, Wageningen, The Netherlands, 1976.
- [14] E. Bahman, A. Kabiri-Samani, M.N. Moghim, "Discharge coefficient of hydrofoil weirs based on potential flow theory around a symmetric Joukowski hydrofoil," *J. Hydraul. Res.*, pp. 1–11, 2019.
- [15] U.S. Bureau of Reclamation (USBR), Design of Small Dams, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1987.
- [16]] U.S., Army Corps of engineers (USACE). Hydraulic Design of Spillways, U.S., Government Printing Office, Washington, DC, 1990.
- [17] S. Dönmez and R. Lekeziz, "Silindir Savaklar İçin Savak Katsayısı", *Pamukkale Üniversitesi Müh. Fak. Müh. Bilim. Derg.*, pp. 85–90, 2002.
- [18] E. Afaridegan, N. Amanian, A. Parsaie, and A. Gharehbaghi, "Hydraulic investigation of modified semi-cylindrical weirs," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 93, 2023.